

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E  
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Clodoaldo Irineu Levartoski de Araujo

**FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS HÍBRIDAS PARA  
APLICAÇÃO EM TRANSISTORES DE SPIN**

Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. André Avelino Pasa.

Florianópolis  
2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária  
da  
Universidade Federal de Santa Catarina

A663e Araujo, Clodoaldo Irineu Levartoski de  
Estruturas Híbridas para Aplicação em Transistores de Spin  
[tese] / Clodoaldo Irineu Levartoski de Araujo ; orientador,  
André Avelino Pasa. - Florianópolis, SC, 2011.  
73 p.: il., grafs., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina,  
Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência e  
Engenharia de Materiais.

Inclui referências

1. Ciência dos materiais. 2. Spintrônica. 3. Transistores.  
4. Eletrodeposição. 5. Microeletrônica. 6. Nanoestruturas.  
I. Pasa, Andre Avelino. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de  
Materiais. III. Título.

CDU 620.1

Clodoaldo Irineu Levartoski de Araujo

**TÍTULO: FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS HÍBRIDAS PARA  
APLICAÇÃO EM TRANSISTORES DE SPIN**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de **Doutor** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 19 de Outubro de 2011.

---

Prof. Dr. Sc. Carlos Augusto Silva de Oliveira  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. André Avelino Pasa,  
Orientador/Presidente - Universidade Federal de Santa Catarina

---

---

Prof. Dr. Nicolas Garcia Garcia,  
Membro Externo - Consejo Superior de Investigaciones Científicas

---

Prof. Dr. Ing. Henri Ivanov Boudinov,  
Membro Externo - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Wagner Figueiredo,  
Membro - Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Alexandre Da Cas Viegas,  
Membro - Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Rer. Nat. Alexandre Iago,  
Membro - Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico esta tese a  
minha mulher Lia e ao  
meu filho Matheus



## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

- Ao Prof<sup>o</sup> André Avelino Pasa pela amizade, incentivo e apoio ao longo destes últimos 6 anos de convivência.
- Aos Velhos companheiros do LFFS, em especial aos amigos Christian, Dorico, Eric, Rafael, Renê, Vinícius e Max pelo apoio inicial.
- A participação efetiva neste trabalho de César, Silvia, Milton e Iuri e das produtivas discussões com os dois últimos durante todo este doutorado.
- Aos atuais companheiros de LFFS: Daisy, Jason, Kenia, Thaise, Marília, Kleber, Luana, Alexandre, Sabrina e Bruna pela amizade e cooperação.
- Ao Dr. Nicolas Garcia pela colaboração e medidas realizadas no CSIC em Madri, Espanha.
- Ao Dr. Leandro Lorenzelli e Vittorio Guarnieri pela orientação na Fondazione Bruno Kessler e pelo apoio do meu amigo Leonardo Biazi, na Itália. Aos integrantes do grupo BIOMEMS: Max, Cristian, Elisa, Andrea Adami, Cristina, Lara, Tindiane e Severino, aos pesquisadores Paolo Conci e Francesca e aos técnicos, Alberto, Sara e Steffano pelo apoio durante meu aprendizado em microeletrônica.
- Ao Prof<sup>o</sup> Genhua Pan pela amizade e orientação e ao Tony e Nick pelo apoio na sala limpa, durante o estágio de doutorado em Plymouth, na Inglaterra.
- Ao Prof<sup>o</sup> Sampaio e ao Harold do CBPF/LABNANO pelo auxílio na nanolitografia, ao Javier do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC, pelas imagens de microscopia eletrônica de transmissão e ao Prof<sup>o</sup> Alexandre do LCMCM pelas medidas de magnetização.
- Ao CNPQ e a Capes pelo suporte financeiro.





## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>9</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>10</b>
<b>TRABALHOS PUBLICADOS REFERENTE À TESE.....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>16</b>
<b>TRANSISTOR DE BASE METÁLICA .....</b>	<b>16</b>
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	20
<i>Eletrodeposição</i> .....	20
<i>Microfabricação</i> .....	23
RESULTADOS .....	26
<i>Base (Liga FeNi)</i> .....	26
<i>Emissor (Óxido de Cobre)</i> .....	28
<i>Tipo-n</i> .....	28
<i>Tipo-p</i> .....	31
<i>Caracterização Elétrica</i> .....	32
<i>Caracterização dos transistores</i> .....	33
<i>Curvas de Transistor</i> .....	36
<i>Tipo-N</i> .....	36
<i>Tipo-P</i> .....	37
<i>Transistor Microfabricado</i> .....	39
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	42
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	42
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>43</b>
<b>JUNÇÃO TÚNEL MAGNÉTICA .....</b>	<b>43</b>
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	45
<i>Crescimento das Multicamadas</i> .....	45
<i>Ion Milling</i> .....	47
<i>Microfabricação</i> .....	48
RESULTADOS .....	51
<i>Análise das multicamadas</i> .....	51
<i>Exchange Bias</i> .....	53
<i>Magnetorresistência Túnel</i> .....	55

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	56
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>58</b>
<b>INJEÇÃO E DETECÇÃO DE SPIN EM SILÍCIO .....</b>	<b>58</b>
ELETRODEPOSIÇÃO .....	60
<i>RESULTADOS</i> .....	60
NANOLITOGRAFIA .....	64
<i>Procedimento experimental</i> .....	64
<i>RESULTADOS</i> .....	65
<i>Caracterização magnética</i> .....	65
<i>Magnetorresistência</i> .....	66
<i>Comprimento de difusão de spin em silício</i> .....	67
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	69
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
<b>CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>72</b>

## Resumo

Dispositivos spintrônicos apresentam potencial aumento da velocidade de processamento de dados, redução do consumo de energia elétrica e aumento da densidade de integração em comparação com dispositivos convencionais, devido à adição do grau de liberdade relativo ao momento magnético do elétron (spin). Estes dispositivos são atualmente utilizados como sensores magnéticos em cabeças leitoras de discos rígidos e em memórias magnéticas de acesso randômico (MRAM). A crescente demanda por aumento do desempenho e portabilidade dos equipamentos eletrônicos, que requer o desenvolvimento de dispositivos com alta sensibilidade e dimensões reduzidas, torna a spintrônica uma linha de pesquisa amplamente investigada. A possível utilização de dispositivos spintrônicos em dispositivos laterais com canal de spin em um semicondutor controlado por voltagem de *gate*, nos chamados transistores de spin por efeito de campo (SPINFET), torna os dispositivos spintrônicos prováveis candidatos à superação das limitações da eletrônica convencional. Nesta tese de doutorado são realizados fabricação e estudo de estruturas híbridas para aplicação em transistores de spin com técnicas compatíveis para obtenção de dispositivos com alto desempenho, produção em larga escala e compatibilidade com a aplicação na indústria. O desempenho como sensor magnético de transistores de base metálica crescidos por eletrodeposição foi investigado e a compatibilidade de sua microfabricação com as técnicas utilizadas na indústria microeletrônica testada em um estágio de doutorado na Fondazione Bruno Kessler na Itália. Em um segundo estágio de doutorado realizado na Universidade de Plymouth na Inglaterra, foi desenvolvida a microfabricação de junção túnel magnética com tunelamento coerente, necessário para obtenção de altos valores de magnetorresistência e aumento da sensibilidade dos sensores. A injeção e detecção de spin em silício são investigadas em dispositivos laterais obtidos por nanofabricação. Os dados obtidos mostram uma alta polarização de spin no silício e a medida direta do comprimento de difusão de spin sugere o comprimento de coerência necessário na fabricação destes dispositivos.

## **Abstract**

Spintronic devices have potential to increase data processing speed, decrease power consumption and increase integration density compared to conventional devices, due to the degree of freedom addition associated with the electron's magnetic moment (spin). These devices are currently used as magnetic sensors in hard disk read heads and magnetic random access memories (MRAM). The growing demand for increased performance and portability of electronic equipment, which requires the development of devices with high sensitivity and small size, makes spintronics a widely investigated area of research. The possible application of spintronic devices in a side-channel device with spin in the semiconductor channel controlled by a gate voltage, in a so-called spin transistors field effect (SPINFET), turns spintronic devices as likely candidates to overcome the limitations of conventional electronics. In this thesis are performed fabrication and study of hybrid structures for application in spin transistors, compatible with techniques to obtain devices with high performance, large-scale production and application in the industry. The performance as a magnetic sensor of metal base transistors grown by electrodeposition was investigated and their compatibility with microfabrication techniques was tested in a stage at the Fondazione Bruno Kessler in Italy. In a second stage at the University of Plymouth in England, a magnetic tunnel junction with coherent tunneling, necessary for obtaining high values of magnetoresistance and increased sensitivity of the sensors was developed. The injection and spin detection in silicon are investigated in lateral devices obtained by nanofabrication. The data show a high spin polarization in silicon and direct measurement of the spin diffusion length suggests the coherence length required in the manufacture of these devices.

## **Trabalhos Publicados referente à tese**

- S. Pelegrini, C. I. L. de Araujo, R. C. da Silva, A. C. Viegas, A. A. Pasa, Electrical Characterization of Cu<sub>2</sub>O n-type Doped with Chlorine., ECS transactions, v. 31, p. 143-148, 2010.
- A. Ballestar, C. I. L. de Araujo, R. G. Delatorre, A. A. Pasa, N. Garcia, Measuring Magnetoresistance in a 2D Intergranular Magnetic-Semiconducting Material., Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, v. 22, p. 737-748, 2009.
- I. S. Brandt, C. I. L. de Araujo, V. Stenger, R. G. Delatorre, A. A. Pasa, Electrical Characterization of Cu/Cu<sub>2</sub>O Electrodeposited Contacts. ECS Transaction, v. 14, p. 413-419, 2008.



## Introdução

Em 1932, Mott propôs que a condução elétrica em materiais ferromagnéticos ocorre por meio de duas correntes paralelas de spin majoritárias e minoritárias [1], este modelo foi posteriormente utilizado por Fert e Campbell em 1968 [2], no estudo da variação da resistividade em ligas ferromagnéticas. Em 1988, grupos chefiados por P. Grunberg [3] na Alemanha e A. Fert [4] na França realizaram estudos simultâneos do acoplamento antiferromagnético em multicamadas Fe/Cr e mediram grandes alterações na resistência das multicamadas em função do campo magnético aplicado. A orientação ferromagnética (paralela) das multicamadas imposta pelo campo magnético aplicado diminui a resistência aos elétrons com spins majoritários no transporte através das multicamadas, enquanto que no alinhamento antiferromagnético (antiparalelo) ou randômico a campo zero, dependendo da espessura do espaçador não magnético, elétrons de spin majoritário e minoritário são espalhados pelas sucessivas camadas ferromagnéticas. O efeito denominado magnetoresistência gigante (GMR) ocorre basicamente pela injeção de corrente spin polarizada do material ferromagnético em material não magnético, transporte eletrônico com baixa inversão de spin no material não magnético e detecção da corrente polarizada em um segundo material ferromagnético. As arquiteturas denominadas válvula de spin [5], têm apenas duas camadas ferromagnéticas separadas por um espaçador não magnético. Uma das camadas ferromagnéticas permanece livre a ação de campo magnético externo e a outra tem magnetização fixada pela redução da sua espessura, utilização de materiais de alto campo coercivo ou pelo acoplamento com uma camada antiferromagnética. A eficiência das válvulas de spin possibilitou seu emprego em sensores magnéticos e o início da magnetoeletrônica ou spintrônica. Os dispositivos baseados na GMR, utilizados em cabeças leitoras de discos rígidos (Figura I), operam na configuração de corrente paralela ao plano das multicamadas (*CIP-Current in Plane*). Dispositivos que operam na configuração de corrente perpendicular às multicamadas (*CPP-Current Perpendicular to Plane*), são mais atrativos devido aos valores de GMR 20% maiores que na CIP, mas as dificuldades na fabricação e os baixos sinais em dispositivos finais [6] têm impossibilitado sua aplicação na indústria.

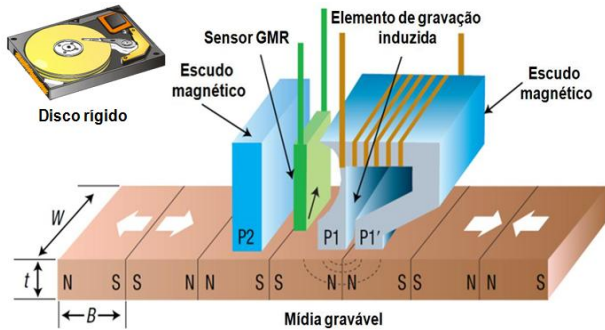


Figura I -Modelo de cabeça leitora presente em discos rígidos de computadores, retirado da ref. 6.

Dentre as pesquisas realizadas para o desenvolvimento de dispositivos verticais baseados na GMR-CPP destacam-se os Transistores de Base Metálica (TBM) e as Junções Túnel Magnéticas (JTM). Nos TBMs os elétrons balísticos injetados no emissor, com energias acima do nível de Fermi do metal, são polarizados em spin na base magnética e sua detecção no coletor é dependente do campo magnético aplicado. A utilização de válvulas de spin nestes transistores pode levar a uma variação relativa de até 1000% na corrente de coletor [7], no entanto o processo de fabricação convencional destes dispositivos, com necessidade de ultra alto vácuo, impossibilita sua produção em larga escala. Nesta tese de doutorado será apresentado um processo alternativo compatível com a aplicação na indústria.

Nas JTMs, uma camada de óxido suficientemente fina é utilizada como material não magnético na válvula de spin. A alta polarização da corrente túnel leva a magnetorresistências de até 70% em dispositivos comerciais com camada túnel de alumina amorfa. Estudos recentes apontam para a substituição da alumina por MgO cristalino, que pode alcançar valores de  $MR=1000\%$  [8] quando crescida em substrato cristalino. O desenvolvimento de JTM com MgO cristalino sobre substrato amorfo é uma necessidade para adequação destas estruturas com as estruturas de fixação magnética extensamente desenvolvidas e aplicadas na indústria.

Dispositivos spintrônicos são também desenvolvidos para atuarem como dispositivos lógicos a partir da proposição de um dispositivo de interferência com precessão de spin controlado por *gate*, feita por Data e Das [9]. Um modelo do dispositivo proposto é mostrado na Figura II.



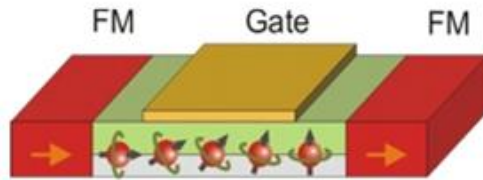


Figura II - Modelo do transistor spintrônico por efeito de campo (SPINFET), proposto por Datta e Das.

Os dispositivos spintrônicos, com semicondutor utilizado como material não magnético, são apontados como prováveis sucessores da tecnologia CMOS. Altas injeções e detecções de spin no semicondutor e medida do comprimento de coerência mínimo nos dispositivos spintrônicos são etapas a serem realizadas para obtenção do transistor spintrônico por efeito de campo (SPINFET). O comprimento de coerência está diretamente ligado ao comprimento de difusão de spin  $L_{sd}$  do material, que é a distância percorrida pelo elétron sem inversão e perda da informação contida no spin.

Nesta tese de doutorado, serão estudados os mecanismos de transporte elétrico em TBMs compostos por estruturas magnetorresistivas e eletrodepósitos de  $Cu_2O$  com alta densidade de portadores, utilizados como base e emissor respectivamente. Serão apresentadas medidas de ganho em configuração base-comum e emissor-comum em função de campo magnético aplicado e temperatura. Também serão apresentadas etapas de eletrodeposição e microfabricação do transistor, testadas em um estágio de doutorado realizado na Fondazione Bruno Kessler, em Trento na Itália, e procedimentos de microfabricação, caracterização magnética e medidas magnetorresistivas de junções túnel magnéticas com  $MgO$  cristalino, crescidas por “*sputtering*” em um segundo estágio de doutorado realizado em Plymouth na Inglaterra. A injeção e detecção de spin em silício será estudada em aglomerados  $FeNi$  obtidos por eletrodeposição e em dispositivos laterais fabricados por técnica de nanolitografia na estrutura  $Ni/Si/Ni$ . Neste último será obtido o comprimento de difusão de spin do silício através de medidas magnetorresistivas locais em dispositivos com diferentes distâncias entre os eletrodos.

# Capítulo 1

## Transistor de Base Metálica

O princípio fundamental do transistor de base metálica (TBM), um dispositivo com três eletrodos estruturados na forma de filmes finos com um metal na base e dois semicondutores como emissor e coletor, foi desenvolvido em 1960 [10,12]. No contato entre metal e semicondutor, elétrons do semicondutor perdem energia fluindo da banda de condução do semicondutor para o metal. O acúmulo de cargas fixas na interface causa a deformação da estrutura de bandas da Figura 1.1. Esta deformação continua até que os níveis de Fermi se igualem em energia. A deformação da estrutura de bandas forma uma barreira de potencial chamada barreira Schottky, que no caso ideal é igual à diferença entre as funções trabalho do semicondutor e do metal,  $\phi_M - \phi_S$ . O TBM é composto por duas barreiras Schottky nas interfaces entre o metal da base e os semicondutores do emissor e do coletor. Em modo normal de funcionamento a junção base-emissor tem polarização direta e a junção base-coletor, polarização reversa.

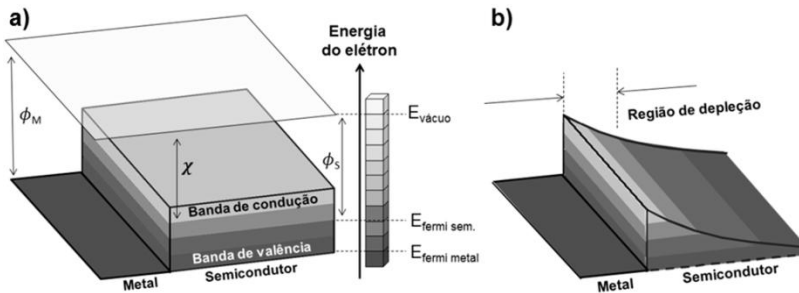


Fig. 1.1 – Estrutura de bandas na interface metal/semicondutor, onde  $\chi$  é afinidade eletrônica, energia necessária para levar um elétron do nível de energia mínimo

da banda de condução  $E_C$  até o nível de vácuo  $E_V$ ,  $\phi_S$  é a função trabalho do semicondutor e  $\phi_M$  a do metal.

Os portadores “quentes” injetados por emissão termiônica com energia de 1eV acima do nível de Fermi do metal, na polarização direta da barreira Schottky da interface emissor-base metálica, podem ser transferidos balisticamente do emissor ao coletor, incorporando-se na

corrente reversa da junção base/coletor. Parte dos portadores é coletada pela polarização reversa da barreira Schottky entre a base metálica e o coletor e parte é drenada pela base. Um diagrama de energias do TBM é mostrado na Figura 1.2.

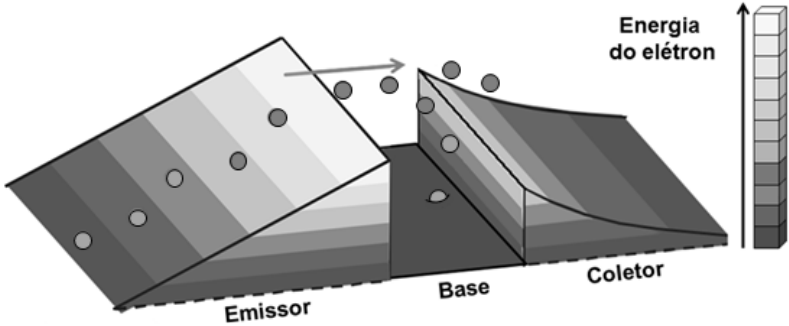


Fig. 1.2 – Diagrama de bandas de energia do dispositivo transistor SMS e ilustração da dinâmica dos portadores.

O ganho de corrente na configuração base-comum neste dispositivo é controlado, segundo Crowell and Sze [13], pelas interações entre elétrons e fônons que alteram a eficiência  $\alpha_C$  do coletor, pelo coeficiente de transmissão  $\alpha_Q$  que depende das reflexões quantum-mecânicas dos portadores no potencial descontínuo da interface base-coletor e pela eficiência do transporte na base metálica  $\alpha_B$ , dada por,

$$\alpha_B = e^{\left(\frac{-L_B}{\lambda_B}\right)} \quad 1$$

, onde  $\lambda_B$  é o livre caminho médio balístico do metal e  $L_B$  a espessura da base. Desta forma, o ganho de corrente  $\alpha$  na configuração base-comum em um TBM é definido pela expressão:

$$\alpha = \alpha_B \cdot \alpha_C \cdot \alpha_Q = \frac{J_C}{J_E} \quad 2$$

Onde  $J_C$  e  $J_E$  são respectivamente as densidades de corrente no coletor e no emissor. Se o ganho observado em base-comum (Figura 1.3a) se aproximar de 1, serão observadas altas ampliações de corrente na configuração emissor-comum (Figura 1.3b).

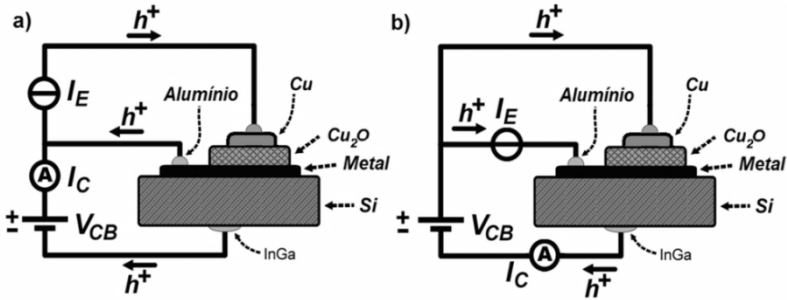


Fig. 1.3 - Circuito para medida de transistor em (a) Base-comum e (b) Emissor comum.

O ganho de corrente  $\beta$  na configuração de emissor comum é definido pela Equação 3, onde  $J_B$  é a densidade de corrente injetada pela fonte de corrente na base.

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{J_C}{J_B} \quad 3$$

Os TBMs têm funcionamento semelhante ao do transistor bipolar de junção, mas baixas eficiências medidas, por volta de 0.3, atribuídas a altas reflexões quantum-mecânicas entre a base e o coletor e a dificuldade na obtenção de camadas semicondutoras crescidas com boa qualidade em substratos metálicos, levaram a baixas ampliações e conseqüente pequeno interesse comercial e tecnológico por estes dispositivos no passado [14]. Atualmente os TBMs têm sido amplamente estudados pela sua aplicação como transistores de base metálica com corrente polarizada em spin na base. Um exemplo desta utilização é mostrado na figura 1.4 retirada da ref. 15. Na orientação antiparalela da magnetização das camadas ferromagnéticas empregadas na base do transistor, a maioria dos elétrons de spin majoritários e minoritários injetados pelo emissor na base sofre espalhamentos nas camadas ferromagnéticas e não tem energia suficiente para transpor a barreira Schottky da interface base-coletor, portanto a corrente de coletor é pequena. Na orientação paralela os spins majoritários não são espalhados nas camadas ferromagnéticas e a corrente de coletor é maior.

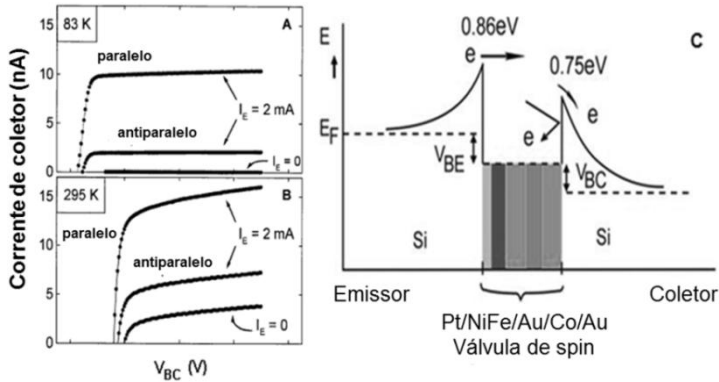


Fig. 1.4 – a) Curvas em base comum para o transistor da referência 15 em função do campo magnético a 83K, b) a 295K e c) Diagrama esquemático dos níveis de energia do Transistor.

A necessidade de alto vácuo na técnica de *vacuum bonding* utilizada na fabricação do transistor com válvula de spin (TVS) apresentado acima, que consiste na soldagem de uma das lâminas de silício a outra lâmina de silício já com as estruturas metálicas previamente depositadas na superfície, é uma desvantagem apresentada para a fabricação deste dispositivo.

Um processo alternativo para fabricação de TBM's, baseado em técnicas de eletrodeposição, foi proposto em trabalhos prévios realizados no Laboratório de Filmes Finos e Superfícies. O dispositivo  $Cu_2O/Co/silício-p$  eletrodepositado [16], com magnetocorrente de 40% em baixas correntes de emissor e um dispositivo combinando materiais orgânicos e inorgânicos com multicamadas  $Co/Cu/Co$  eletrodepositadas [17], apresentando aumentos no ganho de corrente na configuração base-comum na presença de campos magnéticos aplicados, mostraram a possibilidade da obtenção de TVS's com a técnica de eletrodeposição.

Óxidos podem apresentar caráter isolante ou semicondutor e vêm sendo utilizados em microeletrônica desde a primeira parte do século passado, quando teorias dos semicondutores [18,20] e dispositivos retificadores [21] foram desenvolvidas tendo como base o óxido de metal de transição  $Cu_2O$ . Posteriormente na década de 60, o óxido de cobre foi substituído por silício em grande parte dos dispositivos devido a possibilidade de oxidação de sua superfície e formação de  $SiO_2$ , utilizado como barreira para difusão química durante a fabricação de dispositivos e passivação da superfície para aplicações elétricas. O óxido de cobre continuou a ser aplicado em dispositivos optoeletrônicos,

devido ao seu alto coeficiente de absorção na região do visível [22]. De estrutura cúbica e gap direto de 2.1 eV [23], tem caráter semiconductor do tipo-p com mobilidade de buracos [24] atribuído a existência de vacâncias de cobre que introduzem um nível aceitador de 0.3V acima da banda de valência [25]. A alta resistividade de  $\text{Cu}_2\text{O}$ , na ordem de  $10^9$ - $10^{12}$   $\Omega\cdot\text{cm}$ , não ideal para dispositivos com alto desempenho, pode ser diminuída através de inserção de dopantes no lugar das vacâncias na rede cristalina. Dados da literatura apontam para reduções da ordem de 12  $\Omega\cdot\text{cm}$  em  $\text{Cu}_2\text{O}$  tipo-p dopado com Si [26] e de 7  $\Omega\cdot\text{cm}$  em  $\text{Cu}_2\text{O}$  tipo-n dopado com Cl [27]. A possibilidade de crescimento epitaxial de filmes finos de  $\text{Cu}_2\text{O}$  de boa qualidade com técnicas presentes na indústria tem promovido um resgate do desenvolvimento de dispositivos baseados em óxidos de metais de transição como transistores de base metálica [28] e transistores de efeito de campo [29].

Na primeira parte deste capítulo da tese de doutorado, são estudados os mecanismos de transporte em transistores compostos por bases ferromagnéticas e emissores de  $\text{Cu}_2\text{O}$  com alta densidade de portadores de carga do tipo n e p, ambos obtidos por eletrodeposição. Serão apresentadas medidas de ganho em configuração base-comum e emissor-comum em função de campo magnético aplicado. Na segunda parte do capítulo serão apresentadas etapas de microfabricação do transistor testadas em um estágio de doutorado realizado na Fondazione Bruno Kessler, em Trento, na Itália.

## **Procedimentos Experimentais**

### **Eletrodeposição**

As estruturas utilizadas nos transistores estudados neste capítulo foram obtidas pela técnica de eletrodeposição. Os eletrodepósitos são formados pela ação de correntes elétricas e iônicas em uma célula eletroquímica composta por dois eletrodos condutores ou semicondutores mergulhados em um eletrólito. Para reações de redução de íons com formação de depósitos, o cátodo possui polarização negativa e é chamado de eletrodo de trabalho. O ânodo, necessário para fechar o circuito elétrico, é chamado contra-eletrodo e nele ocorrem reações de oxidação. O eletrólito é uma solução aquosa contendo íons positivos e negativos provenientes da dissociação de sais metálicos. A corrente elétrica que

flui entre os eletrodos na presença de uma voltagem externa ocorre pela difusão ou migração das espécies carregadas existentes no eletrólito. Já na superfície dos eletrodos, o mecanismo de condução pode mudar de iônico para elétrico em processos na interface mediados por reações eletroquímicas que promovem a oxidação ou redução dos íons. As reações mais importantes para a eletrodeposição são as que ocorrem no eletrodo de trabalho, como por exemplo, a reação  $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^0$ , onde íons metálicos de ferro são reduzidos com o recebimento de dois elétrons doados pelo eletrodo de trabalho. No contra-eleto-rodo a reação mais provável para um eletrodo inerte em meio aquoso é a eletrólise da água, formando  $\text{H}^+$  e  $\text{O}_2$  através da reação  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H} + \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^-$ . Esta reação ocorre com a doação de elétrons para o contra-eleto-rodo e fecha o circuito da célula eletroquímica. Se o contra-eleto-rodo for constituído de barra metálica não inerte, a eletro dissolução do metal pode gerar íons para a solução e elétrons para o contra-eleto-rodo.

Em eletrólitos bons condutores elétricos, todo o potencial aplicado na célula aparece próximo aos eletrodos, onde é formada uma região carregada chamada de dupla camada. A medida da queda de potencial nestas regiões carregadas é realizada com o auxílio de um eletrodo de referência. Os mais comumente usados são os eletrodos de calomelano  $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  e prata/cloroeto de prata  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ . Com a presença do eletrodo de referência, o potencial em cada eletrodo pode ser medido isoladamente. A Figura 1.5 mostra a configuração da célula eletroquímica com eletrodo de referência próximo ao eletrodo de trabalho ligado a um potenciostato e as etapas de preparação do eletrodo de trabalho.

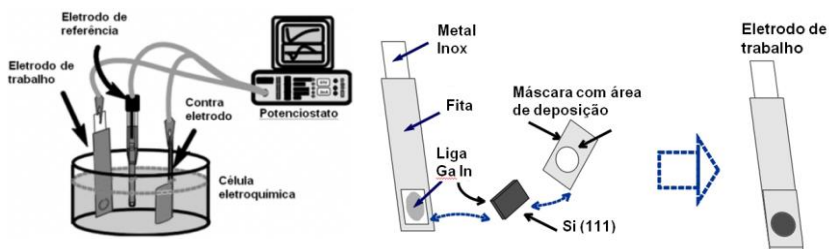


Fig. 1.5 – Célula eletroquímica utilizada e etapas de preparação do eletrodo de trabalho.

O potenciostato é um equipamento eletrônico que mantém constante a diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência, controlando a diferença de potencial entre o eletrodo de

trabalho e o contra-eletródo. O modo de deposição com potencial constante é chamado potenciostático. A célula eletroquímica utilizada contém um eletródo de referência de calomelano ( $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), um contra-eletródo de platina e um eletródo de trabalho, onde é colocado o substrato de silício com área de  $1 \text{ cm}^2$ . No silício tipo-p, a eletrodeposição é foto-assistida por lâmpada de 100W. Onde os elétrons necessários para a redução dos íons na superfície do silício são excitados da banda de valência para a banda de condução, com a absorção de fótons de energia maior do que a do *gap* do silício.

Inicialmente é feita a limpeza do substrato com água deionizada e com um mergulho de 20 segundos em uma solução com 5% de HF (ácido fluorídrico) diluído em água deionizada. Em uma haste metálica inoxidável é colocado o substrato, a parte rugosa do silício (costas da lâmina) é pintada com uma liga de Ga-In para a obtenção de um contato ôhmico entre o silício e a haste inoxidável. A haste e o substrato são envolvidos por uma fita de dupla face, que foi previamente furada com um vazador de área igual a  $0.5 \text{ cm}^2$ . Nesta área livre sobre a parte lisa do silício (frente da lâmina) é onde será realizada a eletrodeposição. Os diferentes eletrólitos utilizados no trabalho são apresentados na Tabela 1.

	Eletrólito	Material depositado	Ref
1	0,7 M $\text{NiSO}_4$ + 0,03M $\text{FeSO}_4$ + 0,02M $\text{NiCl}_2$ + 0,016 M sacarina + 0,4M $\text{H}_3\text{BO}_3$	FeNi	[30]
2	3M $\text{CuSO}_4$ + 4M $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ + 4M $\text{NaOH}$ + 0,3 M $\text{CuCl}$ em PH=8.5	$\text{Cu}_2\text{O}$ tipo-n dopado com Cl	[27]
3	0,6 M $\text{CuSO}_4$ + 1.8 M $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ + 5 M $\text{NaOH}$ com PH=12	$\text{Cu}_2\text{O}$ intrinsecamente dopado tipo-p	[31]
4	0,4 M $\text{CuSO}_4$ + 3M $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ + 0,015M $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3$ com pH = 9	$\text{Cu}_2\text{O}$ tipo-p dopado com Bi	

Tabela 1 – Eletrólitos utilizados na tese de doutorado.

O equipamento utilizado para controle da eletrodeposição e voltametria cíclica é o Potenciostato Autolab PGSTAT30, mostrado na figura 1.6. O software utilizado é o GPES.





Fig. 1.6 – Potenciostato Autolab GSTAT30

## Microfabricação

Durante o estágio de doutorado no exterior realizado na Fondazione Bruno Kessler em Trento/Itália, sob a supervisão do Dr. Leandro Lorenzelli, foi estudada a viabilidade da microfabricação do transistor de base metálica com processos presentes na indústria. As máscaras plásticas utilizadas no processo, desenvolvidas com o software L-edit 13 e fabricadas pela CAD/Art Services, e um esquema do TBM microfabricado são mostradas na Figura 1.7.

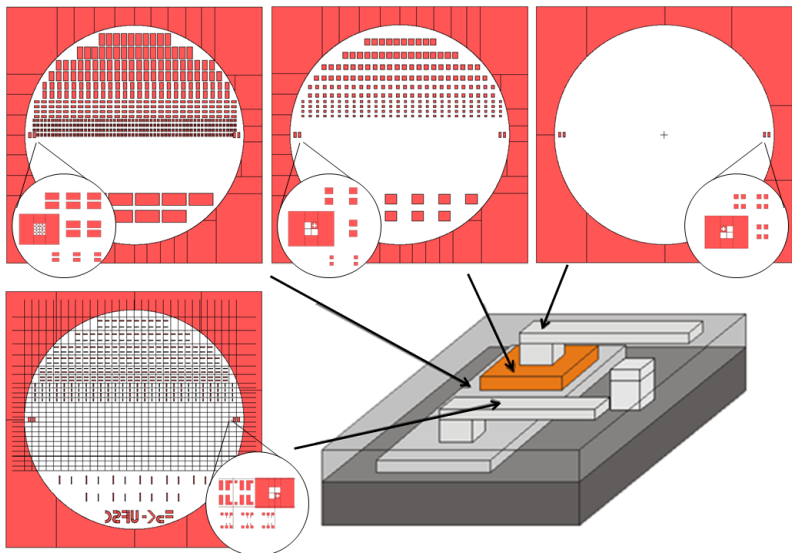


Fig. 1.7 – *Layout* das máscaras utilizadas na fabricação e esquema do TBM.

A microfabricação do TBM no modo *bottom up* foi realizada em salas limpas classe 10 (limpeza e litografia) e classe 100 (eletrodeposição e evaporação), a classificação das salas limpas é dada pelo número de partículas  $\leq 0.5\mu\text{m}$  por pés ao cubo. Antes da microfabricação, um projeto foi realizado com delineamento de todas as técnicas, produtos e equipamentos que deveriam ser utilizados no processo. Inicialmente as lâminas de silício tipo n de  $500\ \mu\text{m}$  com resistividade  $1\text{-}30\ \Omega\cdot\text{cm}$  foram submetidas a limpeza RCA na estação de limpeza mostrada na Figura 1.8.

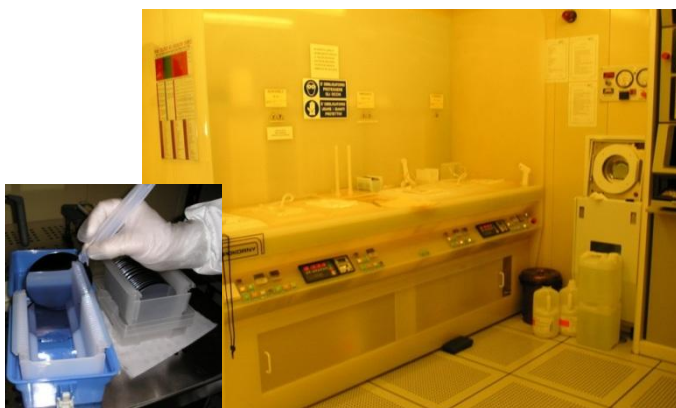


Fig. 1.8 – Estação de limpeza RCA na sala limpa classe 10 e lâminas de silício utilizadas (figura inserida).

A limpeza RCA foi desenvolvida por Werner Kern enquanto trabalhava na Radio Corporation of America (RCA), no ano de 1965 e consiste nos três banhos descritos abaixo:

- ✓ Solução 1:1:5 de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (hidróxido de amônia) +  $\text{H}_2\text{O}_2$  (peróxido de hidrogênio) +  $\text{H}_2\text{O}$  (água) a  $75 - 80\ ^\circ\text{C}$  por 10 minutos. Este banho resulta na formação de aproximadamente  $1\text{nm}$  de dióxido de silício na superfície da lâmina.
- ✓ O Segundo passo consiste em imersão da lamina em solução 1:50 de  $\text{HF}$  (ácido fluorídrico) +  $\text{H}_2\text{O}$  a  $25\ ^\circ\text{C}$ , para remoção da camada de óxido e contaminantes.
- ✓ O terceiro passo é realizado com uma solução de 1:1:6 de  $\text{HCl}$  +  $\text{H}_2\text{O}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$  a  $75 - 80\ ^\circ\text{C}$ . Este tratamento é utilizado na remoção de todos os contaminantes metálicos.

Após a limpeza inicial, as lâminas foram levadas ao *spin coater* automático da Figura 1.9a onde foram cobertas pelo fotorresiste negativo ma-N1420. Após exposição na alinhadora de máscara da Figura 1.9b, o fotorresiste negativo foi revelado em duplo banho (Figura 1.9c) no revelador ma-D533S por 1,5 min + 0,5 min.

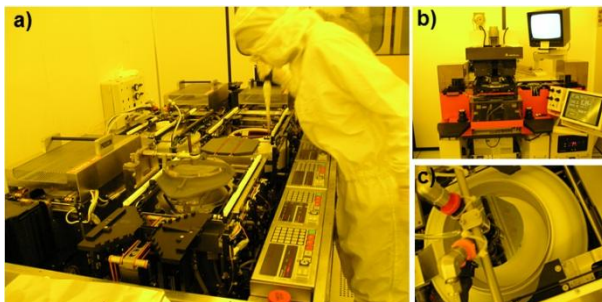


Fig. 1.9 – a) *Spin coater* automática com prato quente para secagem do substrato, deposição e revelação do fotorresiste e prato quente para cozimento do fotorresiste, em linha. b) Alinhadora de máscaras e c) revelação do fotorresiste.

Após um *soft bake* a 180°C por 1min para evaporação do solvente presente no fotorresiste, uma exposição em plasma de oxigênio foi realizado para uma melhor definição das bordas do fotorresiste nas áreas expostas. Antes da inserção das lâminas na câmara da evaporadora (Figura 1.10) para deposição da base metálica do transistor e do contato de alumínio na parte traseira das lâminas, para contato elétrico com o silício, um banho de 20s em HF 5% foi realizado para remoção do óxido de silício nativo.

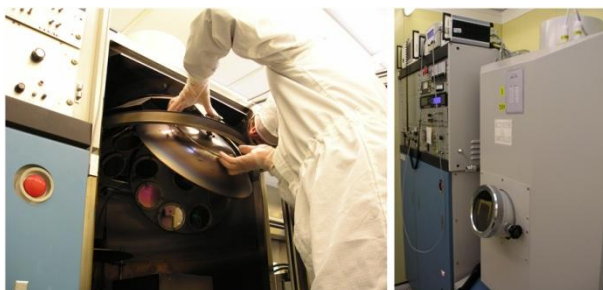


Fig. 1.10- Evaporadora utilizada no crescimento das bases, camada isolante e contatos elétricos do transistor.

Após a remoção do fotorresiste e delimitação das estruturas em banho de acetona a 65°C agitado por ultrassom (*lift-off*), o segundo passo litográfico foi realizado de acordo com os procedimentos descritos anteriormente para delimitar a região de deposição do óxido de cobre. A eletrodeposição em lâmina de silício foi realizada com o *setup* mostrado na Figura 1.11.

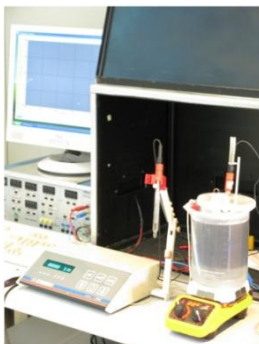


Fig. 1.11 – Setup utilizado na eletrodeposição de óxido de cobre em lâminas de silício litografadas.

Outros dois passos litográficos foram realizados para evaporação da camada isolante e dos contatos elétricos utilizados na medida do transistor.

## Resultados

### Base (Liga FeNi)

Os voltamogramas realizados com o eletrólito 1 em substrato de silício tipo n e tipo p em taxa de varredura de 20mV/s, são mostrados na Figura 1.12. No Si-n o potencial catódico mínimo para redução dos reagentes Fe e Ni é de -1V. Para potenciais mais negativos, a diminuição da concentração de reagentes na superfície do silício causa um aumento do gradiente de concentração e da corrente. Quando a concentração de reagentes na interface se aproxima de zero em -1,75V, um pico de redução é observado. Após -1,75V a corrente e o gradiente de concentração diminuem devida a difusão de reagentes para a superfície do eletrodo. No Si-p a redução se inicia em -0,45V.

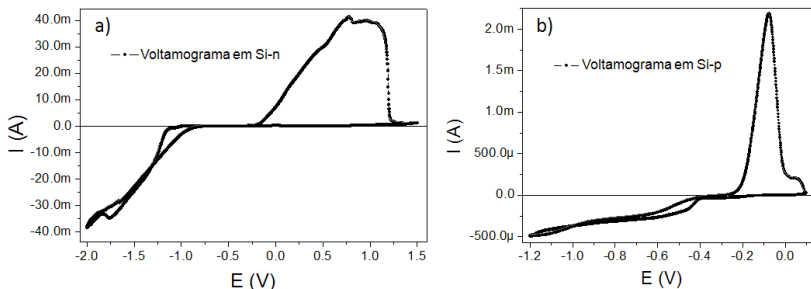


Fig. 1.12 – a) Voltamograma em substrato Si-n e b) substrato Si-p.

Da análise dos voltamogramas foram escolhidas as correntes utilizadas nas deposições em corrente constante (modo galvanostático) da liga FeNi aplicada nas bases dos transistores. Os transientes de deposição apresentados na Figura 1.13a mostram a reprodutibilidade dos depósitos. A curva da Figura 1.13b obtida na deposição em Si-p, foi foto-assistida por lâmpada de 100W.

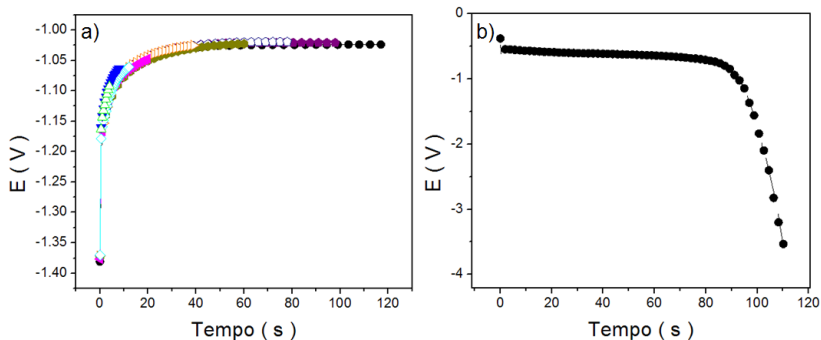


Fig. 1.13 – a) Transientes de potencial em substrato Si-n com corrente constante de 3.4 mA e b) substrato Si-p com corrente constante de 0.34 mA.

O mecanismo de crescimento dos filmes, com formação inicial de aglomerados que se conectam formando filmes finos fechados, é observado nas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das ligas FeNi sobre silício tipo n da Figura 1.14. Da intersecção das retas assintóticas dos extremos da curva de percolação elétrica inserida na figura é retirado o tempo de deposição onde os aglomerados começam a se conectar. O estudo de percolação dos filmes FeNi

eletrodepositados foi realizado pelo aluno de doutorado durante o mestrado.

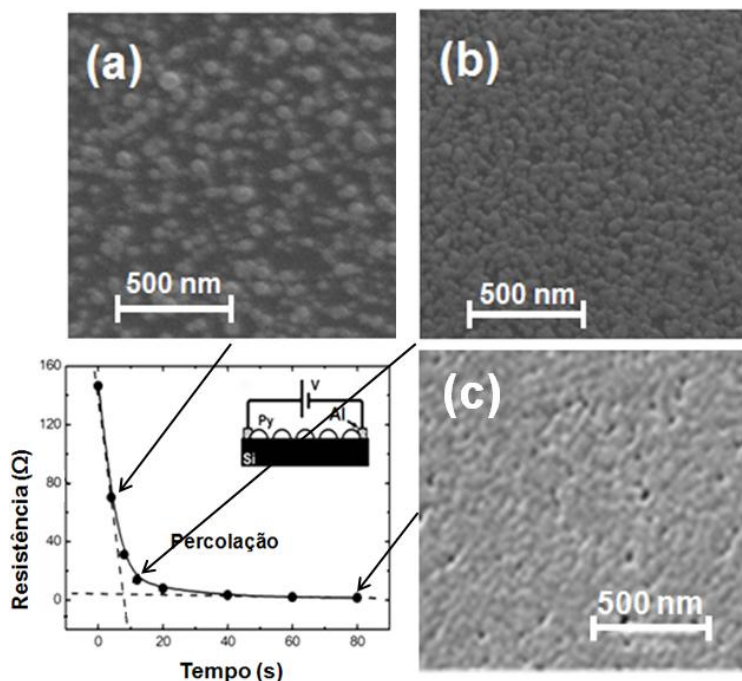


Fig. 1.14 – a) imagem da amostra obtida com 4s de deposição mostra os aglomerados não percolados, b) 12s de deposição logo após a percolação e c) filme praticamente fechado com 80s de deposição.

## Emissor (Óxido de Cobre)

### Tipo-n

A eletrodeposição do óxido de cobre dopado com Cl para obtenção do semiconductor tipo-n foi realizada com o eletrólito 2. A adição controlada de 5.0 M de NaOH foi utilizada para controle do pH da solução em 8.5. O voltamograma obtido sobre a base FeNi e o transiente de deposição em potencial constante (deposição potenciostática) de -250mV em relação ao eletrodo de Ag/AgCl saturado com 3M KCl, são mostrados na Figura 1.15. A redução do Cu com formação do  $\text{Cu}_2\text{O}$

dopado com Cl tem início no potencial de  $-0,25\text{V}$ , com pico de redução em  $-0,3\text{V}$ . O segundo pico de redução em  $-1\text{V}$  ocorre devido a redução e formação de filme metálico de Cu.

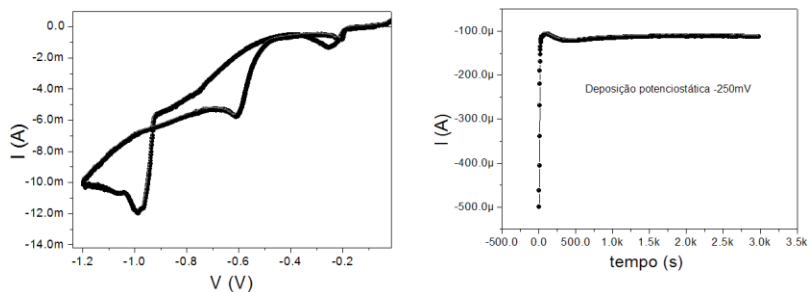


Fig. 1.15 – a) Voltamograma e b) transiente de deposição em substrato FeNi.

O espectro da Difração de Raio-X da Figura 1.16, realizado em filme de óxido de cobre com  $500\text{nm}$  de espessura depositado em potencial de  $-0.2\text{V}$  vs SCE sobre Au, apresenta picos característicos do  $\text{Cu}_2\text{O}_2$  policristalino e nenhuma formação de fase para o Cl.

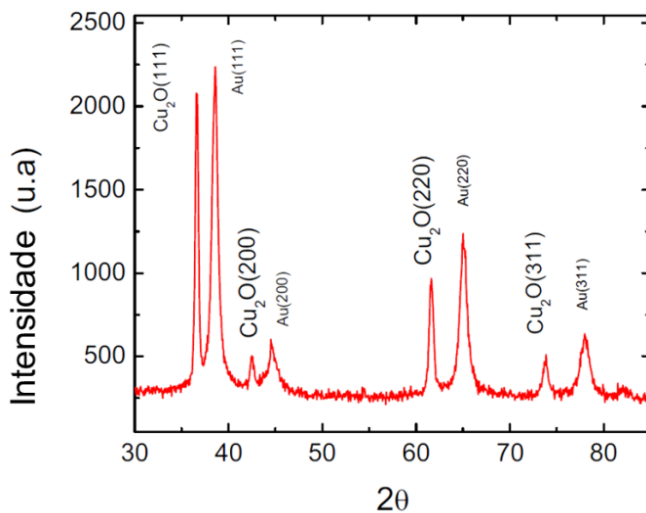


Fig. 1.16 – Espectro obtido por difração de raio-x em filme  $\text{Cu}_2\text{O-Cl}$  de  $500\text{nm}$ .

Imagem obtida por MEV do filme de 500nm de óxido de cobre dopado com Cl, eletrodepositado com a solução 2 a potencial constante de -0,2V, mostrada na Figura 1.17a, e imagem do filme de 500nm de óxido de cobre tipo-p intrínseco, eletrodepositado com a solução 3 a potencial constante de -0,5V na Figura 1.17b, mostram o aumento do tamanho de grão nos filmes dopados com Cl em relação ao filme de óxido de cobre tipo-p intrínseco. Os dados da espectrometria de energia dispersiva (EDS), inseridos na figura, confirmam a existência dos dopantes Cl nos filmes obtidos com a solução 2.

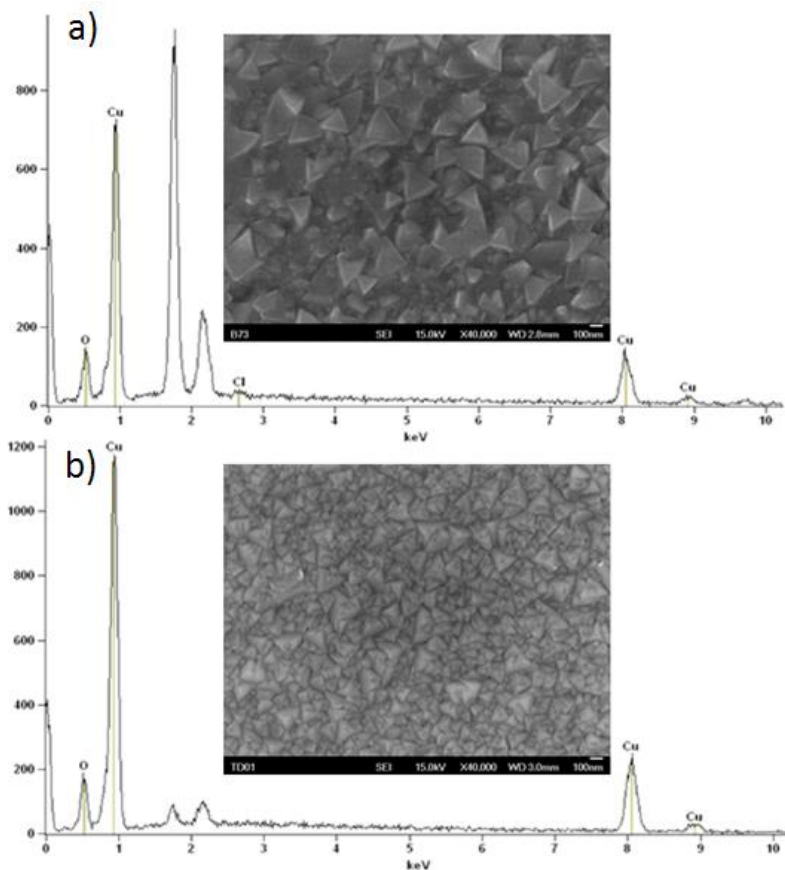


Fig. 1.17 – Imagens de MEV e composição química por EDS para amostras obtidas com solução a) 2 e b) 3.



## Tipo-p

O eletrólito 4 foi utilizado para eletrodeposição em silício de uma série de amostras com diferentes espessuras, obtidas em potenciais constantes de  $-0.375$ ,  $-0.4$  e  $-0.425$  V. A caracterização morfológica das amostras da série foi realizada por Microscopia de Força Atômica (AFM). As Figuras 1.18a e b mostram transiente de corrente e imagem AFM da amostra da série com 250nm, crescida em potencial constante de  $-0.375$  V. A figura 1.22c mostra a evolução da rugosidade em função da espessura e do potencial utilizado nas diferentes amostras da série.

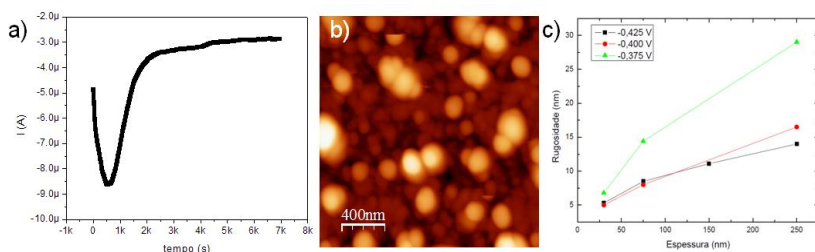


Fig. 1.18 – a) Transiente de corrente e b) Imagem obtida por AFM na amostra de 250nm crescida em potencial constante de  $-0.375$  V. c) Evolução da rugosidade em função da espessura e potenciais de deposição nas diferentes amostras da série.

A Figura 1.19 mostra o espectro de energia dispersiva realizado na amostra de 250nm de espessura, eletrodepositada em potencial constante de  $-0.375$  V com o eletrólito 4.

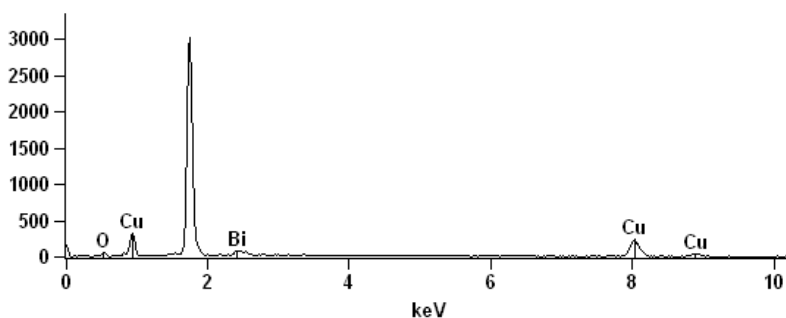


Fig. 1.19 – EDS realizado na amostra de 250nm, obtida a potencial de  $-0.375$  V.

Espectros DRX obtidos nas amostras com espessura de 250nm, crescidas com potencial constante de -0.375, -0.4 e -0.425V são apresentados na Figura 1.20. A não ocorrência de fases para o bismuto sugere a incorporação deste na rede cristalina do  $\text{Cu}_2\text{O}$ , em substituição de um átomo de cobre.

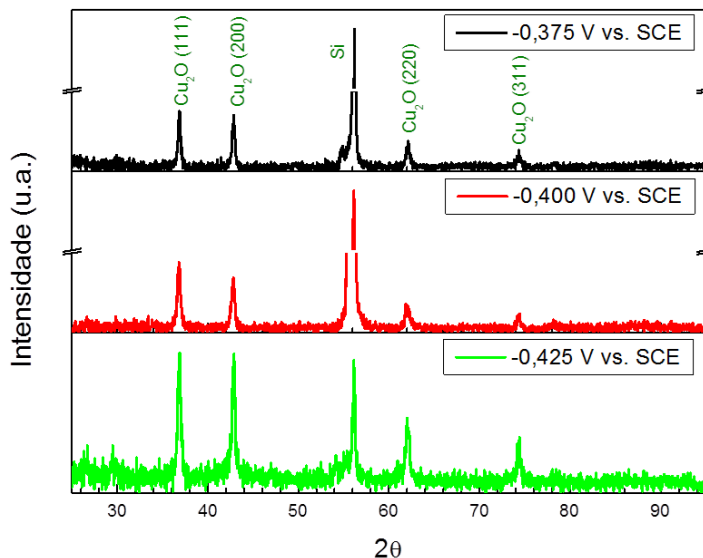


Fig. 1.20 – Espectros obtidos por difração de raio-x em filmes de 250nm.

### Caracterização Elétrica

A diminuição da resistividade do óxido de cobre tipo p pela dopagem com Bi e a obtenção de óxido de cobre tipo n de baixa resistividade pela dopagem com Cl, foram observadas a partir de caracterização elétrica. As curvas de diodo realizadas com terra conectado à base metálica na estrutura  $\text{Cu}_2\text{O}$ -p com 250nm sobre FeNi com 28nm e na estrutura  $\text{Cu}_2\text{O}$ -n com 250nm sobre FeNi com 20nm, são apresentadas na Figura 1.21a e b. Os contatos elétricos foram realizados com cola carbono no  $\text{Cu}_2\text{O}$  e cola prata no FeNi. O ajuste da reta na parte de corrente direta dos diodos foi realizado para obtenção da resistência dos dispositivos (Figura 1.21c e d).

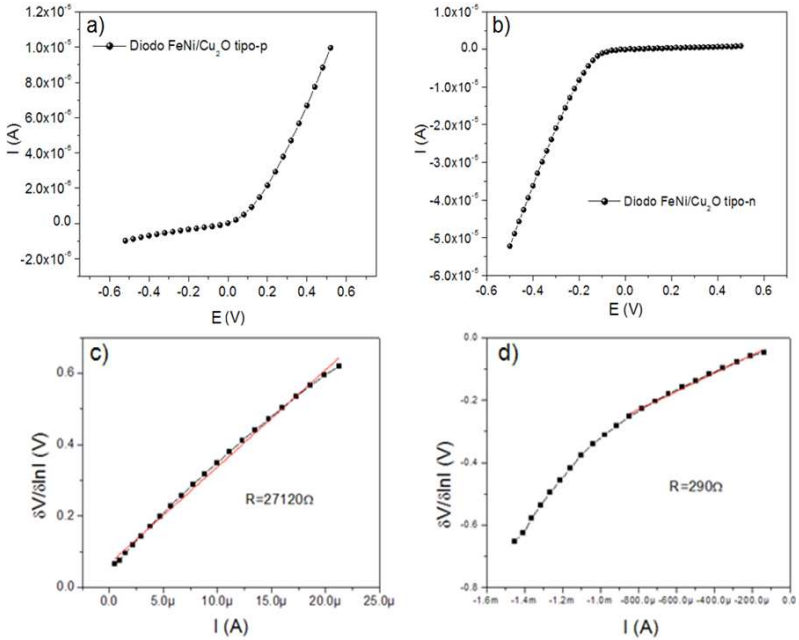


Fig. 1.21 – a) Curva de diodo na interface FeNi/Cu<sub>2</sub>O-p e b) na interface FeNi/Cu<sub>2</sub>O-n. c) Ajuste linear do diodo na interface FeNi/Cu<sub>2</sub>O-p d) e na interface FeNi/Cu<sub>2</sub>O-n.

As resistividades encontradas de  $4490 \Omega \cdot \text{cm}$  para o óxido semiconductor tipo n, dopado com Cl, e de  $420 \text{K} \Omega \cdot \text{cm}$  para o óxido semiconductor tipo p, dopado com Bi, são 5 e 3 ordens de grandeza menores do que as resistividades de  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  encontradas em óxido de cobre tipo-p intrínseco.

## Caracterização dos transistores

Através da equação 4, obtida da teoria da emissão termiônica, dada por,

$$j_0 = A \cdot T^2 \cdot \exp\left(\frac{-e \cdot \phi_B}{k \cdot T}\right) \quad 4$$

, onde  $A$  é a constante de Richardson,  $T$  a temperatura,  $e$  a carga do elétron e  $k$  a constante de Boltzmann, e da densidade de corrente  $j_0$

encontrada com a extrapolação da região linear da parte direita da curva semi-log dos diodos (Figura 1.22), são calculadas as alturas de barreira Schottky nas interfaces metal/semicondutor dos dispositivos transistores Cu<sub>2</sub>O-n/FeNi/Si-n (NMN) e Cu<sub>2</sub>O-p/FeNi/Si-p (PMP).

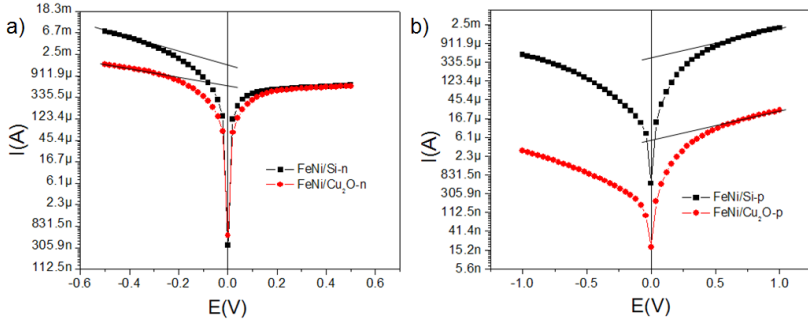


Fig. 1.22 – a) Curvas semi-log dos diodos das junções Si-n/FeNi e FeNi/Cu<sub>2</sub>O-n. b) Curvas semi-log dos diodos das junções Si-p/FeNi e FeNi/Cu<sub>2</sub>O-p.

Para o cálculo das alturas de barreira as constantes de Richardson utilizadas, retiradas da literatura foram:  $A=110.10^4 \text{ A.m}^{-2}\text{K}^{-2}$  para o Si-n [32],  $A=30 \text{ A.m}^{-2}\text{K}^{-2}$  para o Si-p [33] e  $A=100.10^4 \text{ A.m}^{-2}\text{K}^{-2}$  para o Cu<sub>2</sub>O [34]. As alturas de barreira encontradas são apresentadas na Figura 1.23.

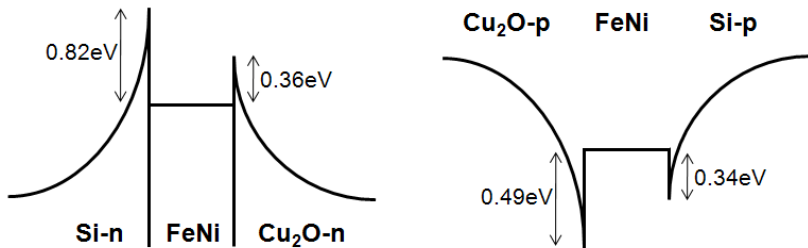


Fig. 1.23 – Alturas de barreira calculadas a partir da teoria de emissão termiônica apresentadas nos diagramas de bandas dos transistores NMN e PMP.

As alturas de barreira podem ser obtidas experimentalmente com medidas de diodo realizadas em diferentes temperaturas. As curvas obtidas em função da temperatura em criostato Janis 7K e alturas de

barreira encontradas para o transistor do tipo-n, são apresentadas na Figura 1.24.

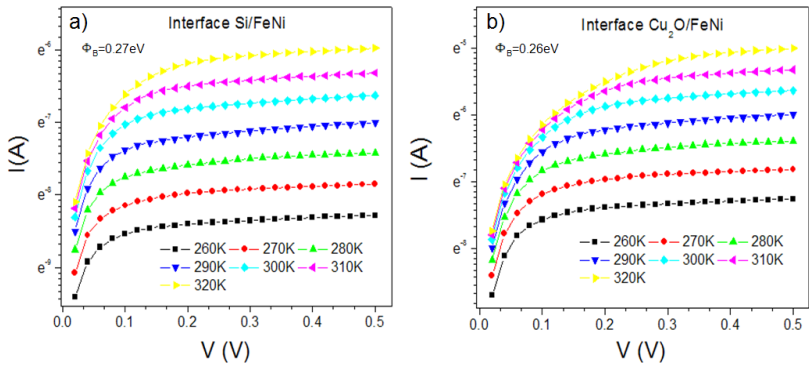


Fig. 1.24 – a) Barreiras  $\Phi_B=0.27\text{eV}$  para Si/FeNi e b)  $\Phi_B=0.26\text{eV}$  para  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{FeNi}$  obtidas das curvas de diodo em função da temperatura.

As barreiras efetivas obtidas experimentalmente sugerem o caráter permeável do transistor com correntes passando diretamente do emissor para o coletor, através de defeitos na base (*pin holes*). Este comportamento é esperado nos transistores apresentados nesta tese, pois as deposições da base FeNi no transistor NMN e no transistor PMP no limite da percolação do filme, foram realizadas para que as bases apresentassem *pin holes* que proporcionam altos valores de corrente de coletor nos transistores permeáveis [35]. Um modelo de diagrama de energia do transistor de base metálica permeável é apresentado na Figura 1.25.

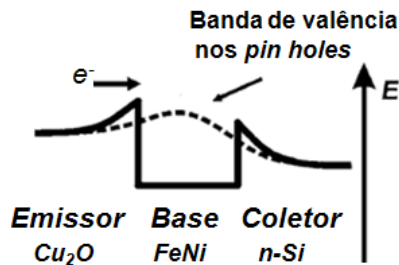


Fig. 1.25 – Diagrama de energia do transistor de base metálica permeável.

## Curvas de Transistor

### Tipo-N

As curvas de transistor obtidas no dispositivo  $\text{Cu}_2\text{O-n/FeNi/Si-n}$ , na configuração de base-comum, com correntes diretas aplicadas na junção emissor/base variando de 0 a 1 mA obtidas em temperatura ambiente (símbolos) e na temperatura de 260K (linhas), são apresentadas na Figura 1.26a. O ganho do transistor é o coeficiente linear da curva de correntes de coletor da Figura 1.26b, medida com potencial zero na interface base/coletor em função das correntes de emissor.

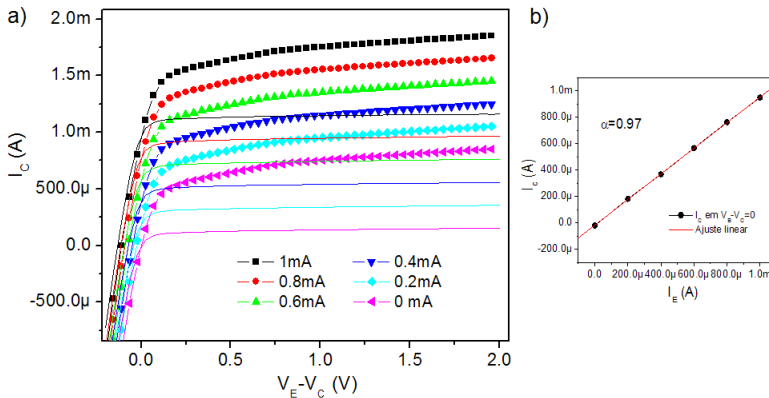


Fig. 1.26 – a) Curva de transistor em base-comum da estrutura  $\text{Cu}_2\text{O-n/FeNi/Si-n}$  a temperatura ambiente (símbolos) e a 260K (linhas). b) Ajuste linear da reta  $I_C \propto I_E$ .

O valor de ganho encontrado pela linearização mostrada na Figura 1.26b sugere que o dispositivo estudado é como esperado um transistor de base permeável, pois em transistores com base metálica livre de *pin holes*, os valores característicos de ganho não são maiores que 0.3 [36]. Em temperatura ambiente de 300 K as correntes de fuga podem ser altas o suficiente para causar o mau funcionamento do dispositivo. As curvas obtidas em temperatura de 260K, realizadas para análise do funcionamento do transistor com corrente de fuga próxima de zero, mostram um pequeno deslocamento das curvas com valores similares de ganho nas duas temperaturas.

As curvas obtidas no dispositivo na configuração emissor-comum são apresentadas na Figura 1.27. Em correntes de base menores que 20  $\mu$ A, o ganho apresentado pelo dispositivo é de , retirado do ajuste da

curva inserido na Figura 1.27a. O valor calculado com a Eq.4 para o ganho em emissor comum em função do ganho obtido em base comum é  $\beta_{emissor} = \beta_{base} + 1$ . O comportamento do transistor em emissor comum sem a presença de corrente de fuga é apresentado no gráfico da Figura 1.27b, onde a curva de corrente de base zero foi subtraída das outras curvas.

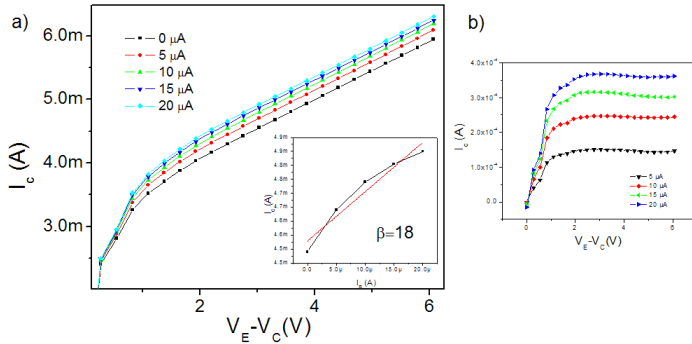


Fig. 1.27 – a) Curvas de emissor comum e ajuste da reta com ganho 18, b) subtração da corrente de fuga.

### Tipo-P

As curvas na configuração base-comum para o transistor tipo-p com campo aplicado (linhas) e sem campo aplicado (símbolos), são apresentadas na Figura 1.28a. Na Figura 1.28b a corrente de fuga foi subtraída.

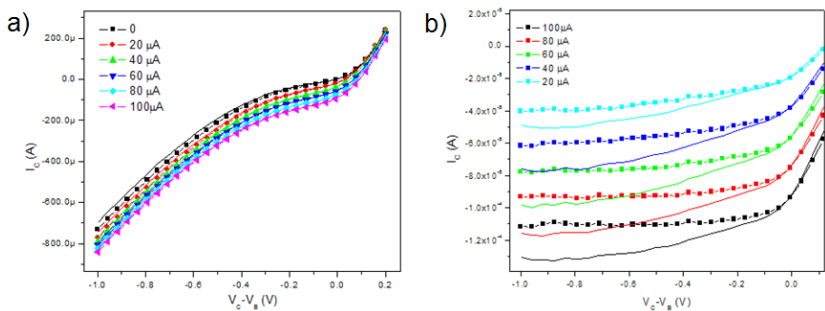


Fig. 1.28 – a) Curva de transistor em base-comum da estrutura Cu2O-p/FeNi/Si-p com (linhas) e sem aplicação de campo magnético externo (símbolos).

O ganho do transistor e as magnetocorrentes observadas em função de corrente de coletor são apresentados na Figura 1.29.

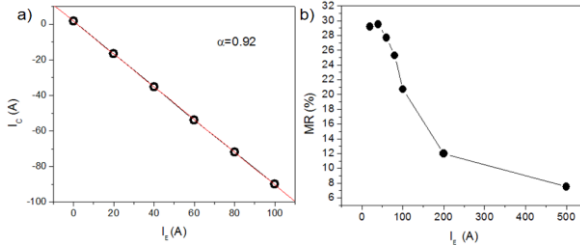


Fig. 1.29 – a) Ganho do transistor e b) magnetocorrentes observadas em função da corrente de emissor.

O ganho  $\approx 0.92$  encontrado é menor do que o ganho do transistor NMN. Este comportamento era esperado, uma vez que o tempo de deposição da base de FeNi de 110s foi comparado em carga ao tempo necessário para obtenção de filmes percolados. As curvas de emissor comum do dispositivo transistor tipo p com correntes de base de até 5  $\mu\text{A}$ , apresentadas na Figura 1.30 com e sem aplicação de campo magnético externo, mostram no ajuste dos pontos da reta da curva inserida na figura um ganho em emissor comum de 10.4 muito próximo do ganho de corrente calculado com a Eq. 5 de 11.5 em função do ganho do dispositivo em base comum.

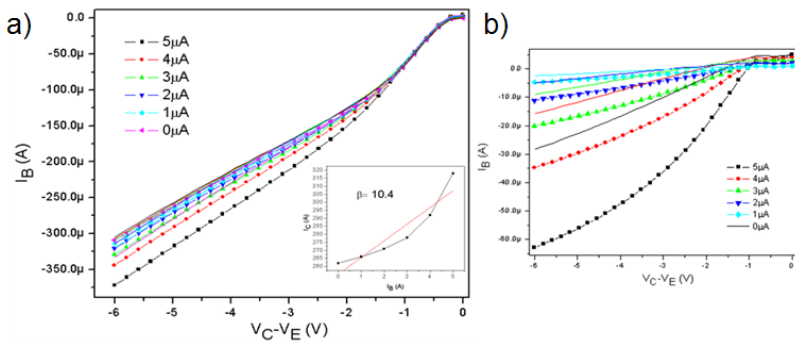


Fig. 1.30 – Curva de transistor em emissor-comum com campo aplicado (linhas) e sem campo aplicado (símbolo), com ganho em emissor-comum inserido na figura, b) eliminação da corrente de fuga por subtração de  $I_B=0$ .



O alargamento das regiões de depleção e conseqüente estreitamento da base em altos potenciais  $V_E-V_C$ , conhecido como efeito Early, é apontada como a provável causa do aumento nas correntes de coletor observadas e a redução dos valores de corrente de coletor em função do campo magnético é atribuída ao aumento da resistência da parte reversa no diodo base/coletor em função do campo magnético [37].

### Transistor Microfabricado

Os resultados da microfabricação do TBM são mostrados nas imagens da Figura 1.31. A Figura 1.31a mostra a base do TBM obtida por lift-off do fotorresiste, após realização do primeiro passo litográfico. As áreas abertas no fotorresiste para eletrodeposição do óxido de cobre do emissor (Figura 1.31b) foram obtidas após a revelação do fotorresiste e exposição ao plasma em oxigênio no segundo passo litográfico. A Figura 1.31c mostra o emissor eletrodepositado e a Figura 1.31d o fotorresiste já revelado definindo as áreas de abertura no isolante para o contato elétrico. A Figura 1.31e mostra as aberturas para o contato elétrico após a deposição de alumina e lift-off do fotorresiste. Na Figura 1.31f é mostrado o dispositivo final com os contatos elétricos de alumínio definidos sobre a alumina.

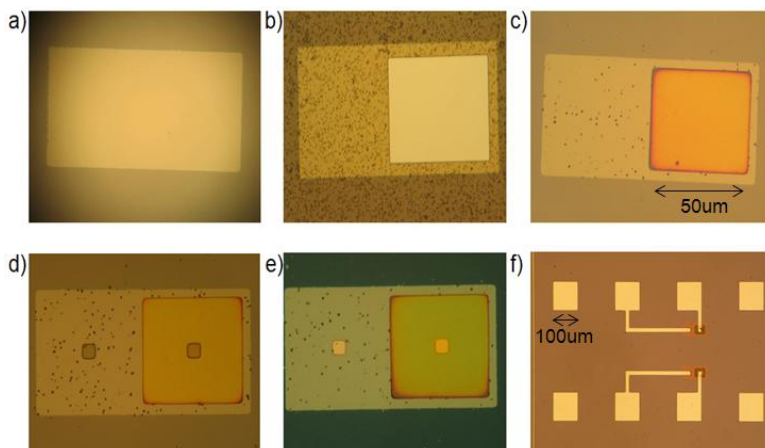


Fig. 1.31 – a) Base metálica, b) abertura para eletrodeposição, c)  $\text{Cu}_2\text{O}$  eletrodepositado, d) litografia para abertura do contato, e) abertura para contato por lift-off, f) contatos elétricos.

A Figura 1.32a mostra o perfil do dispositivo medido em perfilômetro mecânico com as espessuras de cada estrutura utilizada e na Figura 1.32b um modelo do dispositivo é apresentado.

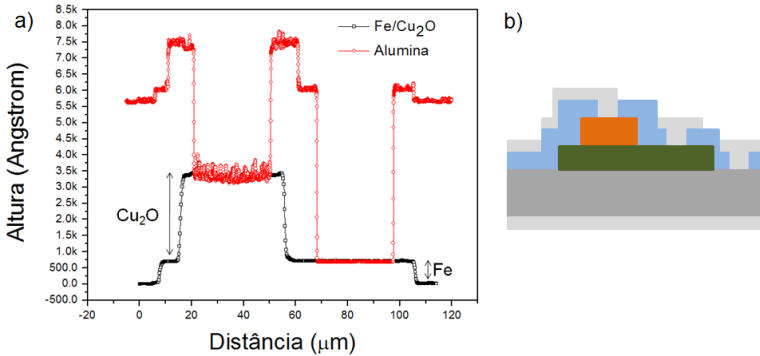


Fig. 1.32 – a) Medida das espessuras por perfilômetro mecânico e b) modelo da estrutura.

O resultado da eletrodeposição em lâmina inteira de silício é mostrado na imagem da Figura 1.33. A diferença nas cores dos dispositivos do centro para as bordas da lâmina é decorrente de diferentes espessuras dos eletrodepósitos que alteram os padrões de interferência na região do espectro visível. Estas diferentes espessuras ocorrem pela ineficiência na agitação do eletrólito realizada por barra magnética.

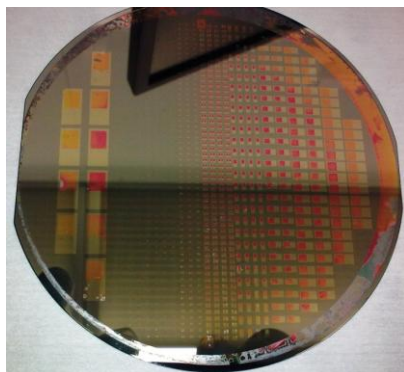


Fig. 1.33 – Imagem da lâmina de processo mostrando a alteração das cores dos eletrodepósitos do centro para as bordas da lâmina de processo.

Em conjunto com pesquisadores da FBK foi desenvolvida uma célula eletroquímica para injeção uniforme de eletrólito sobre a lâmina para obtenção de depósitos com espessura uniforme. Na Figura 1.34 são apresentados os dados de simulação realizada em elementos finitos com o software ANSYS v11. Na Figura 1.34a é apresentada a arquitetura da célula fabricada em teflon e a estrutura das malhas utilizadas para o cálculo em elementos finitos. A Figura 1.34b mostra as linhas de fluxo do eletrólito que é injetado por bomba mecânica em circuito fechado com filtragem. O gráfico da Figura 1.34c mostra a alta irregularidade da distribuição de velocidades do eletrólito incidentes na lâmina de silício na primeira configuração de furos injetores testada. A Figura 1.34d apresenta a distribuição de velocidades uniforme na configuração final de buracos injetores utilizada na célula posteriormente fabricada.

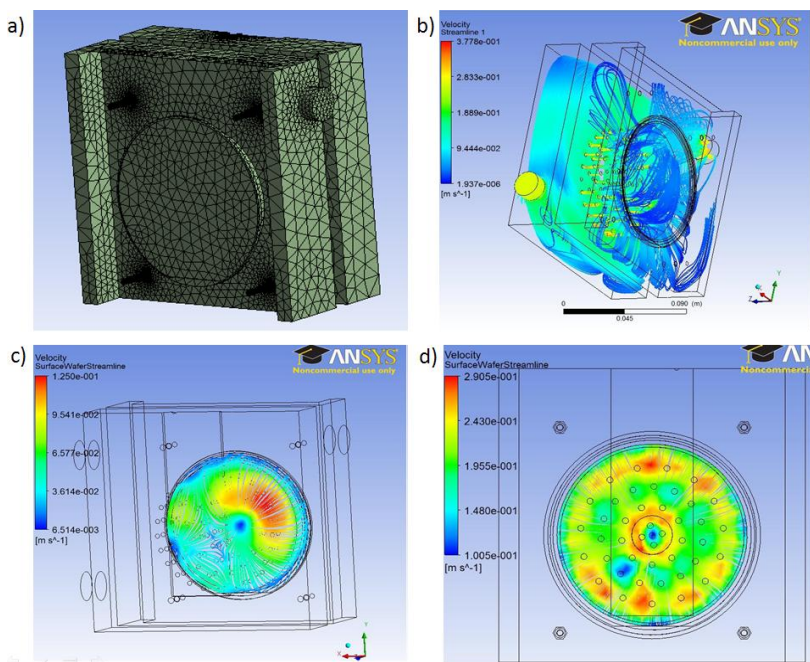


Fig. 1.34 – a) Estrutura e malhas, b) linhas de fluxo do eletrólito, c) distribuição irregular e d) regular de velocidade do fluxo na superfície da lâmina.

## Discussão dos Resultados

Dispositivos verticais transistores foram obtidos por eletrodeposição e caracterizados como transistores de base metálica permeáveis. A utilização da técnica de eletrodeposição possibilitou a redução da resistividade do óxido de cobre tipo p pela inserção de dopantes e a obtenção de óxido de cobre tipo n pouco resistivo dopado com Cl. As curvas obtidas em base-comum e emissor-comum, mostram que a alta permeabilidade da base do transistor Si-n/FeNi/Cu<sub>2</sub>O-n resulta em alto ganho  $\beta = 0.97$  em base comum e  $\beta = 18$  em emissor comum e uma respectiva diminuição das magnetocorrentes em função da grande parcela de corrente de coletor não dependente em spin que permeia a base. A diminuição da permeabilidade da base no transistor Si-p/FeNi/Cu<sub>2</sub>O-p causou uma diminuição dos ganhos  $\beta = 0.92$  em base comum e  $\beta = 10.4$  em emissor comum e um conseqüente aumento das correntes de coletor spin polarizadas que resultam em magnetocorrentes de até 30%. As magnetoamplificações negativas medidas em emissor comum de até 128% e a conformidade dos materiais e métodos utilizados na microfabricação com a produção de baixo custo em larga escala, caracterizam os TBMs estudados como dispositivos promissores para a aplicação em sensores magnéticos.

## Sugestões Para Trabalhos Futuros

- ✓ Estudo de contatos ôhmicos com as estruturas do transistor para realização de medidas a baixas temperaturas, a fim de se obter supressão *in situ* das correntes de fuga.
- ✓ Realizar medidas de magnetocorrente e magnetoamplificação em função do campo magnético aplicado a baixas temperaturas.
- ✓ Realizar medidas de transistor em dispositivos microfabricados para análise precisa da dependência dos ganhos do transistor e da dependência da corrente de coletor e função das áreas das estruturas do dispositivo.

## Capítulo 2

### Junção Túnel Magnética

Nos Transistores Magnéticos de Junção Túnel (TMJT), a energia dos elétrons injetados na base pode alcançar valores maiores do que a dos elétrons injetados pelas barreiras Schottky [38,39], dependendo apenas da escolha dos materiais utilizados na junção túnel/ferromagnética. Outra característica importante do TMJT é a possibilidade de utilização de uma camada ferromagnética polarizadora de spins no emissor, proporcionando uma diminuição do número de camadas metálicas na base, uma vez que será necessária apenas uma camada ferromagnética como analisadora de spins [40]. Com isso, o número de espalhamentos nas interfaces metálicas, e conseqüentemente a corrente de fuga, diminuem. O aumento da energia dos elétrons injetados, a diminuição da corrente de fuga e a conservação do spin do elétron que sofre tunelamento, fazem do TMJT um dispositivo com corrente de coletor e magnetocorrentes altas [41]. Uma ilustração do diagrama de bandas de um TMJT é mostrada na Figura 2.1.

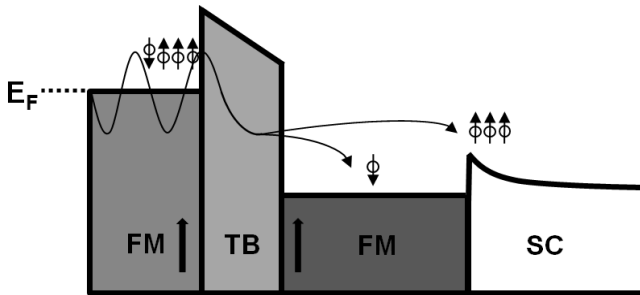


Figura 2.1-Diagrama de bandas de um TMT com os metais ferromagnéticos (FM) orientados na configuração paralela, onde TB é a barreira túnel e SC um semicondutor.

Estudos realizados nas estruturas FM/TB/FM chamadas de junção túnel magnética (JTM) baseadas em óxido de alumínio apresentaram Magnetorresistências Túnel (TMR) entre 20-70% [42]. O caráter amorfo da barreira túnel de alumina inviabiliza obtenção de valores relativos maiores de resistência em função do campo magnético aplicado, devido a estados de Bloch com várias simetrias que podem acoplar com estados

evanescentes dos eletrodos ferromagnéticos. As funções de Bloch podem ser decompostas em uma soma de ondas de elétrons livres ou vistas como pacotes de ondas representando elétrons se propagando livremente através do potencial periódico dos íons do cristal. O óxido de magnésio surge como uma alternativa para obtenção de TMR's maiores do que as obtidas anteriormente, pois este segue a orientação cristalina do substrato e a simetria faz com que os estados Bloch  $\Delta_1$ , que tem alta polarização positiva, tenham maior probabilidade de tunelamento do que os outros estados  $\Delta_2$  e  $\Delta_5$ , que têm polarização negativa [43]. O processo esquematizado é mostrado na figura 2.2 retirada da ref. 43.

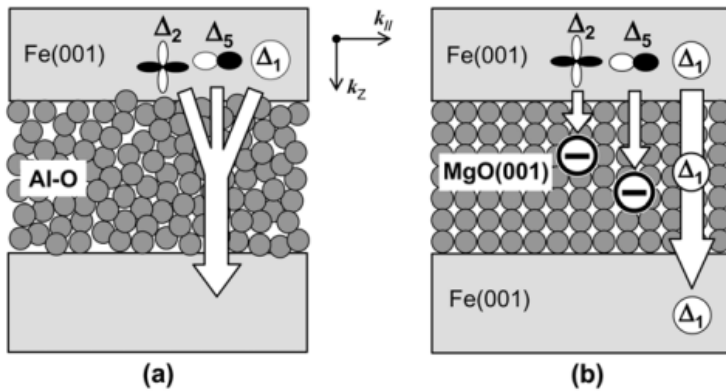


Figura 2.2-Tunelamento eletrônico através de a) alumina amorfa e b) MgO cristalino.

Durante o segundo estágio de doutorado realizado na Universidade de Plymouth na Inglaterra, com duração de seis meses e sob a supervisão do Prof. Genhua Pan, foram investigados os parâmetros de microfabricação e os mecanismos de transporte em JTM com óxido de magnésio cristalino como barreira túnel para posterior aplicação em um transistor de junção túnel magnética.

## Procedimento Experimental

### Crescimento das Multicamadas

As multicamadas utilizadas nas JTM's foram crescidas com a técnica de *magnetron sputtering* sobre substrato comercial de silício/dióxido de silício com espessura de 500um/5um em um sistema Nordiko 9550 (Fig. 2.3), com pressão base de  $2.10^{-8}$  Torr. Antes de serem inseridos na pré-câmara do Nordiko 9550, os substratos foram limpos em acetona, 1-propanol, água deionizada e desidratados por 5min em forno a 95°C. Depois de transportados para a câmara de deposição, uma limpeza *pré-sputtering* foi realizada por 3 minutos em potência de 140W, pressão de 12 mT e rotação de 6rpm. Os parâmetros de deposição por *sputtering* para os diferentes materiais utilizados nesta tese são apresentados na Tabela 2.

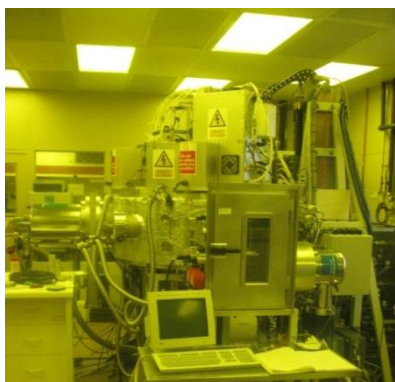


Fig. 2.3 – a) Sistema de *Sputtering* Nordiko 9550 utilizado na deposição das multicamadas

Alvo	Parâmetros	Taxa de deposição
CoFeB	100w, 60%, 3mT, 15sccm, 30rpm, EM on@0d	5nm/m.100w
Cu	50w, 63%, 2mT, 15sccm, 0rpm, EM off	12.5 nm/m.100w
CuN	300w, 2mT, 5sccm/1sccm, 63%, 15rpm	10.7 nm/m.100w
IrMn	100w, 2.5mT, 10sccm, 60%, 30rpm, EM on@0d	18nm/m.100w
MgO	200w, 60%, 1mT, 20sccm, 30rpm	0.28 nm/m.100w
CoFe	100w, 60%, 2mT, 15sccm, 0rpm, EM on@0d	6.8 nm/m.100w
Ta	100w, 50%, 2mT, 15sccm, 0rpm, EM off	5.5nm/m.100w

Tabela 2 - Taxas de deposição das camadas.

A sequência final utilizada para as multicamadas e suas respectivas espessuras nominais em nanômetros foi: Ta5,5nm-CuN21,0nm-Ta5,1nm-CuN21,0nm-Ta5,5nm-CoFe4,6nm-MgO2,0nm-CoFe3,5nm-IrMn5,0nm-Cu33,0nm-Ta5,5nm. A estrutura Ta5,5nm-CuN21,0nm-Ta5,1nm-CuN21,0nm-Ta5,5nm é utilizada nas camadas inferiores por apresentar baixa rugosidade, atuando como bom *seed layer* para a JTM, e boa resistência mecânica ao sistema de 4 pontas utilizado para as medidas elétricas após a microfabricação. A última camada de Ta5,5nm é utilizada como camada passivadora (*cap layer*). A camada de

IrMn5,0nm é crescida sobre a junção túnel magnética, composta por CoFe4,6nm-MgO2,0nm-CoFe3,5nm, para a composição de uma válvula de spin. A microfabricação utilizada na formação do dispositivo vertical para medida de magnetorreistência com corrente perpendicular ao plano foi realizada em sala limpa classe 100 com a técnica *top down*. A técnica *bottom up* é evitada na microfabricação de junções túnel e multicamadas devido à diminuição do vácuo, causada pela evaporação de solvente presente no fotorresiste sobre o substrato antes da realização do sputtering, e do curto circuito entre as camadas que pode ocorrer durante o lift-off. Um esquema dos passos da microfabricação *top down* do dispositivo vertical é apresentado na Figura 2.4.

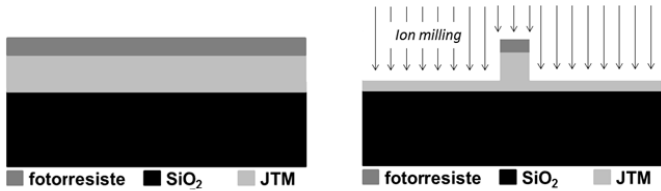


Fig. 2.4 - a) Spin-coating do fotorresiste sobre as camadas. b) Exposição com a 1ª máscara, revelação do fotorresiste, exposição ao desbaste iônico para formação do pilar na JTM e remoção do fotorresiste.

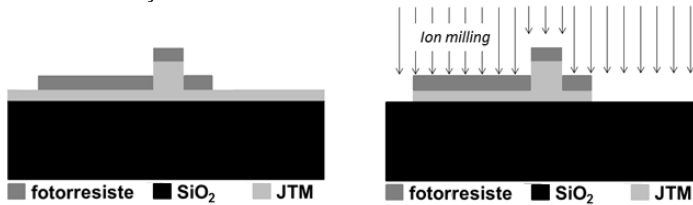


Fig. 2.4 - c) 2º Spin-coating, exposição à segunda máscara, revelação do fotorresiste e d) exposição ao desbaste iônico e remoção do fotorresiste para formação do contato elétrico inferior.

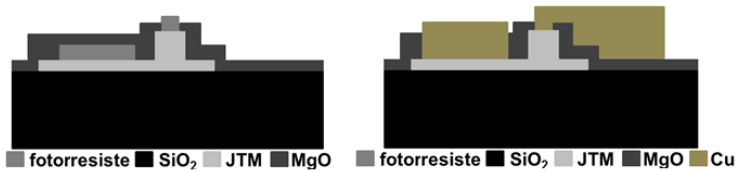


Fig. 2.4 - e) 3º Spin coating, exposição à terceira máscara, revelação do fotorresiste, deposição da camada isolante e *lift-off*. f) 4º Spin coating, exposição à quarta máscara, revelação do fotorresiste, deposição e *lift-off* com formação do contato elétrico superior.



## Ion Milling

A remoção das camadas na formação do dispositivo para a medida da magnetorresistência túnel na configuração de corrente perpendicular à JTM foi realizada por desbaste físico por meio do bombardeamento por íons de argônio. O equipamento Oxford Instrument ID-2500 Ion Beam Drive, utilizado no *ion milling* e um esquema de funcionamento da fonte do feixe de íons são mostrados na figura 2.5.

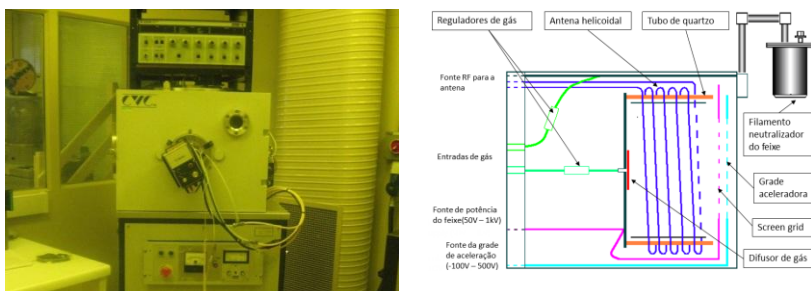


Fig. 2.5 – Oxford Instrument ID-2500 Ion Beam Drive e esquema de funcionamento da fonte do feixe de íons.

A taxa de remoção de cada material presente na multicamada foi caracterizada a fim de se obter o tempo total de desbaste na microfabricação do dispositivo da JTM. As caracterizações foram realizadas em filmes depositados isoladamente em substrato de Si/SiO<sub>2</sub>, sobre estes filmes foi realizado um passo de litografia ótica e após um cozimento do fotorresiste por 30 min em forno a 95°C para total remoção do solvente, as amostras foram submetidas ao feixe de íons por 1 min. Os parâmetros utilizados para o *ion milling* foram: pressão de vácuo na câmara de 2~3x10<sup>-6</sup> Torr e pressão de argônio 4x10<sup>-4</sup> Torr, voltagem do feixe de 350V, voltagem de aceleração de 45V, que deve estar entre 10~20% da voltagem do feixe, corrente de aceleração de 1.6A, tensão de descarga de 40V e corrente de descarga de 0.53A, corrente do filamento 7~7,5A, corrente do neutralizador de 20mA, que deve ser igual ou maior que a corrente do feixe, e corrente do neutralizador do filamento de 0,56A. A amostra fica em rotação constante e inclinada de um ângulo 60 graus em relação ao feixe, para maior uniformidade do desbaste. Após a remoção do fotorresiste com Shipley microposit 1165 em ultrassom a 65°C por 10 min as amostras foram medidas em um nano-R AFM, o degrau obtido após o *ion milling*

é encontrado com o microscópio óptico acoplado e através da varredura com o AFM a espessura de material removido por minuto é encontrada. A altura obtida em um degrau é mostrada na Figura 2.6. As taxas de remoção em nm/min dos materiais constituintes da JTM são apresentadas na Tabela 3.

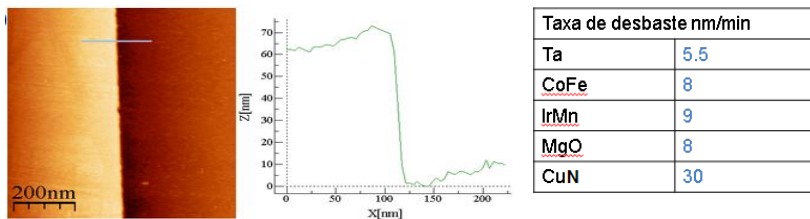


Fig. 2.6 - Altura do degrau após realização do ion milling

Tabela 3 - Taxa de desgaste dos materiais utilizados na JTM

## Microfabricação

Para a realização do primeiro passo da microfabricação do dispositivo vertical o fotorresiste negativo *Shipley 1812* foi depositado por *spincoating* em rotação de 4000rpm por 1 minuto sobre o substrato com as multicamadas. Em seguida, um cozimento a 180°C foi realizado em prato quente por 1minuto. As capelas utilizadas na limpeza das amostras e *spincoating* são mostradas na Figura 2.7 a e b.



Fig. 2.7 – a) Capela para limpeza dos substratos e b) capela para realização de *spincoating* e *softbake*.

A exposição do fotorresiste em todos os passos litográficos foi realizada com o alinhador de máscaras mostrado na Figura 2.8. Os desenhos das 4 máscaras utilizadas na litografia ótica foram desenvolvidos com o *software L-Edit* versão 12 e a fabricação das máscaras em quartzo foi realizada pela *Compugraphics International Limited*.

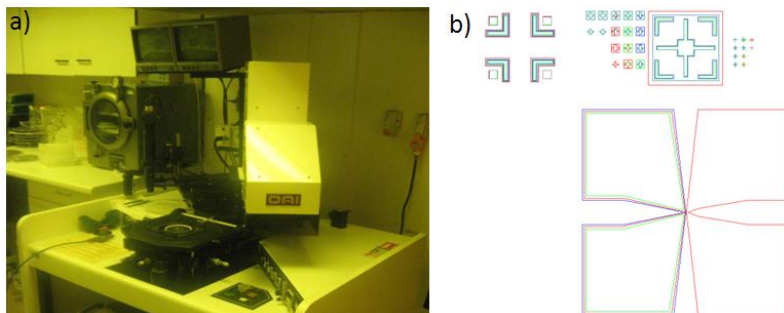


Fig. 2.8 – a) Alinhador de máscaras OAI modelo 200 e b) desenho com sobreposição das 4 máscaras mostrando o contato para medida com 4 pontas e as marcas utilizadas no alinhamento.

O fotorresiste foi exposto à luz ultravioleta por 10 segundos através da primeira máscara (Figura 2.9a) e revelado em *Shipley Microposit 351 Developer* por 1 minuto. Após um cozimento por 30 minutos no forno a 95°C, a amostra foi inserida na câmara do *Ion Milling*.

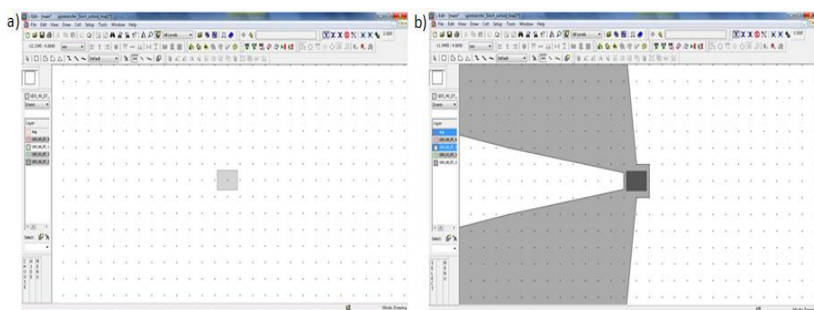


Fig. 2.9 – a) Esquema da primeira máscara que delimita o pilar da JTM e b) segunda máscara que delimita o contato elétrico inferior.

O tempo calculado, com base nas taxas de desgaste da tabela da Figura 2.6 para formação do pilar da JTM, foi de dois minutos e meio. Após o

desbaste, o fotorresiste foi removido durante 10min com *Shipley Microposit 351 Developer* a 65°C em agitação por ultrassom. Após secagem por 5 min em forno a 95°C, o segundo passo litográfico e a exposição através da segunda máscara (Figura 2.9b) foram realizados. O segundo passo do desbaste iônico para delimitação do contato inferior foi realizado durante três minutos e meio. Este passo é importante para a prevenção de curto circuito entre o contato elétrico superior e o inferior, através de defeitos que possam existir na camada isolante de 90nm de óxido de manganês, que é depositado após a realização do terceiro passo litográfico com exposição da terceira máscara (Figura 2.10a). Após o *lift-off* do fotorresiste e do MgO, as regiões em preto ficam abertas para deposição de 50nm de Cu/Ta utilizado como contato elétrico superior delimitadas pela área exposta através da quarta máscara, mostrada na Figura 2.10b, e obtida após o *lift-off* do fotorresiste. A quarta máscara é desenhada em campo escuro (*dark field*), para utilização do mesmo fotorresiste positivo em todas etapas do processo.

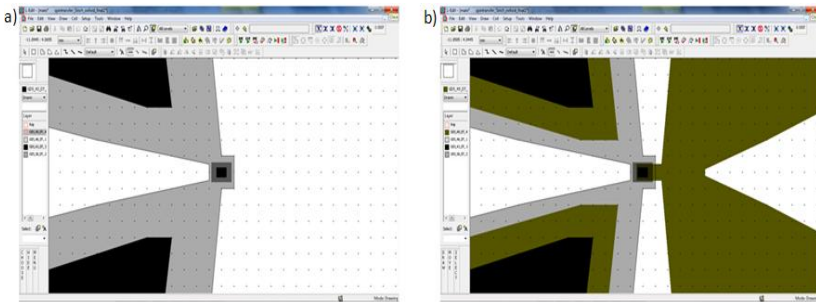


Fig. 2.10 – a) Esquema da terceira máscara que abre na camada isolante de MgO as regiões de contato e b) quarta máscara para delimitação dos contatos elétricos superiores por *lift-off*.

Após a finalização do processo de microfabricação do dispositivo vertical, as amostras são submetidas a um processo de cozimento a 350°C por 1h em ambiente de argônio sob um campo magnético de 5KOe, o resfriamento em campo magnético é realizado para obtenção do acoplamento antiferromagnético entre o IrMn e o CoFe. O equipamento utilizado neste processo é mostrado na Figura 2.11.



Fig. 2.11 – Suporte para amostras com aquecimento por efeito Joule e fluxo de argônio localizado entre as bobinas do magnetômetro.

## Resultados

### Análise das multicamadas

As camadas foram analisadas com a técnica de microscopia eletrônica de transmissão. A imagem da Figura 2.12 mostra a boa qualidade dos filmes obtidos e as espessuras efetivas das camadas utilizadas nos contatos inferior (à esquerda) e superior, estimadas com utilização do software *DigitalMicrograph*.

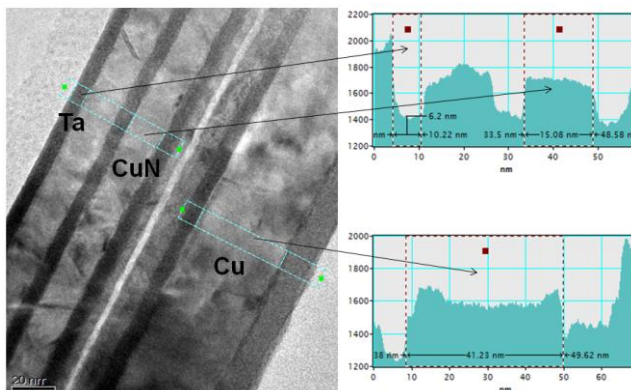


Fig. 2.12 – Imagem das multicamadas obtida em microscópio eletrônico de transmissão e espessuras das camadas utilizadas como *seed layer* e *cap layer*.

Na Figura 2.13 são mostradas as espessuras estimadas nas camadas que compõem a junção túnel magnética.

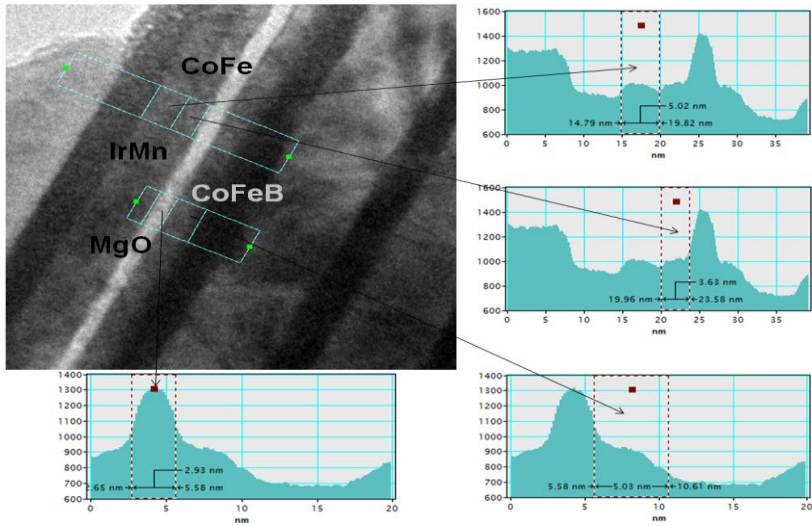


Fig. 2.13 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de transmissão mostrando as espessuras estimadas nas camadas que compõem a JTM.

O CoFeB depositado a temperatura ambiente tem estrutura amorfa. Estudo realizado com a técnica de difração de elétrons com alta energia [44], mostrou que MgO crescido em CoFeB amorfo apresenta caráter amorfo nos estágios iniciais de crescimento <1nm e a partir desta espessura começa a cristalizar em textura (001). Durante o tratamento térmico, a camada MgO é totalmente cristalizada com textura (001) e atua como precursora da cristalização do CoFeB na estrutura bcc(001), como pode ser observado na Figura 2.14a. O CoFe com textura (001) é mostrado na Figura 2.14b, que foi obtida por microscopia eletrônica de transmissão com alta definição.

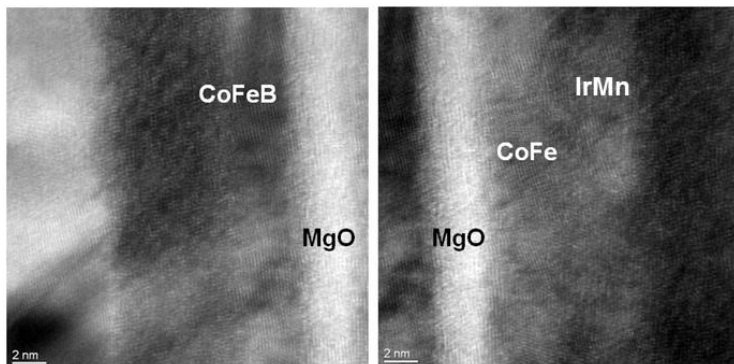


Fig. 2.14 - Imagem obtida por microscopia eletrônica de transmissão com alta definição na JTM.

## Exchange Bias

Em trabalho prévio realizado na Universidade de Plymouth, o “Exchange bias”, indispensável em dispositivos spintrônicos que operam em baixo campo [45], foi estudado para diferentes espessuras, materiais ferromagnéticos e temperatura de recozimento a serem utilizados nos dispositivos. A microscopia de transmissão de alta resolução foi utilizada na observação das orientações cristalinas dos materiais (Figura 2.15a) e as energias de anisotropia unidirecional para amostras com diferentes temperaturas de recozimento, calculadas a partir das medidas magnéticas realizadas em um magnetômetro de amostras vibrantes (VSM), são mostradas no gráfico da Figura 2.15b.

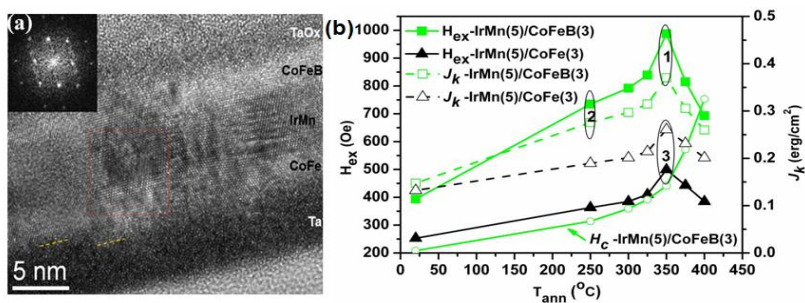


Figura 2.15-a) Microscopia eletrônica de transmissão, b) Dependência de  $H_{ex}$  com a temperatura de recozimento, retirada da ref. 45.

As maiores anisotropias magnéticas foram encontradas em amostras recozidas por 30 min a 350°C. Os spins não compensados na interface AFM/FM [46] fixam a magnetização de uma das camadas ferromagnéticas, enquanto a outra tem magnetização facilmente alterada pelo campo magnético externo. O *exchange bias* nas multicamadas realizadas neste trabalho pode ser observado na curva de histerese (Figura 2.16), realizada no magnetômetro de amostra vibrante do Laboratório de Magnetismo e Caracterização de Materiais Magnéticos da UFSC.

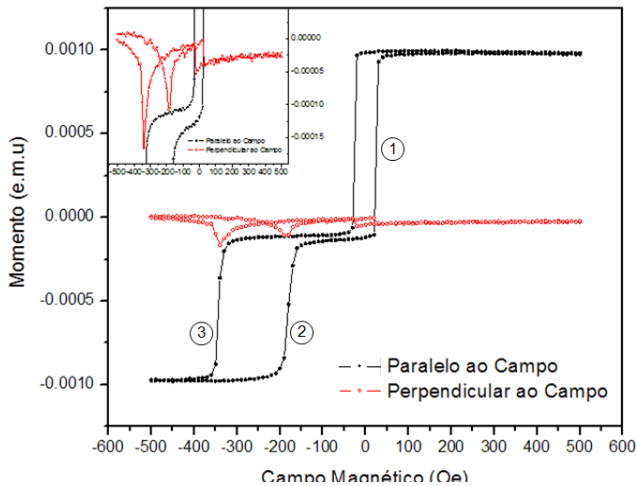


Fig. 2.16 - Curva de magnetização da JTM obtida em magnetômetro de amostra vibrante.

Quando o campo magnético externo é aplicado na direção dos spins não-compensados (região 1), apenas a camada livre sofre alteração na direção da magnetização a partir de 100Oe. Invertendo-se a direção do campo externo para a direção oposta a dos spins não-compensados (região 3) o campo de 3300e, necessário para inversão da magnetização da camada fixada, é maior que o esperado para a camada FM isolada. Com a diminuição do campo aplicado (região 2) o momento dos spins não-compensados forçam a inversão da magnetização da camada fixada abaixo de 2000e. Os picos presentes na curva de momento de dipolo medido perpendicularmente ao campo magnético externo aparecem no momento das inversões das magnetizações que ocorrem no plano xy.



## Magnetorresistência Túnel

Medidas magnetorresistivas foram realizadas na configuração 4 pontas em dispositivos teste, obtidos com apenas uma etapa litográfica. A curva da figura 2.17 apresenta magnetorresistência de aproximadamente 25%, a posição deslocada dos picos coincide com os valores de histerese encontrados na curva da Figura 2.16. Os baixos valores apresentados em relação ao esperado para junções túnel com MgO cristalino são atribuídos a grande área do dispositivo teste, que possibilita a ocorrência de defeitos na camada isolante ou a possibilidade de impurezas no alvo utilizado para a obtenção destas camadas por *sputtering*.

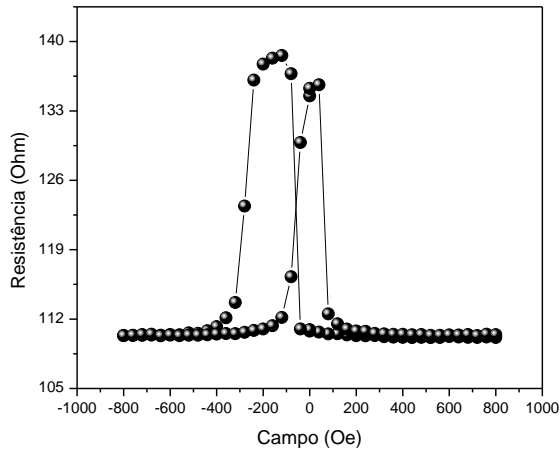


Fig. 2.17-TMR medida em dispositivo obtido com uma etapa litográfica.

As medidas de magnetorresistência realizadas no dispositivo completo, obtido após a realização de todos os passos de microfabricação é apresentada na Figura 2.18. A obtenção de valor de MR=150% consideravelmente mais alto do que o encontrado no teste do dispositivo, após a primeira etapa litográfica, mostra que com a redução da área da MTJ a possibilidade de pequenos curtos circuitos entre os contatos superiores e inferiores por defeitos existentes no isolante utilizado é diminuída.

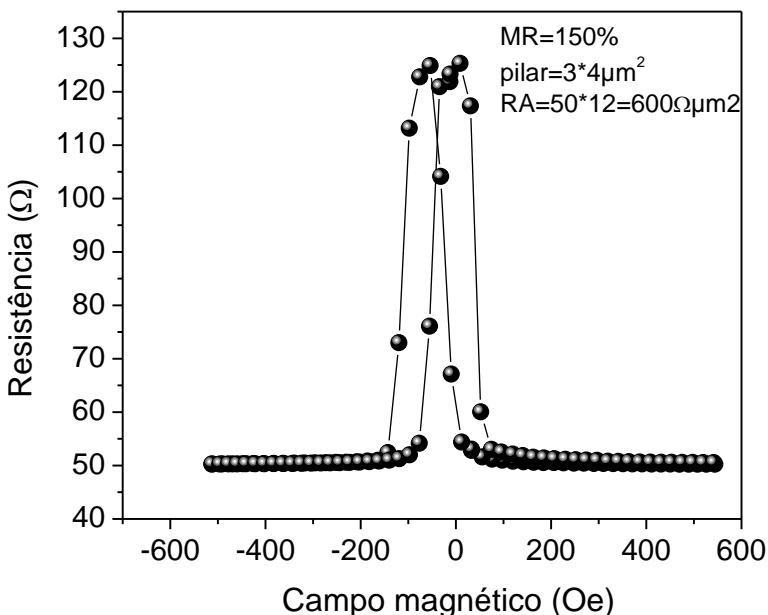


Fig. 2.18-Curva de magnetorresistência medida em dispositivo final obtido após realização de todos os passos litográficos.

### Discussão dos Resultados

Os valores encontrados no dispositivo elaborado durante o doutorado são maiores do que os encontrados em barreira túnel de alumina, comumente utilizados em MRAM comerciais, e menores do que os valores previstos teoricamente [46,47] e encontrados experimentalmente em trabalhos recentes [48,49]. A não obtenção de valores altos previstos para a JTM realizada com camada túnel de MgO são atribuídas a problemas encontrados na microfabricação dos dispositivos, como a não uniformidade do *ion milling* e problemas na remoção do fotorresiste após o *hard bake* realizado para proteção do dispositivo antes da realização do *ion millig*. A má remoção do fotorresiste pode ser observada nas franjas presentes nas bordas dos pilares da MTJ na imagem da Figura 2.19, obtida por AFM.

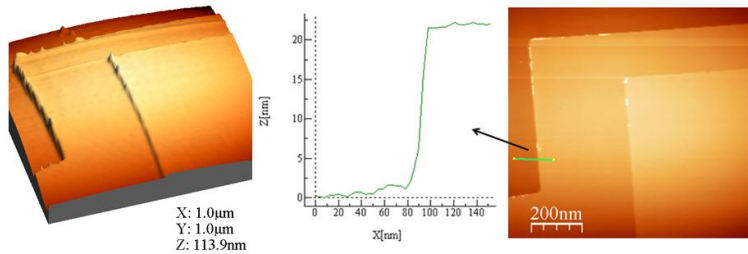


Fig. 2.19 - Imagem 3D e 2D obtida por AFM no menor pilar de JTM com  $2\mu\text{m}^2$  realizado durante o doutorado, mostrando as falhas devido a má remoção do fotorresiste.

### Sugestões Para Trabalhos Futuros

- ✓ Em etapa sucessiva do trabalho, a melhoria da uniformidade do *ion milling* e diminuição do tempo de hard bake para uma melhor remoção do fotorresiste serão realizadas e a utilização da JTM estudada neste trabalho, depositada diretamente sobre silício, será realizada para aplicação em um Transistor Magnético de efeito Túnel.
- ✓ A difusão do FM depositado diretamente sobre o silício durante o tratamento térmico, que deve ser realizado para a cristalização da camada de MgO, foi testada e a redução observada da barreira Schottky na curva  $I \times V$  da Figura 2.20 é desejada no TMT para obtenção de maiores valores de corrente de coletor.
- ✓ As etapas de desenho e fabricação das máscaras já foram realizadas e a fabricação do TMT será desenvolvida na continuação da colaboração entre o Laboratório de Filmes Finos-UFSC e a Universidade de Plymouth.

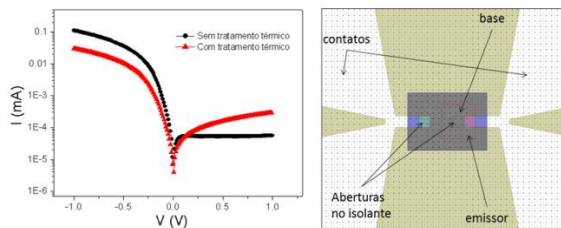


Fig. 2.20 – a) Curva  $I \times V$  semi-log do diodo Fe/Si-n antes e após tratamento térmico por 30 min a  $350^\circ\text{C}$  em ambiente de argônio e b) Design utilizado na fabricação do TMT.

## Capítulo 3

### Injeção e Detecção de Spin em Silício

Em metais ferromagnéticos as densidades de spin $\uparrow$  e spin $\downarrow$  são diferentes. Quando uma corrente flui do metal ferromagnético (FM) para o não-magnético (NM), as densidades de corrente de spin majoritário e minoritário longe da interface devem ser iguais nos não-magnéticos, portanto o excesso de spins majoritários se acumula nas proximidades da interface ferromagnético/não-magnético e causa uma divisão do potencial eletroquímico  $\Delta\mu$  (energia média dos elétrons). O acúmulo não é localizado na interface, mas estende-se pelo comprimento de difusão de spin  $L_{sf}$ . O  $L_{sf}$  no não-magnético pode ser expresso pela equação retirada da referência [50], onde  $\tau_{sf}$  é o tempo de inversão de spin chamado tempo de relaxação,  $2N(E_F)$  a densidade de estados e  $\rho_N$  a resistividade.

$$L_{sf}^N = \frac{\tau_{sf}}{4e^2 N(E_F) \rho_N} \quad 5$$

A solução da equação para o transporte difusivo [51], que resulta em queda exponencial da acumulação de spin a partir da interface e a divisão do potencial eletroquímico devido ao acúmulo de spin na interface, é mostrada na Figura 3.1 adaptada da referência [52].

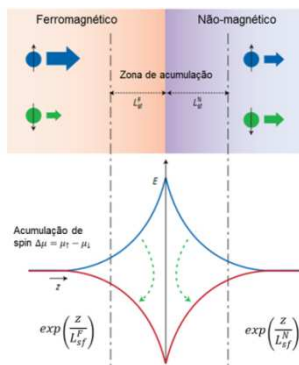


Fig. 3.1 – Acumulação de spin na interface do metal ferromagnético/não magnético e separação do potencial eletroquímico devido à acumulação de spin.

A escala de coerência de dispositivos spintrônicos é diretamente dependente de  $L_{sf}$  e muito maior em semicondutores devido à baixa interação spin-órbita nestes materiais [53] que nos metais não magnéticos empregados nas válvulas de spin convencionais. Esta escala de coerência proporcionou a previsão por Data e Das [9] de um dispositivo transistor de chaveamento baseado no efeito Rashba [54], com manipulação dos spins no canal do semicondutor por voltagem aplicada no *gate*. Contudo, o descasamento de impedância que surge da diferença de resistividades entre os metais ferromagnéticos utilizados como emissor e detector de spin e o semicondutor não magnético, força uma alta densidade de acúmulo de spin no lado ferromagnético, que causa inversão dos spins e diminui a polarização da corrente no semicondutor. As soluções apontadas para o aumento da polarização da corrente através do aumento da densidade de acúmulo de spin no semicondutor são as inserções de barreiras túnel ou Schottky nas interfaces [55]. A condição para injeção e detecção de spin em semicondutores através de barreira túnel, expressa pela Equação 6,

$$r_1 = \frac{W}{\omega} \rho_N t_N \ll r_b^* \ll \frac{W}{\omega} \rho_N \frac{[L_{sf}^N]^2}{t_N} = r_2 \quad 6$$

, é dependente da largura  $W$  dos contatos, espessura  $\omega$  do substrato, comprimento  $t_N$  do canal e resistividade de substrato, mostrados na Figura 3.2. Esta condição foi definida por Fert e Jaffrès [56] numa derivação do modelo padrão de transporte em CPP-GMR [57] com inserção da resistência túnel  $r_b^*$  na interface.

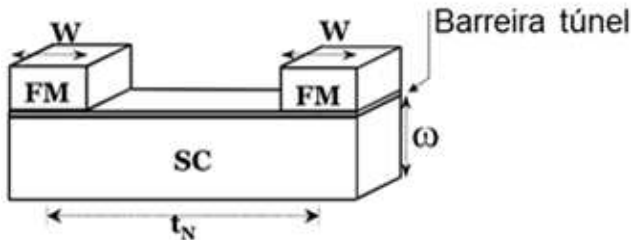


Fig. 3.2 – Dispositivo lateral com contatos ferromagnéticos sobre silício, onde  $t_N$  é o comprimento do canal de spin,  $\omega$  é a espessura do substrato e  $W$  a largura dos contatos.

Neste capítulo, serão estudadas a injeção e detecção de spins em silício em função da temperatura nos dispositivos laterais obtidos por eletrodeposição na estrutura de aglomerados ferromagnéticos sobre silício e em contatos túnel ferromagnéticos fabricados por nanolitografia.

### Eletrodeposição

Os aglomerados de FeNi sobre silício tipo-n foram obtidos por eletrodeposição com corrente constante de  $-3.4\text{mA}$  e tempo de deposição de 8s para obtenção de filmes não percolados. O procedimento experimental utilizado foi o mesmo apresentado no capítulo 1 para obtenção de filmes FeNi.

### RESULTADOS

A configuração utilizada para medida elétrica e um esquema com o caminho percorrido pela corrente entre aglomerados é mostrado na Figura 3.3a. Na Figura 3.3b uma imagem dos aglomerados realizada por MEV é apresentada e na Figura 3.3c a curva  $I \times V$  obtida, com região linear entre  $-8\text{mA}$  e  $8\text{mA}$ .

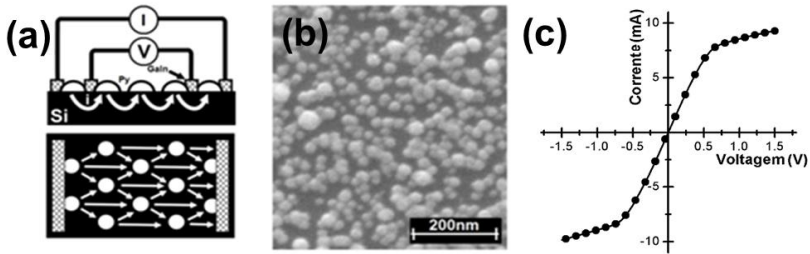


Fig. 3.3 – a) corrente entre aglomerados, b) Imagem MEV dos aglomerados e c) curva  $I \times V$ .

As medidas magnetorresistivas realizadas no substrato de silício e em amostras obtidas por eletrodeposição de FeNi, com diferentes tempos entre 8s e 120s, obtidas nas configurações longitudinal e transversal entre a corrente elétrica e o campo magnético aplicado (Figura 3.4a), mostram a evolução da magnetorresistência ordinária (OMR) do silício com caráter parabólico devida a ação das forças de Lorentz sobre os

portadores (Figura 3.4b) até a magnetorresistência anisotrópica (AMR) própria dos filmes percolados (Figura 3.4c). Nos metais ferromagnéticos, a interação spin-órbita com os elétrons de condução tem dependência com a orientação da magnetização imposta pelo campo magnético aplicado e a corrente elétrica. Na configuração longitudinal da corrente com o campo, os espalhamentos dos elétrons de condução dos orbitais *sp* para os orbitais *d* mais localizados são facilitados, portanto a resistência aumenta com o campo e a curva AMR característica tem pico apontado para baixo enquanto que na configuração transversal estes espalhamentos são diminuídos, a resistência diminui com o campo e o pico característico da curva aponta para cima. Na curva da Figura 3.4d a magnetorresistência obtida em aglomerados não percolados nas configurações longitudinal e transversal tem característica de Magnetorresistência gigante (GMR) encontrada em estruturas FM/NM/FM.

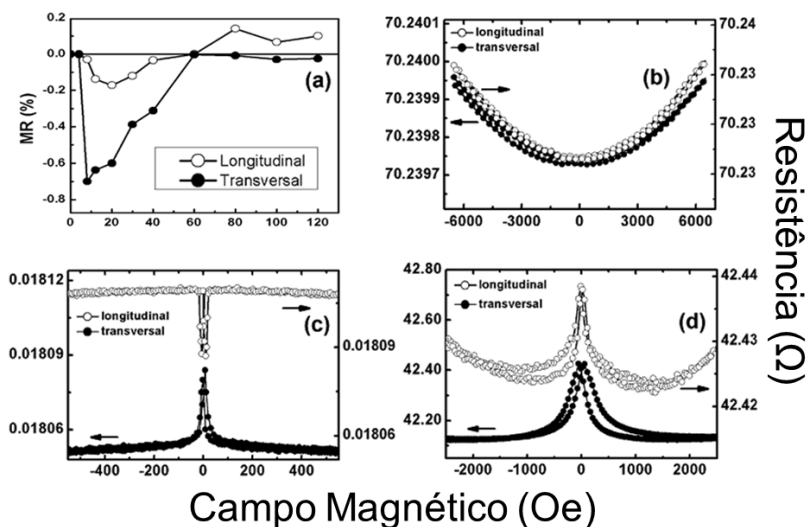


Fig. 3.4 – a) MR em função do tempo de deposição, b) OMR do silício, c) AMR do filme percolado e d) GMR dos aglomerados.

A denominada GMR 2D [58], ocorre devida a polarização em spin de até 0.7% da corrente elétrica que flui de aglomerado para aglomerado através do silício em distâncias de até 2mm. Para análise da ocorrência de fenômenos de superfície, como magnetorresistência balística (BMR)

[59] em caminhos percolativos entre aglomerados ou magnetorresistência túnel (TMR) [60] através do óxido de silício que cresce entre aglomerados nas amostras descobertas, uma camada de 2nm de ouro foi crescida por evaporação para recobrimento da amostra. As curvas de magnetização da Figura 3.5, realizadas em função da temperatura em magnetômetro de amostra vibrante (VSM), são interpretadas como superposições de curvas de magnetização de aglomerados com diferentes diâmetros e, conseqüentemente, diferentes coercividades. A magnetização dos aglomerados não é alterada com a variação de temperatura.

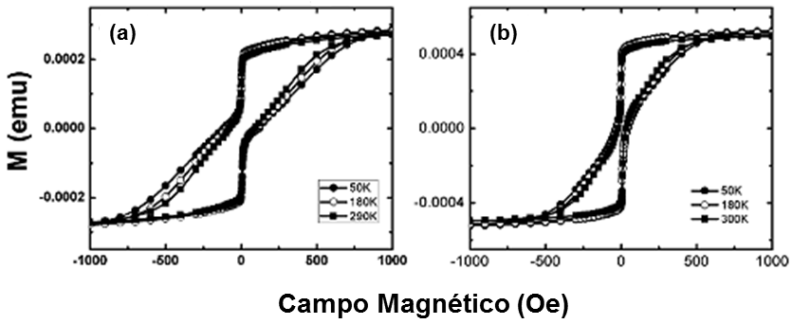


Fig. 3.5 – a) Curva de magnetização em função da temperatura em amostra com 10s de deposição e com b) 20s de deposição.

A análise das medidas magnetorresistivas realizadas em temperaturas entre 5 e 300K nas curvas mostradas na Figura 3.6, mostra a inexistência de efeitos de superfície e comprova a GMR2D que surge da injeção de corrente polarizada em spin no silício. As curvas realizadas a 300K apresentam pico central característico da GMR2D das estruturas aglomerados/Si e picos laterais associados à AMR de aglomerados de maior diâmetro, tanto na amostra coberta por ouro quanto na descoberta. Com a diminuição da temperatura, o pico central diminui até desaparecer na amostra coberta por ouro a 5K, enquanto que na amostra não coberta o pico central é mantido.



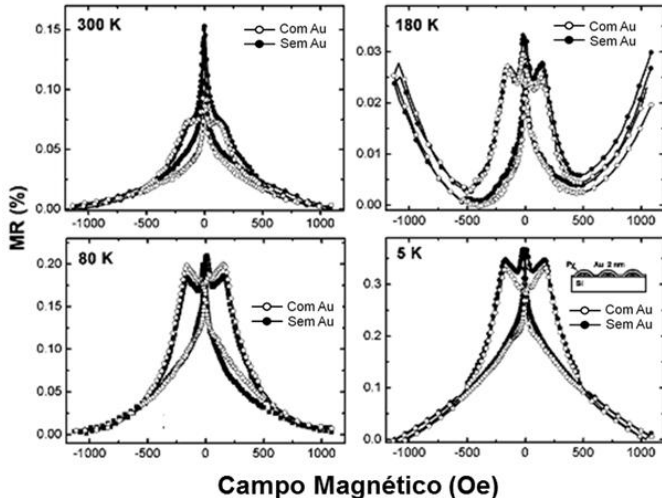


Fig. 3.6 – Medidas MR em função da temperatura em amostras com 10s de deposição descobertas e cobertas com Ouro.

O desaparecimento do pico na amostra coberta por ouro a baixa temperatura esta associada à diferença da relação entre as resistências do ouro e do silício com a temperatura. Na temperatura ambiente o silício de 500um de espessura tem resistividade de  $9\Omega\cdot\text{cm}$  e portanto resistência menor do que a fina camada de 2nm de ouro, com a diminuição da temperatura a resistividade do silício aumenta para  $10^5\Omega\cdot\text{cm}$ , como pode ser visto na curva de resistência em função da temperatura mostrada na Figura 3.7, e a corrente que antes passava spin polarizada pelo silício começa a fluir pelo ouro e perde sua polarização.

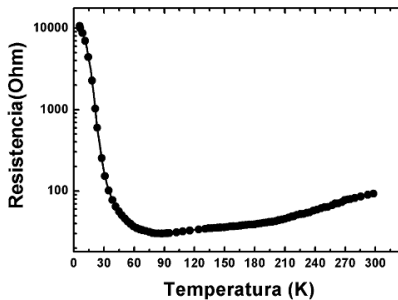


Fig. 3.7 – Resistência do silício em função da temperatura com valor mínimo a 80K.

A injeção e detecção de spin em silício pouco dopado, mesmo que em valores modestos de polarização, foi realizada na configuração FM/SC/FM nas amostras com aglomerados obtidos por eletrodeposição, com distâncias de separação entre aglomerados de aproximadamente 50nm.

## **Nanolitografia**

Para uma análise mais detalhada do transporte entre aglomerados, um sistema menos complexo com dois eletrodos definidos por nanolitografia sobre silício recoberto por fina camada óxida foi realizado no LABNANO/CBPF. O treinamento em litografia e microfabricação, realizado pelo aluno nos estágios de doutorado na Itália e Inglaterra, foi muito importante para a realização do projeto e fabricação dos nanocontatos.

## **Procedimento experimental**

Inicialmente o substrato de silício foi mergulhado em HF 5% por 20s para remoção da camada de óxido nativo e uma fina camada de alumina ( $Al_2O_3$ ) de 2nm foi crescida na evaporadora Thermionics com aquecimento do alvo por feixe de elétrons. Para a etapa de nanolitografia uma camada de 250nm de PMMA foi depositada sobre o substrato por *spin coating* a 4000 rpm por 1min e um cozimento de 10 min foi realizado em chapa quente a 180°C. A amostra foi inserida na câmara do sistema de nanolitografia por feixe de elétrons da Raith e, após uma calibração de posicionamento e diâmetro do feixe, o PMMA foi sensibilizado na região dos contatos. Com a revelação do PMMA, as regiões sensibilizadas pelo feixe de elétrons ficam abertas para a metalização. Após a evaporação de 30nm de níquel, a amostra foi inicialmente mergulhada por 5 min em acetona e em seguida submetida a mergulhos de 2s em banho com agitação por ultrassom para a realização do lift-off e definição dos contatos.

## RESULTADOS

### Nanofabricação

Os contatos obtidos por nanolitografia são apresentados na Figura 3.8.

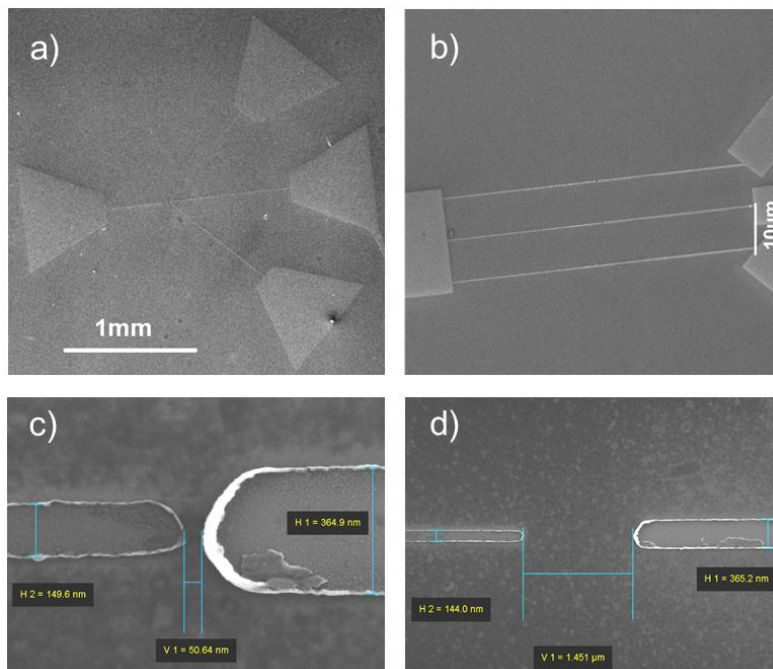


Fig. 3.8 – a) Dispositivo com *pads* utilizados no contato elétrico, b) linhas com diferentes separações, c) menor distância entre linhas e d) maior distância entre linhas.

### Caracterização magnética

A curva de magnetização realizada por VSM em configuração longitudinal aos contatos, apresentada na Figura 3.9, mostra que os contatos de Ni nanofabricados apresentam coercividade de aproximadamente 10 oersted.

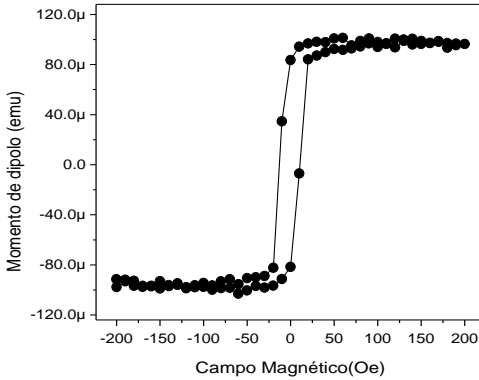


Fig. 3.9 – Curva de magnetização realizada na orientação longitudinal aos contatos.

### Magnetorresistência

Medidas magnetorresistivas na configuração de campo magnético longitudinal e transversal a corrente elétrica de 100uA, realizadas nos contatos nanofabricados com distâncias entre contato de 100nm em temperatura de 11K, são mostradas no gráfico da Figura 3.10. A separação dos picos no gráfico inserido na Figura 3.11b, ocorre pela coercividade dos contatos de Ni.

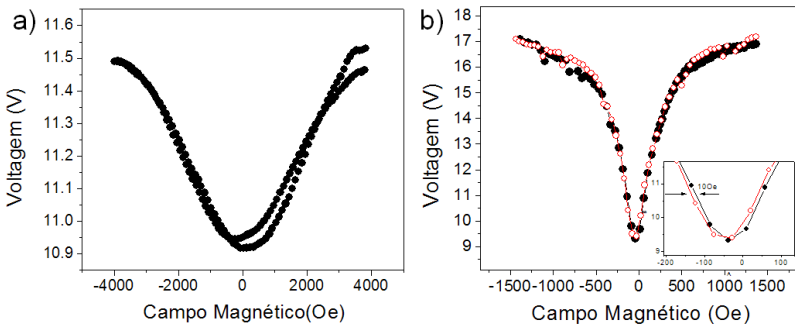


Fig. 3.10 – a) GMR longitudinal e b) transversal medida em contatos separados por 100nm a 11K com aproximação da região dos picos inserida.

A medida local de injeção e detecção de spin em silício com valores de polarização de até 74% medida nos contatos nanolitografados é mais alta do que os valores encontrados nos aglomerados apresentados na primeira parte deste capítulo e em trabalho encontrado na literatura [61]. No gráfico da Figura 3.11 são apresentadas as medidas magnetorresistivas realizadas em função da separação entre contatos variando entre 100nm e 1,5 $\mu$ m.

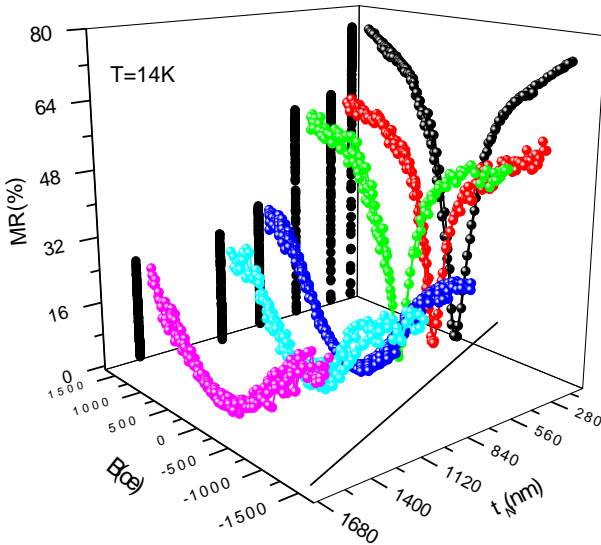


Fig. 3.11 – GMR medida em diferentes distâncias entre eletrodos a 14K.

### Comprimento de difusão de spin em silício

Do decaimento exponencial da polarização em spin obtida nas medidas magnetorresistivas em eletrodos ferromagnéticos com diferentes distâncias de canal de spin, apresentadas nos gráficos da Figura 3.12, é retirada a medida local do comprimento de difusão de spin do silício pouco dopado em diferentes temperaturas.

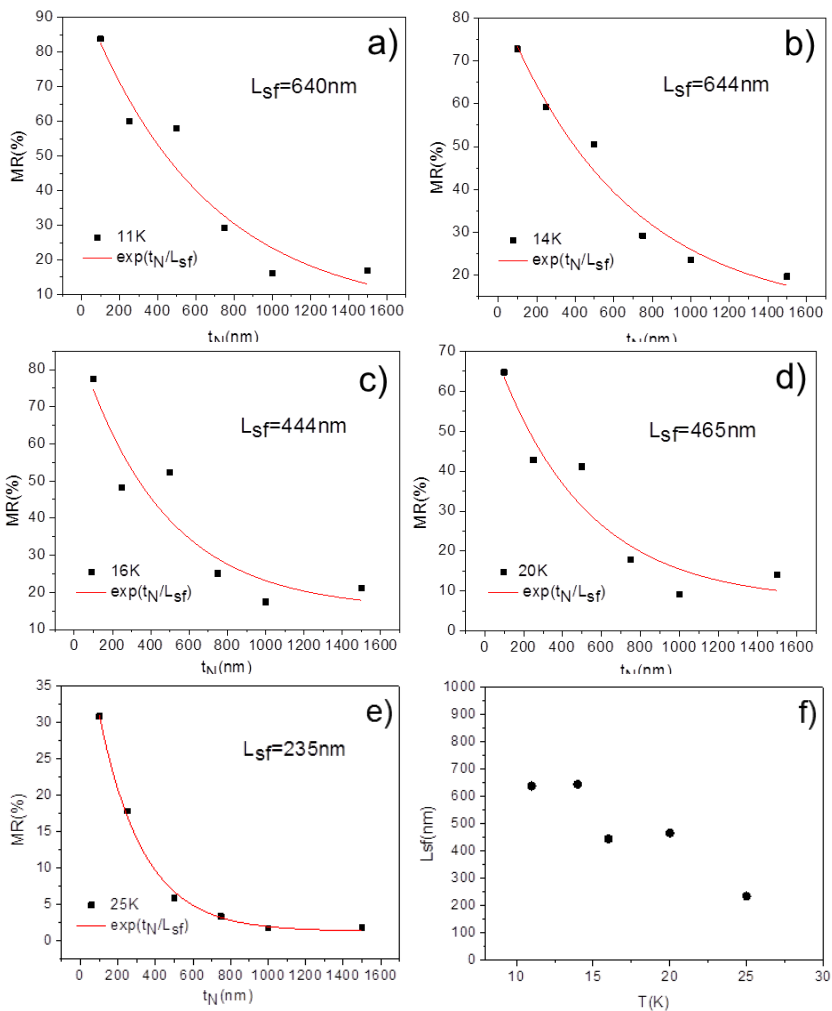


Fig. 3.12 –  $L_{sf}$  em a) 11K, b) 14K, c) 16K, d) 20K, e) 25K, obtidos a partir do decaimento exponencial da polarização com a distância entre eletrodos e f)  $L_{sf}$  em função de T.

A diminuição da polarização em spin em função da temperatura na menor distância de canal de 100nm é mostrada nas curvas de GMR da Figura 3.13. A polarização é próxima de zero a partir da temperatura de 30K.

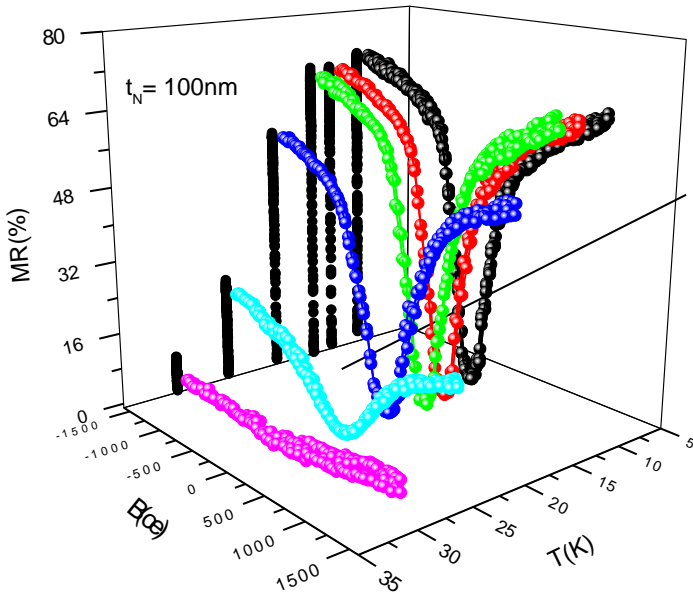


Fig. 3.13 – GMR medida na distância entre eletrodos de 100nm em diferentes temperaturas.

### Discussão dos Resultados

A alta polarização em spin medida nos dispositivos com canal de spin entre 100 e 500nm ocorre devido à distância destes canais serem menores que o comprimento de difusão de spin encontrado para o silício neste trabalho, portanto a maioria dos elétrons injetados em um eletrodo alcança o outro eletrodo sem que ocorra a inversão do seu spin. O desaparecimento deste efeito com o aumento da temperatura está associado à janela imposta pela Equação 6 e a alta variação da resistividade do silício com a temperatura. A baixas temperaturas, a resistividade do silício aumenta em 4 ordens de grandeza e as resistências  $r_1$  e  $r_2$  dos eletrodos satisfazem a condição da Equação 6. Como pode ser visto na dependência entre a resistividade do silício e a temperatura, mostrada na Figura 3.7, a partir da temperatura de 30K a

resistividade do silício diminui de mais de 2 ordens de grandeza e a condição para injeção e detecção de spins deixa de ser cumprida. O comprimento de difusão de spin para o silício de 644nm a baixas temperaturas pôde ser encontrado através do decaimento exponencial dos valores de magnetorresistência nos contatos distantes de até 1.5um devido ao comprimento da condição de resistências com diminuição de  $r_2$  e o aumento de  $r_1$  em apenas uma ordem de grandeza.

### **Sugestões Para Trabalhos Futuros**

- ✓ Eletrodeposição de aglomerados ferromagnéticos sobre silício recoberto com fina camada de óxido, para estudo da influência da resistividade da interface na GMR2D.
- ✓ Utilização de silício de alta resistividade no dispositivo nanolitografado para obtenção de polarização de spin em silício a temperaturas próximas da ambiente.
- ✓ Teste em eletrodos nanofabricados diretamente sobre silício para análise da contribuição da resistência de interface na polarização em spin no silício.
- ✓ Utilização de silício super dopado para análise da influência da região de depleção Schottky/túnel na polarização em spin.

### **Conclusão Geral**

Nos TBMs estudados nesta tese, os emissores óxidos semicondutores tipo-n e tipo-p, crescidos por eletrodeposição sobre as bases da liga FeNi, apresentaram resistividade diminuída de ordens de grandeza em relação aos óxidos semicondutores tipo-p intrínsecos, utilizados anteriormente em trabalhos realizados no LFFS. Das medidas de transistor foi possível observar altos ganhos em base-comum e emissor-comum no transistor NMN. O aumento da espessura da base, que proporciona uma redução da permeabilidade do transistor PMP, causou uma pequena diminuição no ganho em base-comum e emissor-comum e a diminuição da parcela de corrente de coletor não dependente de spin proporcionou a medida de magnetocorrentes de até 30% nestes dispositivos. Magnetoamplificações negativas de até 120% foram medidas na configuração emissor-comum. O estudo das etapas de



microfabricação, realizadas em estágio de doutorado na Itália e sua conformidade com a linha de fabricação, mostra que estes dispositivos têm potencial aplicação na indústria.

Em segundo estágio de doutorado, realizado na Universidade de Plymouth na Inglaterra, foi testada a fabricação de junções túnel para futura aplicação em transistores magnéticos de junção túnel (TMJT). A boa qualidade das multicamadas crescidas por *sputtering* após recozimento, com orientação cristalina da fina camada isolante de MgO seguindo a orientação cristalina das camadas ferromagnéticas foi verificada. A anisotropia magnética obtida com a inserção da camada antiferromagnética e o tunelamento coerente pela camada óxida, proporcionou a obtenção de valores relativos de resistência na junção em função do campo magnético de até 120%. Melhorias nos processos utilizados na microfabricação como uniformidade do desbaste físico e remoção do fotorresiste são necessários para obtenção de maiores magnetorresistências.

A medida local de injeção e detecção no dispositivo lateral nanofabricado, proporcionou obtenção de valores de polarização em spin no silício de 74% a temperatura de 11K. Pelo cumprimento da condição de injeção e detecção imposta pela relação entre a resistência de interface e as resistências do canal de spin no silício, e a medida de polarização local em contatos com diferentes distâncias de separação, foi obtido o comprimento de difusão de spin no silício pouco dopado a baixas temperaturas.

## Bibliografia

1. N. F. Mott, Proc. R. Soc. 153, 699 (1936).
2. A. Fert and I. A. Campbell, Phys. Rev. Lett. 21, 1190 - 1192 (1968)
3. G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn Phys. Rev. B 39, 4828–4830 (1989)
4. M. N. Baibich et. al., “Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices”, Phys. Rev. Lett. 61, 2472 - 2475 (1988).
5. B. Dieny et al., “Spin valves,” in *Magnetoelectronics*, M. Johnson, Ed. Oxford, U.K.: Elsevier, (2004), pp. 67–149.
6. C. Chappert, A. Fert and F. N. Van Dau, Nature Materials Vol 6 (2007)
7. D. J. Monsma et al., Science 281, 407 (1998)
8. J. Maton and A. Umersk, Phys. Rev. B 63, 220403 (2001)
9. S. Datta and B. Das, Appl. Phys. Lett. 56, 665 (1990)
10. A. Rose, Interim Report No. 6A RCA June (1960).
11. M. M. Atalla and D. Kahng, IRE-AIEE Solid State Device Research Conference, July (1962).
12. D. V. Geppert et al., Proc. IRE 50, 1527 (1962).
13. C. R. Crowell, S. M. Sze, Phys. Rev. Lett. 15 659 (1965)
14. K. K. Ng, *Complete Guide to Semiconductor Devices*, 2nd ed. (Wiley, New York, 2002).
15. P. S. Anil Kumar, R. Jansen, O. M. J. van’t Erve, R. Vlutters, P. de Haan, J. C. Lodder, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 214 L1 (2000).
16. R. G. Delatorre, M. L. Munford, R. Zandonay, and A. A. Pasa, W. Schwarzacher, M. S. Meruvia and I. A. Hümmelgen, Appl. Phys. Lett. 88, 233504 (2006).
17. M. S. Meruvia, I. A. Hümmelgen, M. L. Sartorelli, A. A. Pasa, and W. Schwarzacher, Appl. Phys. Lett. 84, 3978 (2004).
18. E. Duhme and W. Schottky, Naturwiss. 18, 735 (1930).
19. W. Schottky and F. Waibel, Phys. Z. 34, 858 (1933).
20. W. Schottky and F. Waibel, Phys. Z. 36, 912 (1935).
21. L. O. Grondahl, Science 64, 306 (1926)
22. C. Wadia, A. P. Alivisatos, and D. M. Kammen, Environ. Sci. Technol. 43, 2072 (2009).
23. M. A. Rafea and N. Roushdy, J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 015413 (2009).

24. B. S. Li, K. Akimoto, and A. Shen, *J. Cryst. Growth* 311, 1102 (2009).
25. H. Raebiger, S. Lany, and A. Zunger, *Phys. Rev. B* 76, 045209 (2007).
26. S. Ishizuka et al., *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002)
27. X. Han, *Thin Solid Films* 518 (2010) 5363–5367
28. L. Zao et al., *IEE Elec. Dev. Lett.* (2008)
29. S. Sung et al., *Appl. Phys. Lett.* 97, 222109 (2010)
30. E.R. Spada, L.S. de Oliveira, A.S. da Rocha, A.A. Pasa, G. Zangari, M.L. Sartorelli, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 272–276 (2004)
31. J. A. Switzer, R. Liu, E. W. Bohannon, F. Ernst, *Journal of Physical Chemistry B* 106 12369 (2002).
32. N. Toyama, *J. Appl. Phys.* 64, 2515 (1988)
33. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Edition, Wiley, New York, (1981).
34. A. P. Chatterjee, A. K. Mukhopadhyay, A. K. Chakraborty, R. N. Sasmal, S. K. Lahiri, *Materials Letters* 11 (1991) 358-362
35. C. O. Bozler, *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, N°1 (1982)
36. D. J. Monsma, *Spin Valve Transistor*, tese de doutorado (1998)
37. N. Rangaraju, *Phys. Rev. Lett.* 105, 117202 (2010)
38. Nagahama, Saito, and Yuasa, *Appl. Phys. Lett.* 96, 112509 (2010)
39. R. G. Delatorre, M. L. Munford, Q. Zhou, A. A. Pasa, and W. Schwarzacher, *Physica Status Solidi* 204, 940 (2007).
40. M. Honda et al. *Toward the Controlable Quantum States* (pp 44-47)
41. Russel et al, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 85, No. 19, 8 November (2004)
42. D. Wang, C. Nordman, J. Daughton, Z. Qian and J. Fink, *IEEE Trans. Magn.* 40 2269 (2004)
43. S. Yuasa and D. D. Djayaprawira, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (2007) R337–R354
44. S. Yuasa, Y. Suzuki, T. Katayama and K. Ando, *Appl. Phys. Lett.* 87 242503 (2005)
45. Y. Du, G. Pan, R. Moate, H. Ohldag, A. Kovacs, and A. Kohn, *Applied Physics Letters* 96, 222503 (2010)
46. W. H. Butler, X. G. Zhang, T. C. Schulthess and J. M. MacLaren, *Phys. Rev. B* 63 054416 (2001)

47. J. Mathon, A. Umersky, Phys. Rev. B 63 220403R (2001)
48. D. D. Djayaprawira et al Appl. Phys. Lett. 86 092502 (2005)
49. Y. M. Lee et al Appl. Phys. Lett. 90 212507 (2007)
50. A. Fert, J. M. George, H. Jaffrès, R. Matana, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 54, N°. 5, May (2007)
51. M. Tran et al., Phys. Rev. Lett. 102, 036601 (2009)
52. P. C. van Son, H. van Kempen, and P. Wyder, Phys. Rev. Lett. 58, 2271 (1987)
53. I. Zutic, J. Fabian and S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys. 76, 323 (2004)
54. E. Rashba, Phys. Rev. B 62 R46267 (2000)
55. G. Schmidt et al., Phys. Rev. B 62 (2000)
56. A. Fert and H. Jaffrès, Phys. Rev. B 64, 184420 (2001)
57. T. Valet and A. Fert, Phys. Rev. B 48, 7099–7113 (1993)
58. C. I. L. de Araujo, Appl. Phys. Lett. (1998)
59. N. Garcia, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 240, (2002)
60. S. Krzyk, A. Schmidsfeld, M. Kläui and U. Rüdiger, New Journal of Physics 12 (2010)
61. M. Ziese, Spin Electronics, Martin J. Thornton (2000)