

# MEDIDAS DE MAGNETO TRANSPORTE EM NANOFIOS FERROMAGNÉTICOS ISOLADOS

---

**Aluno:** Renan Daniel Domingos, **RA:** 092820

[renandd@ifi.unicamp.br](mailto:renandd@ifi.unicamp.br)

**Orientadora:** Profª. Dr. Fanny Béron

Laboratório de Materiais e Baixas Temperaturas (LMBT)

Departamento de Física da Matéria Condensada (DFMC)

[fberon@ifi.unicamp.br](mailto:fberon@ifi.unicamp.br)

**Palavras Chaves:** *Dieletroforese, Nanofios, Magnetotransporte, Nanoestruturas e Magnetismo*

---

## Resumo

*O projeto consiste na fabricação e caracterização magnetoelétrica de um circuito simples baseado em nanofios ferromagnéticos isolados. Os nanofios de níquel e as redes de eletrodos serão fabricados por eletrodeposição e litografia, respectivamente, e posteriormente ligados pela técnica de dieletroforese. O foco desse projeto é estudar o comportamento magnetorresistivo de nanofios ferromagnéticos individuais. Ambas medidas de transporte utilizando corrente contínua e alternada, até centenas e Hz, serão feitas. Este tipo de circuito permite o primeiro passo para a realização de transístores baseados em nanofios magnéticos e de dispositivos usando nanofios magnéticos isolados como sensores.*

## 1 Introdução

Nanofios são elementos adequados para dispositivos eletrônicos que requerem ultra-baixo consumo de energia, dados os baixos níveis de corrente e alta sensibilidade que normalmente apresentam [1]. Eles permitem ter uma baixa potência de operação dos dispositivos eletrônicos, limitando assim a dissipação térmica, enquanto a morfologia deles permite obter uma grande sensibilidade ao meio externo [1,2]. Neste sentido, nanofios metálicos são ativamente investigados para a fabricação de sensores, interconexões de banda larga (broadband interconnects) e transístores de efeito de campo (field effect transistors, FET). A maior vantagem de usar materiais magnéticos para os nanofios é a possibilidade de obter uma resposta elétrica (fácil para medir) de um ambiente magnético, por exemplo, para o desenvolvimento de

sensores de campo magnético. Do ponto de vista físico, o estudo das propriedades de materiais magnéticos com baixa dimensionalidade é facilitado por a morfologia de nanofios. Ambas caracterizações CC e CA são necessárias para otimização dos dispositivos [3]. No entanto, um desafio principal em tais dispositivos é ainda a manipulação adequada dos nanofios em direção dos eletrodos. Técnicas como a litografia por feixe de elétrons, feixe de íons focalizados e manipulação de microscopia de força atômica já foram testadas com sucesso, mas são limitados a uma baixa taxa de produção [2]. Aqui, apresentamos uma variação promissora para um FET baseado em nanofios usando nanofios metálicos e ferromagnéticos, uma vez que as suas correntes de baixo nível pode ser controladas por meio de campos magnéticos. Além disso, com o objetivo de alcançar maior taxa de produção, os nanofios são manipulados e depositados sobre eletrodos através da técnica de dieletroforese (DEP). Esta técnica permite um manuseamento de baixo custo de nanoentidades metálicas suspensas em solução dielétrica por meio da aplicação de um campo elétrico alternado [4-7]. As cargas induzidas nos nanoelementos criam uma força elétrica chamada força de dieletroforese, o que causa o movimento do nanoelemento na solução [5]. O nosso laboratório (LMBT), em colaboração com o Centro de Componentes Semicondutores (CCS) da UNICAMP, já conseguiu fabricar grade de eletrodos de Pt, modelados por litografia óptica e processos de levantamento, que exibem um gap de  $2,5 \mu\text{m}$ . Nanofios de Ni devidamente isoladas ( $4 \mu\text{m}$  de comprimento e  $35 \text{ nm}$  de diâmetro), obtidos por electrodeposição em molde de alumina nanoporoso anodizado, foram depositados com sucesso sobre os eletrodos pela técnica DEP figura 1 [5]. Este passo é o primeiro para conseguir desenvolver circuitos complexos baseado em nanofios ferromagnéticos isolados [8].

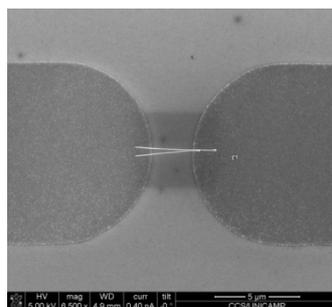


Figura 1: Nanofio de Ni depositado pela técnica de dieletroforese.

Os resultados preliminares de magnetorresistência mostram que um bom contato elétrico entre o nanofio e os eletrodos é uma questão crítica para resolver antes de realizar a caracterização de transporte. O projeto atual enfoca sobre a próxima etapa, caracterização das propriedades de transporte dos nanofios isolados. Mesmo que a maioria dos dispositivos previstos baseados em nanofios magnéticos isolados funciona com corrente alternada de alta frequência (GHz) passando neles, uma caracterização com corrente contínua precisa ser previamente realizada. Em função da temperatura, ela permite identificar possíveis problemas no circuito

(mau contato, mudança da estrutura cristalina do nanofio durante a fabricação do circuito, etc.). As medidas em função do campo magnético aplicado (magnetorresistência) informam sobre as interações entre a corrente e a magnetização do nanofio. Finalmente, medidas de transporte CA replicam as condições de funcionamento dos futuros dispositivos.

## 2 Objetivos

Medir as propriedades de transporte em corrente contínua e alternada de nanofios magnéticos de níquel isolados, em função do campo magnético aplicado.

## 3 Cronograma

- Depositar nanofios sobre os eletrodos de contato o via o método de dieletroforese.
- Familiarizar com o equipamento de medida de transporte CC (Physical Properties Measurement System, PPMS).
- Desenvolver um interface (em LabView) para automatizar as medidas de transporte CC no PPMS, usando uma fonte externa.
- Realizar e interpretar medidas de transporte CC em função do campo magnético (amplitude e direção, e da temperatura), em nanofios de níquel e outros materiais magnéticos.
- Realizar e interpretar medidas de transporte CA em função da frequência da onda eletromagnética .
- Acompanhar o acoplamento de uma fonte de campo magnético na instalação de medida de transporte CA.

## 4 Métodos

Para a realização do projeto, o aluno vai seguir a orientação da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Fanny Béron com o apoio do pesquisador do LMBT e doutorando da FEEC-Unicamp Marcos Vinícius Puydinger dos Santos para a realização da síntese de novos nanofios magnéticos, da produção de eletrodos e eletroforese dos nanofios sobre eles, e finalmente, as medidas de transporte.

### 4.1 Produção de nanofios por eletrodeposição

Moldes de alumina nanoporosa com poros entre 35 e 250 *nm* de diâmetro e 0,5 até 200  $\mu\text{m}$  de comprimento estão obtidos por anodização de um disco de alumínio. A síntese dos

nanofios de níquel é feita por eletrodeposição, usando o fundo dos pores como elétrodo. Além de nanofios uniformes em composição e em estrutura cristalina, podemos fabricar nanofios multicamadas assim que nanofios heteroestruturados. Os moldes de alumina das redes de nanofios obtidas são dissolvidos em hidróxido de sódio ( $NaOH$ ) para obter uma solução de nanofios isolados. Esta etapa é bem dominada no LMBT.

## 4.2 Produção dos eletrodos metálicos

Eletrodos (PADs) metálicos serão definidos sobre uma estrutura de  $SiO_2/Si$ . Primeiro, uma camada de 300 nm de espessura de  $SiO_2$  será crescida termicamente – em forno convencional – sobre lamina de  $Si(100)$  para criar um suporte dielétrico. Em seguida, as técnicas de litografia óptica convencional e de deposição física na fase de vapor (PVD), denominada *sputtering*, serão utilizadas para definir eletrodos da ordem de centenas de nanômetros figura 2.

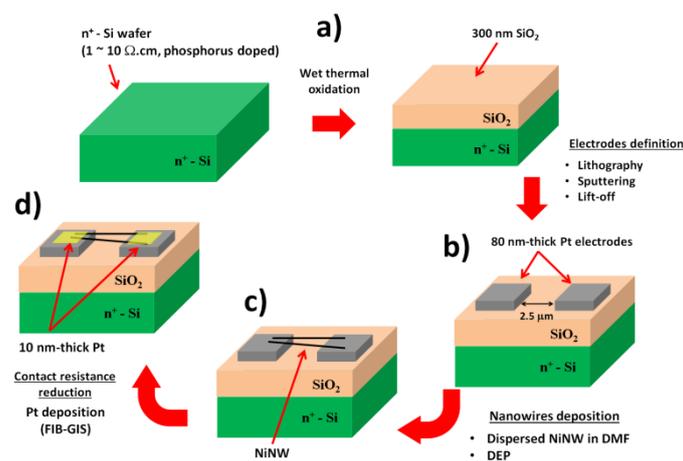


Figura 2: processo de produção do dispositivo.

## 4.3 Dieletroforese de nanofios magnéticos sobre os PADs

A técnica de dieletroforese (DEF) consiste no uso de campos elétricos alternados para mover seletivamente nanofios eletricamente neutros dispersos em um meio dielétrico (por exemplo, Dimetilformalmida, DMF) [5-7]. A eficiência dessa técnica baseia-se nas diferenças de polarização entre o nanofio e o DMF. Além disso, a forma dos eletrodos e seus efeitos de borda geram um campo elétrico não uniforme na região entre eletrodos, que é proporcional à tensão aplicada em seus terminais [5-7]. Isso gera uma força sobre os nanofios que, ao superar a força viscosa entre o nanofio e o fluido, induz um movimento preferencial em direção aos eletrodos figura 3.

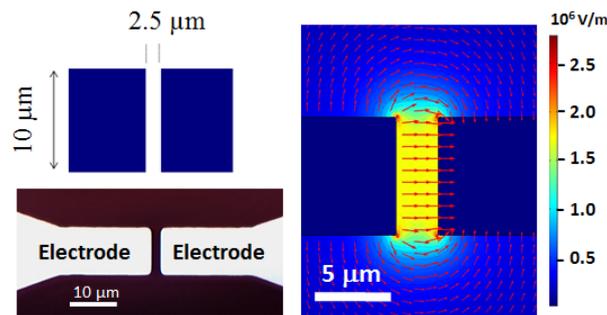


Figura 3: Simulação do campo elétrico nos eletrodos durante a dielectroforese.

#### 4.4 Medidas de transporte CC/CA

Usando a opção de medida de resistividade de um PPMS (Physical Properties Measurement System), o comportamento da resistência elétrica entre eletrodos ligados por um nanofio será investigada em função da temperatura (2-300K), da amplitude (9T) e da direção do campo magnético aplicado.

Para a realização das medidas de transporte de cargas vai ser usado técnica das quatro pontas a vantagem da técnica é a simplicidade da medida, o fato de não ser necessário um bom contato ôhmico entre o eletrodo e a amostra e dar uma medida da resistência do nanofio, em nosso caso. A técnica se caracteriza por medir a tensão que passa em duas potas num determinado momento por uma corrente aplicada no dispositivo, figura 4.

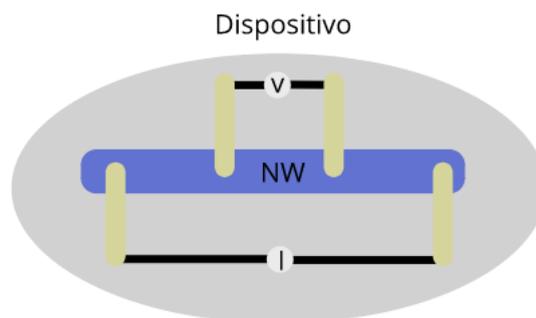


Figura 4: Medida com 4 pontas no dispositivo.

Através dessas pontas serão medidos corrente e tensão, obtendo-se o valor da resistência e por consequência calculando o valor da resistividade do nanofio, em nosso caso. Para obtenção de um valor próximo do real tem que ser incluído no calculo da resistividade a geometria da amostra. Com o uso do ambiente Labview para automatizar essas medidas, devido a grande quantidade de dados a ser coletado, com o desenvolvimento de uma interface de controle da fonte de tensão e do equipamento de PPMS para medidas a baixas temperaturas e aplicação de campo magnético na amostra para ver a sua influência sobre a resistividade do nanofio, sobre temperaturas ( $R \times T$ ) e campos magnéticos ( $R \times H$ ).

Para as medidas em CA será utilizado um *look-in*, suas vantagens em relação a medida CC são a possibilidade de verificar o comportamento do dispositivo em diferentes frequências e a eliminação de ruídos nas medidas, como ruído do tipo 1/f e ruídos de outros equipamentos, em medidas de grande sensibilidade esses cuidados devem ser tomados para a medida ter um valor bem do real. Inicialmente as medidas serão realizadas nos dois sistemas, afim de comparar os resultados e desempenhos dos dois sistemas durante a caracterização dos dispositivos. A montagem dos dispositivos é a mesma utilizada para a caracterização CC.

## Referências

- [1] J. Wu, B. Yin, F. Wu, Y. Myung, and P. Banerjee, Appl. Phys. Lett. 105, 183506 (2014).
- [2] M. Li, W. H. Li, J. Zhang, G. Alici, and W. Wen, J. Phys. D: Appl. Phys. 47, 063001 (2014).
- [3] Kichul, K., et al. (2010). A Framework for Broadband Characterization of Individual Nanowires. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 20, p. 178.
- [4] Boote, J.J, Evans, S.D. (2005). Dielectrophoretic manipulation and electrical characterization of gold nanowires. Nanotechnology, 16, p. 1500.
- [5] M. V. Puydinger dos Santos, L. P. B. Lima, R. A. Mayer, F. Béron, K. R. Pirola, and J. A. Diniz, J. Vac. Sci. Technol. B, 33, 031804 (2015).
- [6] F. S. Hamdi, O. Français, E. D. Gergam, B. L. Pioufle, Bioelectroch. 100, 27(2014).
- [7] W. Xue and P. Li., Dielectrophoretic Deposition and Alignment of Carbon Nanotubes, Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications. Dr. Siva Yellampalli (Ed.), 2011.
- [8] S. Evoy, et al. Microelectronic Engineering, 75, 31 (2004).