UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física

PROJETO DE PESQUISA

Spintrônica e Optoeletrônica em Materiais Magnéticos

COORDENADOR:

José Holanda da Silva Júnior

maio de 2022

Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA
Rua Cento e Sessenta e Três, 300 – Garapu
54518-430 Cabo de Santo Agostinho/PE
www.ppengfis.ufrpe.br

I- IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

1- Título	
Spintrônica e Optoeletrônica em Materiais Magnéticos	
2- Vigência	
Início previsto (mês/ano):	05/2022
Término previsto (mês/ano):	05/2026
3- Classificação da área do projeto (classificação definida pelo CNPq)	
Nome da área :	Física
Número do código:	1.05.00.00-6
Nome da sub-área :	Física da Matéria Condensada
Número do código:	1.05.07.00-0
Nome da especialidade:	Prop.Óticas e Espectrosc.da Mat.Condens;Outras Inter.da Mat.Com Rad.e Part.
Número do código:	1.05.07.16-7
4- Linhas de pesquisa do PPENGFIS contempladas no projeto	
X	Materiais Nanoestruturados
X	Materiais para aplicações ambientais, energéticas e industriais
X	Metrologia e Instrumentação
X	Espectroscopia coerente e óptica não linear
X	Controle e dinâmica não linear
5- Palavras-chaves (máximo 5 palavras)	
• Spintrônica	• Magnônica
• Optoeletrônica	• Caloritrônica de spin
• Plasmônica	

Cabo de Santo Agostinho,09 de maio de 2022

José Holanda da Silva Júnior

Coordenador:José Holanda da Silva Júnior

(SIAPE: *3213145*)

6- Participantes docentes:

Nome:	José Holanda da Silva Júnior
CPF:	019.016.453-04
E-mail:	joseholanda.homeoffice@gmail.com
Bolsista do CNPq:	○ NÃO ◉ SIM Se sim, qual nível?:PQ-2
Função:	Coordenador☒ Colaborador☐

Nome:	Marcos Cesar Santos Oriá
CPF:	166.0590774-91
E-mail:	marcos.oria@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	○ NÃO ◉ SIM Se sim, qual nível?:PQ-2
Função:	Coordenador ☐ Colaborador X

Nome:	Rafael Alves de Oliveira
CPF:	060.534.824-39
E-mail:	rafael@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	◉ NÃO ○ SIM Se sim, qual nível?:
Função:	Coordenador ☐ Colaborador X

Nome:	Albert Stevens Reyna Ocas
CPF:	700.287.194-33
E-mail:	albert.reyna@ufrpe.br
Bolsista do CNPq:	○ NÃO ◉ SIM Se sim, qual nível?:PQ-2
Função:	Coordenador ☐ Colaborador X

II- DETALHAMENTO DO PROJETO

1. Resumo

A spintrônica busca estudar fenômenos relacionados ao spin do elétron. Por outro lado, a optoeletrônica representa a aplicação de dispositivos e sistemas eletrônicos que fornecem, detectam e controlam a luz. Juntar esses duas áreas para explorar fenômenos em materiais magnéticos é o que será feito neste projeto.

2. Introdução

O objetivo da spintrônica e da optoeletrônica é estudar o controle, o transporte e a manipulação do spin e da luz de algum modo. Embora o spin e a luz desempenhem um papel fundamental na explicação da multiplicidade de espectros atômicos, sem dúvidas, esse não é o papel mais importante destas duas entidades. Foi observado em meados do século 20 que o spin desempenha um papel fundamental no magnetismo. Todo modelo teórico postulado para explicar a origem física do magnetismo envolve o spin de uma forma ou de outra. Isso envolve o modelo de Bloch, o modelo de Heisenberg, o modelo de Stoner e todos os outros modelos avançados. No final do século 20 percebeu-se que o spin, sozinho ou em conjunto com a carga, pode ser aproveitado para processar informações, particularmente informações digitais codificadas com bits binários 0 e 1. Neste contexto, a optoeletrônica contribui para expandir a aplicação de dispositivos e sistemas eletrônicos que fornecem, detectam e controlam a luz. Conseqüentemente, a luz geralmente inclui formas invisíveis de radiação, como raios gama, raios X, ultravioleta e infravermelho, além da luz visível.

Naturalmente, a spintrônica e a optoeletrônica são muito mais do que apenas uma interpretação de informações e inclui as áreas mais tradicionais da magnetoeletrônica que tratam de efeitos magnéticos ou magneto-resistivos para detectar e armazenar informações [1-20]. Os primeiros êxitos nestas áreas incluem, os desenvolvimentos das cabeças de leitura para detectar meios de armazenamento magnético extremamente densos (estas cabeças de leituras são rotineiramente usadas em computadores portáteis e sistemas de entretenimento, como os Apple iPods), memória de acesso aleatório magnético não volátil (MRAM) [21], dispositivos de lógica spintrônica programáveis baseados em elementos magnéticos de junção túnel [22], sistemas de controle de velocidade de spin [23], dispositivos de controle de posicionamento em sistemas robotizados e

relacionados (como sistemas de travagem de automóveis) [24], sistemas de defesa perimetral, magnetômetros e dispositivos de monitoramento de alta corrente para sistemas de energia [25], etc. Muitos desses desenvolvimentos foram alimentados pela investigação de como as correntes elétricas spin-polarizadas podem ser injetadas em multicamadas ferromagnéticas/paramagnéticas que, na década de 1980, levaram a importante descoberta do fenômeno da magnetorresistência gigante (GMR) [26, 27].

Atualmente, diversos fenômenos têm sido estudados nestas áreas, entre eles estão: magnetoresistência Hall de spin, efeitos de torque de transferência de spin (STT), controle de campo de anisotropia magnética, propriedades multiferróicas em óxidos complexos, efeito spin Seebeck, efeito spin Peltier, efeitos Hall de spin, efeito Hall quântico de spin, propriedades de materiais 2D (isolantes topológicos, grafeno, etc), ressonância plasmônica, fenômenos dinâmicos excitados com lasers pulsados [1-20, 28-30]. Todos esses efeitos para serem estudados em materiais magnéticos requerem conhecimento de técnicas de fabricação, processamento e análises em escala nanométrica. Por exemplo, uma corrente elétrica polarizada pode ser usada para alterar a magnetização de um elemento de memória em nanoescala. Esse é um exemplo do efeito STT. Pode ser imaginado como o inverso de uma corrente que torna-se polarizada quando passa através de um meio magnetizado devido a processos de espalhamento de dispersão de spin. O STT requer uma grande corrente de spin que passa por uma pequena passagem. Portanto, uma geometria preferida é a de nanopilar.

Muitos são os fenômenos que vêm sendo descobertos e estudados a fim de expandir as pesquisas nessas novas áreas da nanociência e torná-las cada vez mais aplicadas. Desse modo, existe a necessidade de mantermos os níveis de pesquisa qualificada buscando descobrir novos fenômenos, formar novos pesquisadores e assim tornar o Brasil um país mais competitivo em áreas de fronteira como estas.

3. Objetivos

Geral:

Neste projeto propõe-se a pesquisa de fenômenos dentro das áreas da spintrônica e da optoeletrônica em materiais magnéticos.

Específicos:

Será enfatizada a possibilidade de aplicação e geração de dispositivos spin-opto-eletrônicos comerciais.

4. Metodologia

Os fenômenos a serem investigados serão explorados através de técnicas de medidas experimentais e de simulações. As técnicas experimentais serão tais como: térmicas (spin Seebeck e anômalo Nernst), magnetorresistência Hall de spin, ressonância ferromagnética, ressonância plasmônica, pulsos de ondas eletromagnéticas, spin pumping, spin fotovoltaica, espalhamento de luz Brillouin, espalhamento de luz Raman, microscopia de força atômica, microscopia eletrônica de transmissão. As técnicas de simulações dos fenômenos usaram software livre tais como: Object Oriented MicroMagnetic Framework (OOMMF) desenvolvida pelo National Institute of Standards and Technology (NIST/USA), Micromagnetic Modeling Activity Group (µMAG) desenvolvida pelo NIST Center for Theoretical and Computational Materials Science (CTCMS/USA). Além disso, pretende-se adquirir algum outro software, tal como o Mathematica da Wolfram para simulações com código próprio.

5. Resultados esperados

Os fenômenos em áreas como a spintrônica e optoeletrônica são importantes para os mais diferentes tipos de aplicações, uma das mais importantes aplicações da spintrônica foi à descoberta da magnetorresitência gigante que usamos cotidianamente nos Hard Disc Drive (HDD) dos nossos computadores. Tal descoberta deu aos seus descobridores o prêmio Nobel em Física de 2007. A compreensão de fenômenos recentemente descobertos, assim como novos, é fundamental para as aplicações práticas e o desenvolvimento da ciência brasileira.

Como conseqüência das contribuições científicas deste projeto, pretende-se durante o seu desenvolvimento:

- Formar recursos humanos em todos os níveis com ênfase nos campos aqui descritos;

- Montar técnicas experimentais e de simulação;
- Explorar a possibilidade de aplicações visando parcerias com empresas de tecnologias;
- Publicar e divulgar os resultados em revistas indexadas;
- Produzir patentes.

6. Cronograma de atividades

Semestre / Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
II	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
III	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
V		X	X	X	X	X	X	X	X	X
VI			X	X	X	X	X	X	X	X
VII				X	X	X	X	X	X	X

Atividade I	Revisão bibliográfica, aulas, minicursos, palestras sobre técnicas e fenômenos
Atividade II	Produção de amostras, caracterização, montagem de estruturas experimentais, aprendizagem de técnicas de simulação
Atividade III	Montagem de técnicas experimentais
Atividade IV	Experimentos, modelagem teórica e simulações
Atividade V	Resultados
Atividade VI	Análises de resultados
Atividade VII	Escrita de relatórios, artigos, patentes, produção de dispositivos comerciais

7. Apoio financeiro e/ou institucional

O projeto ainda não possui financiamento.

8. Referências

[1] J. Holanda, D. S. Maior, O. A. Santos, A. Azevedo, S. M. Rezende. Evidence of phonon pumping by magnonic spin currents. Appl. Phys. Lett., **118**, 022409 (2021).

[2] J. Holanda, H. Saglam, V. Karakas, Z. Zang, Y. LI, R. Divan, Y. Liu, O. Ozatay, V. Novosad, J. E. Pearson, A. Hoffmann. Magnetic Damping Modulation in via the Magnetic Spin Hall Effect. Phys. Rev. Lett., **124**, 087204 (2020).

[3] M. Arana, M. Gamino, A. B. Oliveira, J. Holanda, A. Azevedo, S. M. Rezende, R. L. Rodríguez-Suárez. Unraveling intricate properties of exchange-coupled bilayers by means of broadband ferromagnetic resonance and spin pumping experiments. Phys. Rev. **B 102**, 104405 (2020).

[4] J. B. S. Mendes, O. Alves Santos, T. Chagas, R. Magalhães-Paniago, T. J. A. Mori, J. Holanda, L. M. Meireles, R. G. Lacerda, A. Azevedo, S. M. Rezende. Direct detection of induced magnetic moment and efficient spin-to-charge conversion in graphene/ferromagnetic structures. Phys. Rev. **B 99**, 214446 (2019).

[5] Z. Zhang, M. Vogel, J. Holanda, J. Ding, M. B. Jungfleisch, Y. Li, J. E. Pearson, R. Divan, W. Zhang, A. Hoffmann, Y. Nie, V. Novosad. Controlled interconversion of quantized spin wave modes via local magnetic fields. Phys. Rev. **B100**, 014429 (2019).

[6] Z. Zhang, M. Vogel, J. Holanda, M. B. Jungfleisch, C. Liu, Y. Li, J. E. Pearson, R. Divan, W. Zhang, A. Hoffmann, Y. Nie, V. Novosad. Spin-wave frequency division multiplexing in an yttrium iron garnet microstripe magnetized by inhomogeneous field. Appl. Phys. Lett. **115**, 232402 (2019).

[7] J. Holanda, D. S. Maior, A. Azevedo, S. M. Rezende. Detecting the phonon spin in magnon-phonon conversion experiments. Nature Physics **14**, 500 (2018).

[8] J. B. S. Mendes, A. Aparecido-Ferreira, J. Holanda, A. Azevedo, S. M. Rezende. Efficient spin to charge current conversion in the 2D semiconductor MoS2 by spin pumping from yttrium iron garnet. Appl. Phys. Lett. **112**, 242407 (2018).

[9] C. A. França, Y. Guerra, D. R. B. Valadão, J. Holanda, E. Padrón-Hernández. Transmission electron microscopy as a realistic data source for the micromagnetic simulation of polycrystalline nickel nanowires. Comput. Mater. Scien. **128**, 42 (2017).

[10] F. L. A. Machado, P. R. T. Ribeiro, J. Holanda, R. L. Rodríguez-Suárez, A. Azevedo, S. M. Rezende. Spin-flop transition in the easy-plane antiferromagnet nickel oxide. Phys. Rev. **B 95**, 104418 (2017).

[11] J. Holanda, O. Alves Santos, R. L. Rodríguez-Suárez, A. Azevedo, S. M. Rezende. Simultaneous spin pumping and spin Seebeck experiments with thermal control of the magnetic damping in bilayers of yttrium iron garnet and heavy metals: YIG/Pt and YIG/IrMn. Phys. Rev. **B 95**, 134432 (2017).

[12] J. Holanda, O. Alves Santos, R. O. Cunha, J. B. S. Mendes, R. L. Rodríguez-Suárez, A. Azevedo, S. M. Rezende. Longitudinal spin Seebeck effect in permalloy separated from the anomalous Nernst effect: Theory and experiment. Phys. Rev. **B 95**, 214421 (2017).

[13] J. B. S. Mendes, O. Alves Santos, J. Holanda, R. P. Loreto, C. I. L. de Araujo, C.-Z. Chang, J. S. Moodera, A. Azevedo, S. M. Rezende. Dirac-surface-state-dominated spin to charge current conversion in the topological insulator (Bi0.22Sb0.78). Phys. Rev. **B 96**, 180415(R) (2017).

[14] J. Holanda, D. S. Maior, O. Alves Santos, L. H. Vilela-Leão, J. B. S. Mendes, A. Azevedo, R. L. Rodríguez-Suárez, S. M. Rezende. Spin Seebeck effect in the antiferromagnet nickel oxide at room temperature. Appl. Phys. Lett**. 111**, 172405 (2017).

[15] G. P. Fuentes, J. Holanda, Y. Guerra, D. B. O. Silva, B. V. M. Farias, E. Padrón-Hernández. Micromagnetic simulation and the angular dependence of coercivity and remanence for array of polycrystalline nickel nanowires. J. Magn. and magn. Mater. **423**, 262 (2017).

[16] J. Holanda, D. S. Maior, A. Azevedo, S. M. Rezende. Anisotropic magnetoresistance and anomalous Nernst effect in exchange biased permalloy/(100) NiO single-crystal. J. Magn. and Magn. Mater. **432**, 507 (2017).

[17] R. Vidyasagar, O. Alves Santos, J. Holanda, R. O. Cunha, F. L. A. Machado, P. R. T. Ribeiro, A. R. Rodrigues, J. B. S. Mendes, A. Azevedo, S. R. Rezende. Giant Zeeman shifts in the optical transitions of yttrium iron garnet thin films. Appl. Phys. Lett. **109**, 122402 (2016).

[18] J. Holanda, D. B. O. Silva, E. Padrón-Hernández. Angular dependence of the coercivity in arrays of ferromagnetic nanowires. J. Magn. and Magn. Mater. **378**, 228 (2015).

[19] R. O. Cunha, J. Holanda, L. H. Vilela-Leão, A. Azevedo, R. L. Rodríguez-Suárez, S. M. Rezende. Nonlinear dynamics of three-magnon process driven by ferromagnetic resonance in yttrium iron garnet. Appl. Phys. Lett. **106**, 192403 (2015).

[20] J. Holanda, C. L. A. V. Campos, C. A. Franca, E. Padrón-Hernández. Effective surface anisotropy in polycrystalline ferromagnetic nanowires. J. All. Comp. **617**, 639 (2014).

[21] P. P. Freitas, F. Silva, N. J. Oliveira, L. V. Melo, L. Costa and N. Almeida, “Spin valve sensors”, Sensors and Actuators A, **81**, 2 (2000).

[22] J. Wang, H. Meng and J.P. Wang, “Programmable spintronics logic device based on a magnetic tunnel junction element”, J. Appl. Phys., **97**, 100509 (2005).

[23] P. P. Freitas, L. Costa, N. Almeida, L. V. Melo, F. Silva, J. Bernardo and C. Santos, “Giant magnetoresistive sensors for rotational speed control”, J. Appl. Phys., **85**, 5459 (1999).

[24] W.J. Ku, P.P. Freitas, P. Compadrinho and J. Barata, “Precision X-Y robotic object handling using a dual GMR bridge sensor”, IEEE Trans. Magn., **36**, 2782 (2000).

[25] J. Pelegri, J.B. Egea, D. Ramirez and P.P. Freitas, “Design, fabrication, and analysis of a spin-valve base current sensor”, Sensors and Actuators A, **105**, 132 (2003).

[26] M.N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas, “Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices”, Phys. Rev. Lett.,**61**, 2472 (1988).

[27] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach and W. Zinn, “Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange”, Phys. Rev. B, **39**, 4828 (1989).

[28] Yijun Tang, Xiangqun Zeng, and Jennifer Liang. Surface Plasmon Resonance: An Introduction to a Surface Spectroscopy Technique. J. Chem. Educ., **87**, 7, 742–746 (2010).

[29] Ray Bakhtiar. Surface Plasmon Resonance Spectroscopy: A Versatile Technique in a Biochemist’s Toolbox. J. Chem. Educ., **90**, 2, 203–209 (2013).