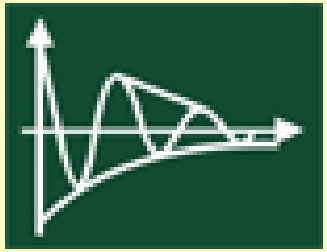
Nanomagnetismo

Parte 5

Escola do CBPF 2008



Nanomagnetismo

Escola do CBPF – 2008

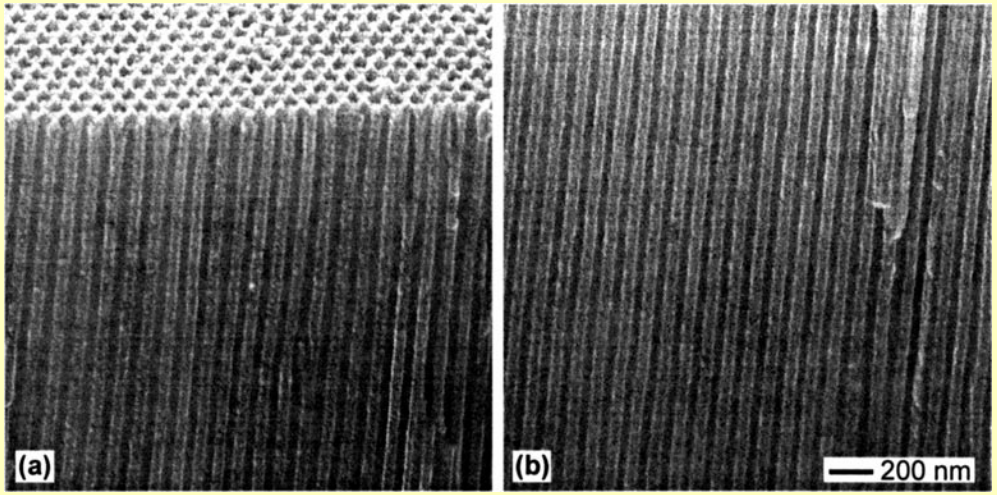
Alberto P. Guimarães
Renato A. Silva

1	• **Introdução**	14/07
2	• **Preparação e Caracterização; Magnetismo de Pequenas Partículas**	15/07
3	• **Filmes Finos e Multicamadas**	16/07
4	• **Outros Sistemas de Baixa Dimensionalidade**	17/07
5	• **Propriedades de Transporte**	18/07

Revisão Parte 4

Nanofios

Um método de fabricação de nanofios emprega a eletrodeposição sobre uma rede de poros de uma membrana de Al_2O_3



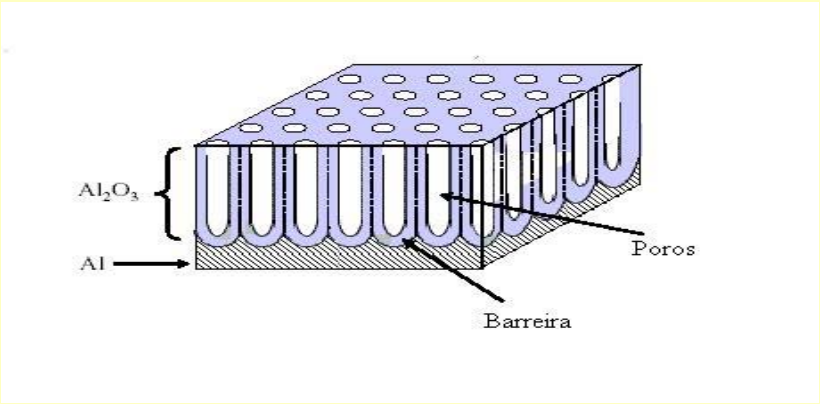
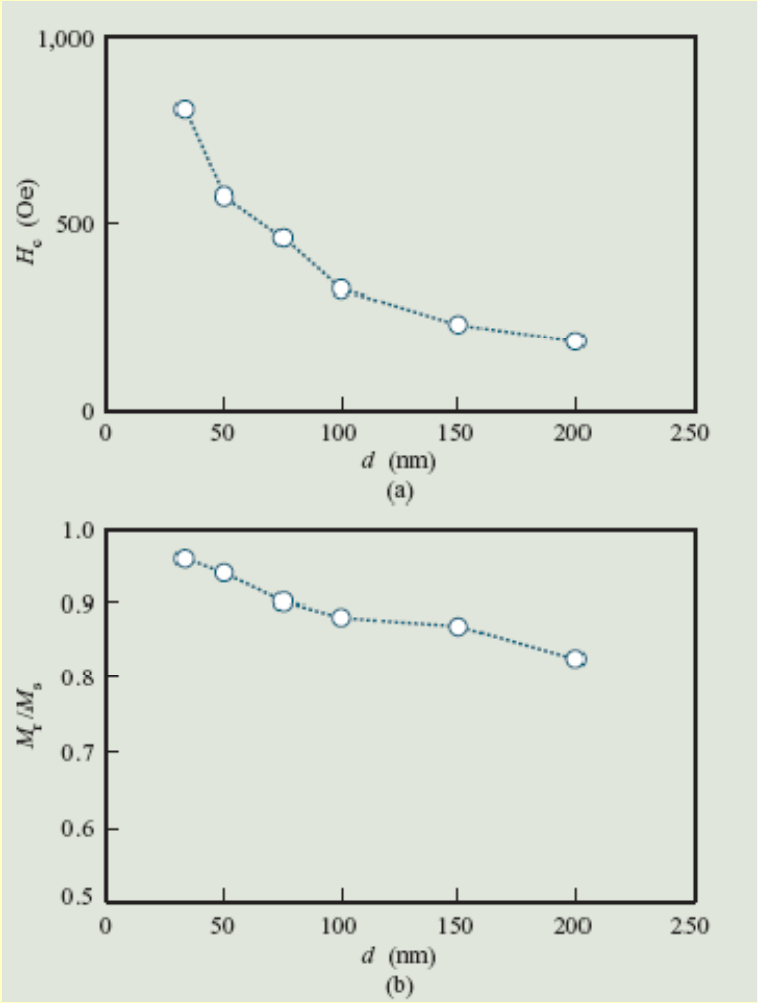


Imagem de microscópio eletrônico de varredura de uma rede ordenada de nanoporos

Sellmyer (2001)

Coercividade e remanência de nanofios



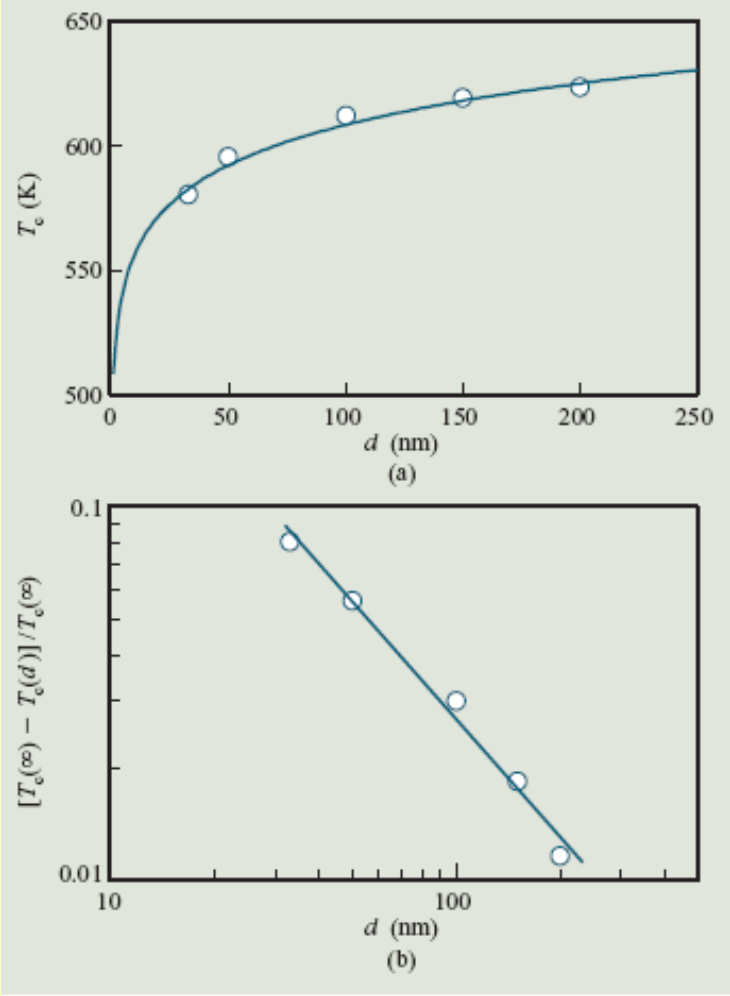
Coercividade e remanência/M_s de nanofios de Ni em função do diâmetro

Chien

Ordem magnética em nanofios

TC de Nanofios de Ni vs. diâmetro

Gráfico log-log de TC(∞)-TC(d)/TC(∞)

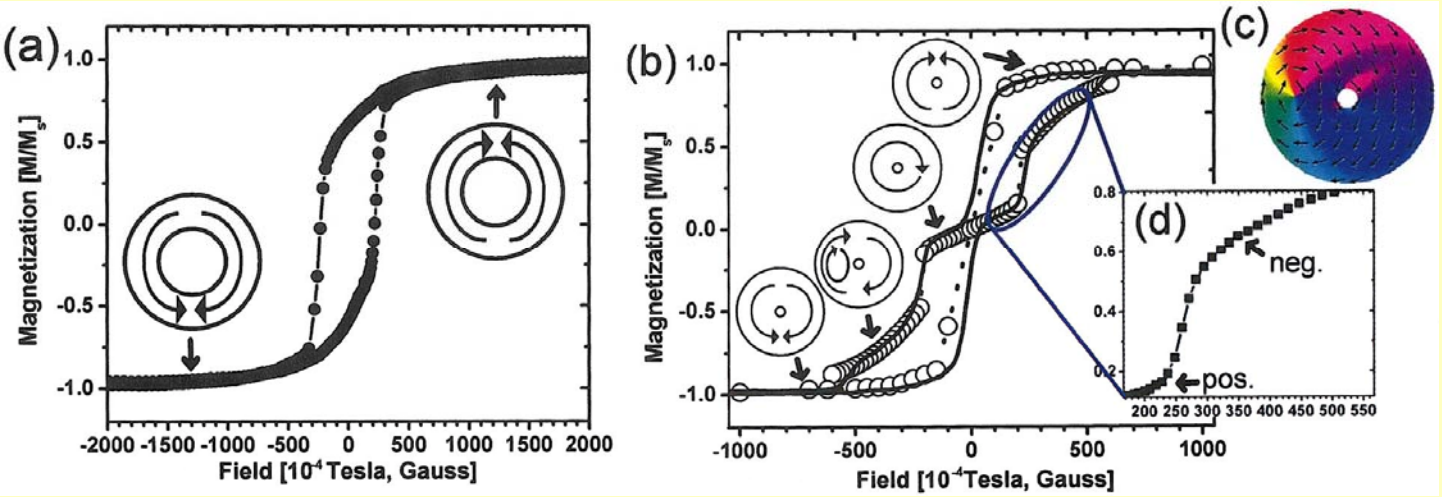


(Chien 2005)

Anéis magnéticos

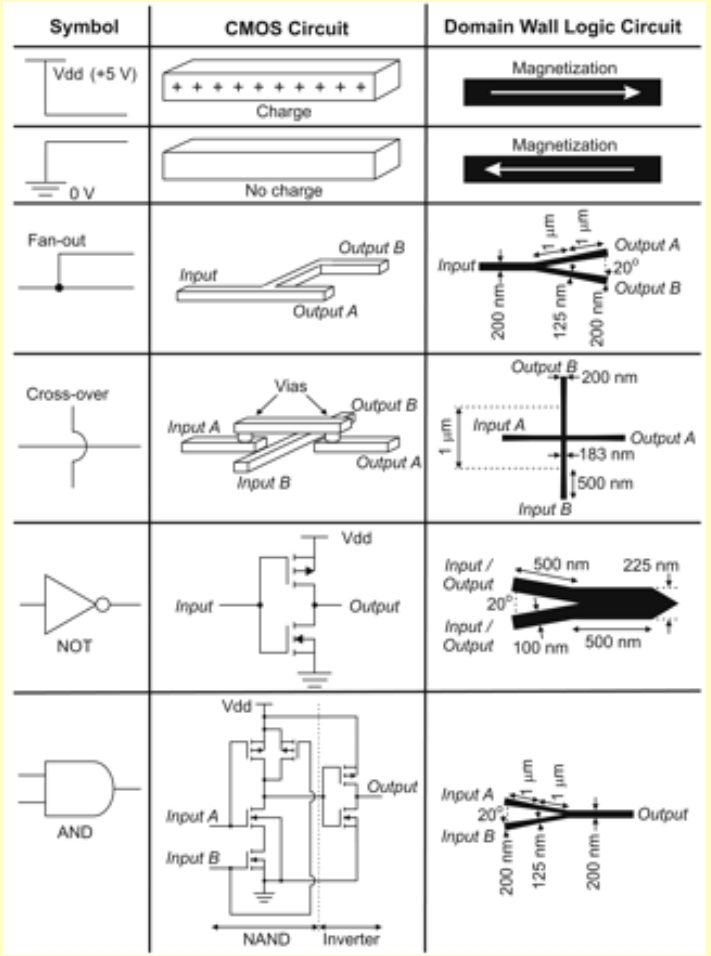
Dois exemplos de inversão da magnetização em anéis magnéticos.

a) inversão da magnetização de um anel com diâmetro interno grande. A magnetização segue a forma "cebola"
b) inversão em anel com diâmetro interno pequeno. Forma-se um vórtice.



Klaui (2004)

Circuitos com paredes de domínios



Exemplos de circuitos de nanofios empregando paredes de domínios e os equivalentes lógicos

Propriedades de transporte

Magneto-resistência
- Comprimento de difusão de spin
- Tipos de magneto-resistência
- Magneto-resistência gigante (MRG)

Injeção de spin
- Spintrônica

Magneto-resistência túnel (MRT)
- Tunelamento quântico
- Tunelamento de spin

Chaveamento induzido por corrente

Efeito Hall de spin

Magneto-resistência

É o fenômeno da mudança da resistência sob a ação de um campo magnético

Sua medida quantitativa é dada por

$$MR(\%) = \left(\frac{R_H - R_0}{R_0}\right) \times 100$$

onde R_H e R_0 são as resistências com campo e sem campo.

Tipos de magneto-resistência

Magneto-resistência anisotrópica

- surge da interação spin do elétron-momento orbital do átomo da matriz (depende do ângulo entre a magnetização e a corrente)

Magneto-resistência de Lorentz

- resulta da curvatura das órbitas eletrônicas no campo aplicado e conseqüente aumento da trajetória percorrida

Magneto-resistência gigante

- resulta da diferença de espalhamento do spin nas regiões com diferentes direções de magnetização (em multicamadas e sistemas granulares)

Magneto-resistência colossal

- análoga à anterior, com as diferentes regiões em escala atômica (em perovskitas)

Magneto-resistência de paredes de domínios:

- devida à dependência com o campo do espalhamento de elétrons nas paredes de domínios (Viret et al. (1996)), (Levy e Zhang (1997)).

Magneto-resistência balística:

- efeito observado em nanocontactos, devido à dependência com o spin do espalhamento eletrônico em paredes em nanocontactos (Doudin e Viret (2008)).

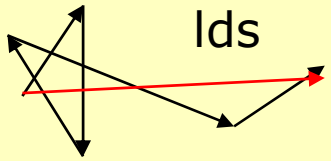
Modelo de Duas Correntes

- o fluxo de elétrons é composto de duas correntes (spin ↑ e spin ↓)
- as correntes não interferem uma com a outra
- a resistividade dos ferromagnetos e das interfaces depende do spin

Comprimento de difusão de spin

Um elétron que se difunde num meio realiza um processo de caminhada aleatória. Vamos considerar que ele sofre N colisões até inverter o seu spin. Nesse momento ele se encontra a uma distância do ponto de partida dada por:

$$l_{ds} = \sqrt{N}\lambda_{lcm}$$



que é o comprimento de difusão de spin e λ_{lcm} é o livre caminho médio

O elétron terá percorrido uma trajetória de comprimento

$$N\lambda_{lcm} = v_F\tau$$

onde v_F é a velocidade dos elétrons no nível de Fermi e τ é o tempo de relaxação de spin.

Combinando as equações, obtemos

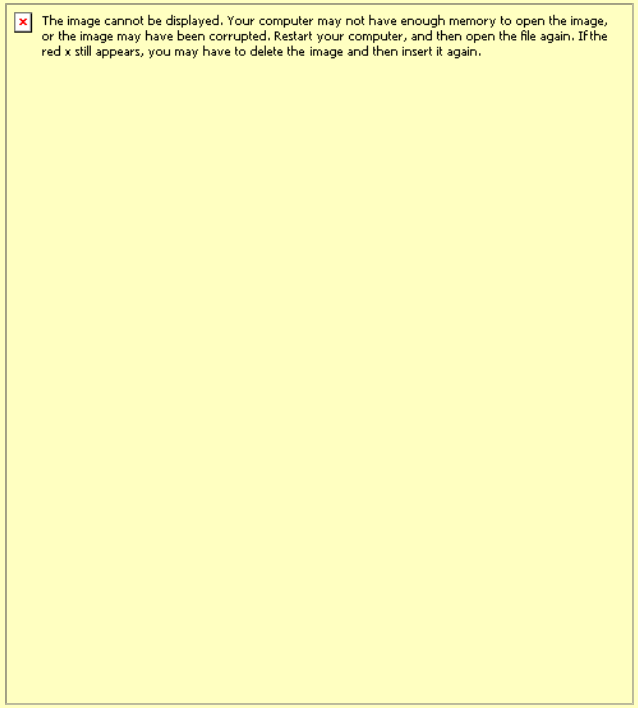
$$l_{ds} = \sqrt{\lambda_{lcm} v_F \tau}$$

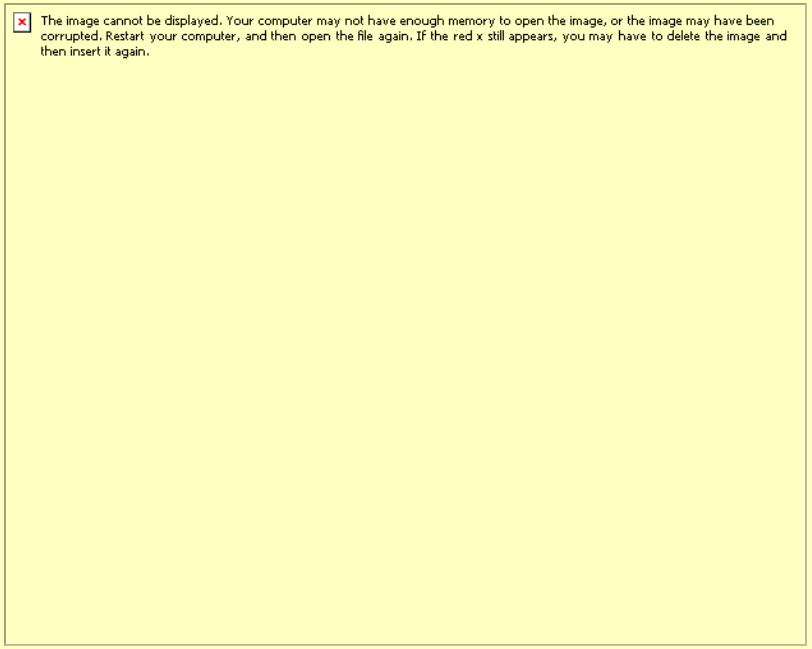
Dennis (2002)

Comprimentos de difusão de spin

	Temperatura (K)	l_{sd} (nm)
Co	4.2	$\geq$ 40
Fe	4.2	8.5 $\pm$1.5
Ni	4.2	21 $\pm$2
Py	4.2	5.5 $\pm$1
Py	293	3
$Co_{91}Fe_9$	4.2	12 $\pm$1
Cu	293	500–700

Magneto-resistência gigante (MRG)



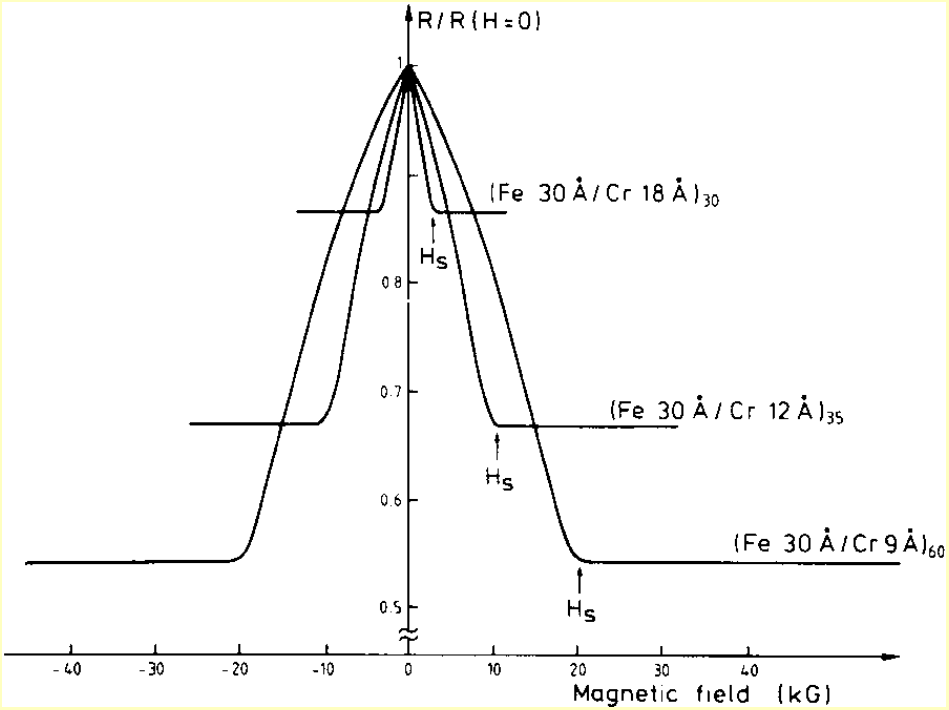


Albert Fert e Peter Grünberg, Prêmio Nobel 2007, pelos estudos com a MRG

A magneto-resistência do sistema Cr/Fe

Magneto-resistência de multicamada $(Cr/Fe)_n$ medida a 4,2 K

Com 60 pares Cr/Fe e campo de 2 T a 4,2 K, resulta MR=50%



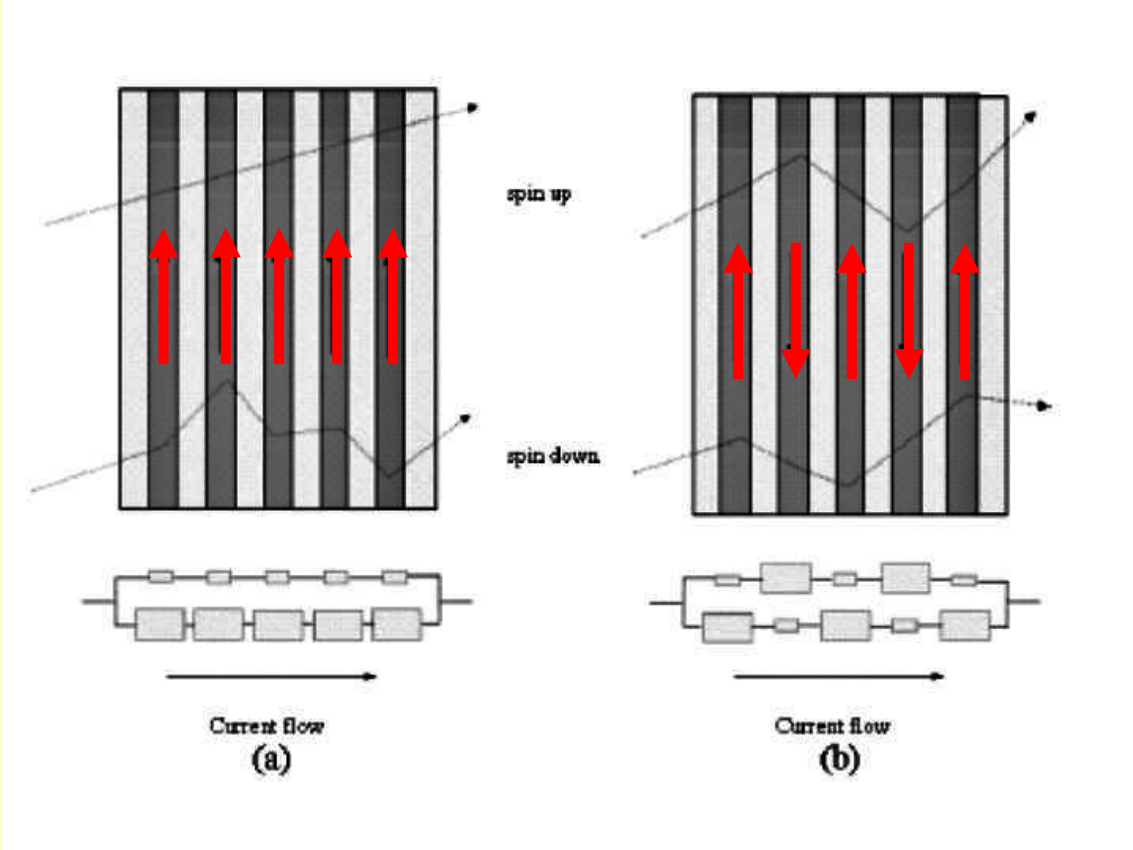
A partir de 1997, efeito é empregado nas cabeças de leitura dos computadores IBM

Baibich (1988)

Magneto-resistência gigante (MRG ou GMR)

É a magneto-resistência mais importante

A descrição mais simples deste efeito é dada pelo modelo de rede de resistências.
As resistências das camadas FM depende do spin ˙ ou ˚ dos elétrons.

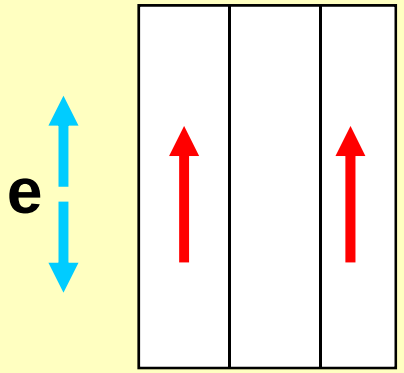


Dennis (2002)

Magneto-resistência gigante: modelo de resistências (2 camadas FM)

$$\frac{1}{R_P} = \left(\frac{1}{R_{\uparrow\uparrow} + R_{\uparrow} + R_{\uparrow\uparrow}} + \frac{1}{R_{\uparrow\downarrow} + R_{\downarrow} + R_{\uparrow\downarrow}} \right)$$

$$\frac{1}{R_{AP}} = \left(\frac{1}{R_{\uparrow\uparrow} + R_{\uparrow} + R_{\uparrow\downarrow}} + \frac{1}{R_{\uparrow\downarrow} + R_{\downarrow} + R_{\downarrow\downarrow}} \right)$$



(P é paralelo e AP antiparalelo). Supondo que a resistência elétrica das multicamadas magnéticas que têm magnetização paralela ao spin dos elétrons seja menor do que a resistência das camadas com spin e magnetização antiparalelas

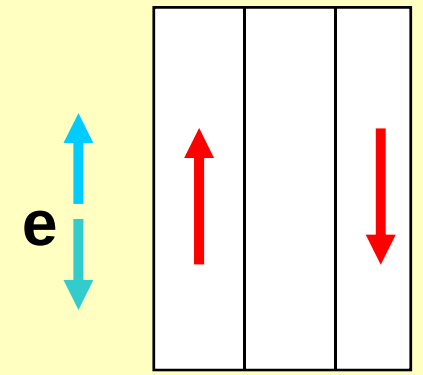
$$R_{\uparrow\uparrow} < R_{\uparrow\downarrow}$$

Supondo ainda que nas camadas não-magnéticas

$$R_{\uparrow} = R_{\downarrow}$$

Resulta

$$R_P < R_{AP}$$

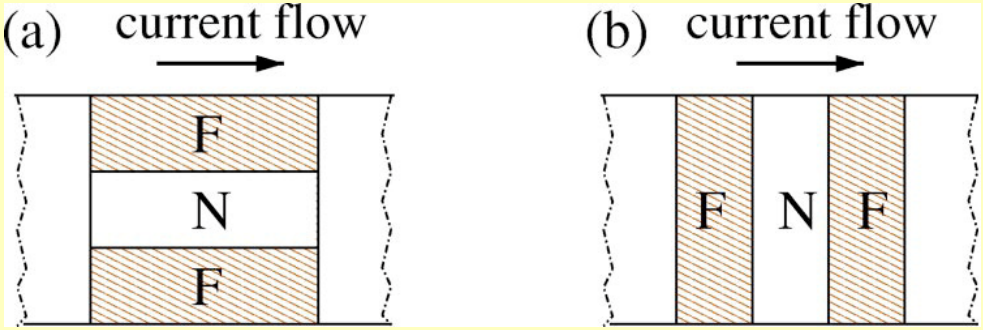


Dennis (2002)

Geometria em experimentos de MRG

CIP

CPP



a) corrente no plano (CIP) e b) corrente perpendicular ao plano (CPP)

Magneto-resistência gigante (MRG) de um nanofio

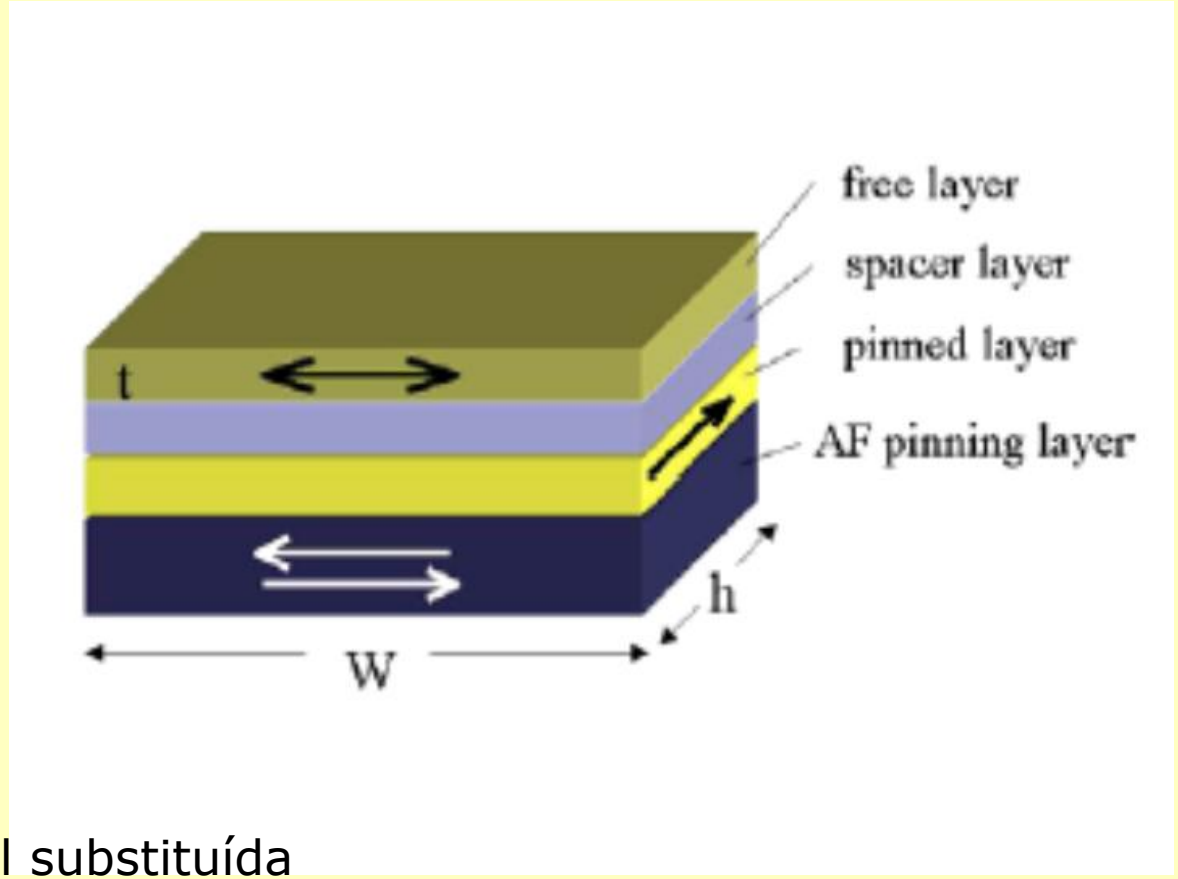
MRG de um fio com multicamada de Co/Cu



Wade e Wegrove 2005

Válvula de spin

Dispositivo baseado na MRG.
Na válvula de spin o ordenamento de uma camada FM é invertido sob a ação de um campo externo, e assim a resistividade do dispositivo para spins ˙ e ˚ pode ser controlada.



Camada AFM é em geral substituída por um AFM "artificial", bicamada com magnetizações opostas

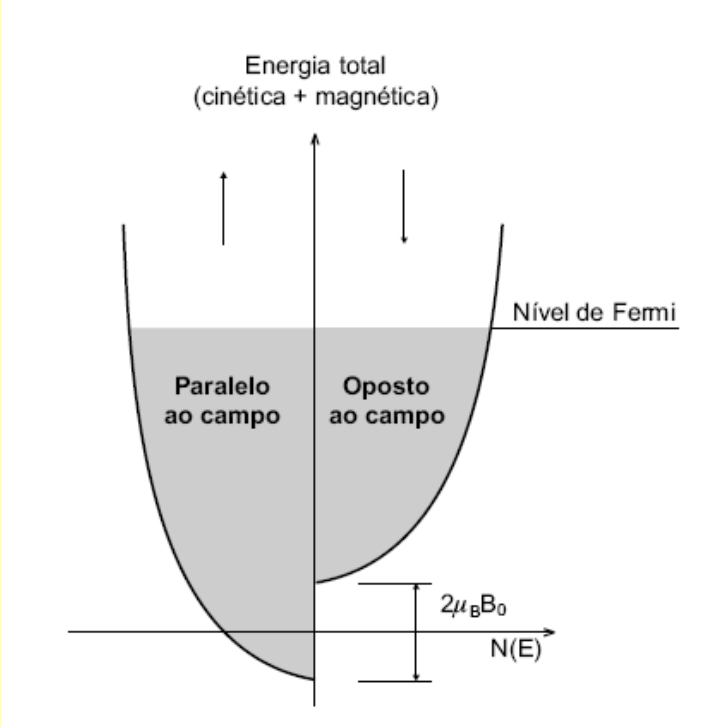
Dennis (2002)

Magnetismo de bandas

Em um campo magnético B_0, a banda se desdobra em duas sub-bandas, uma com spin para cima, outra com spin para baixo.

O deslocamento das sub-bandas é

$$\pm \mu_B B_0$$

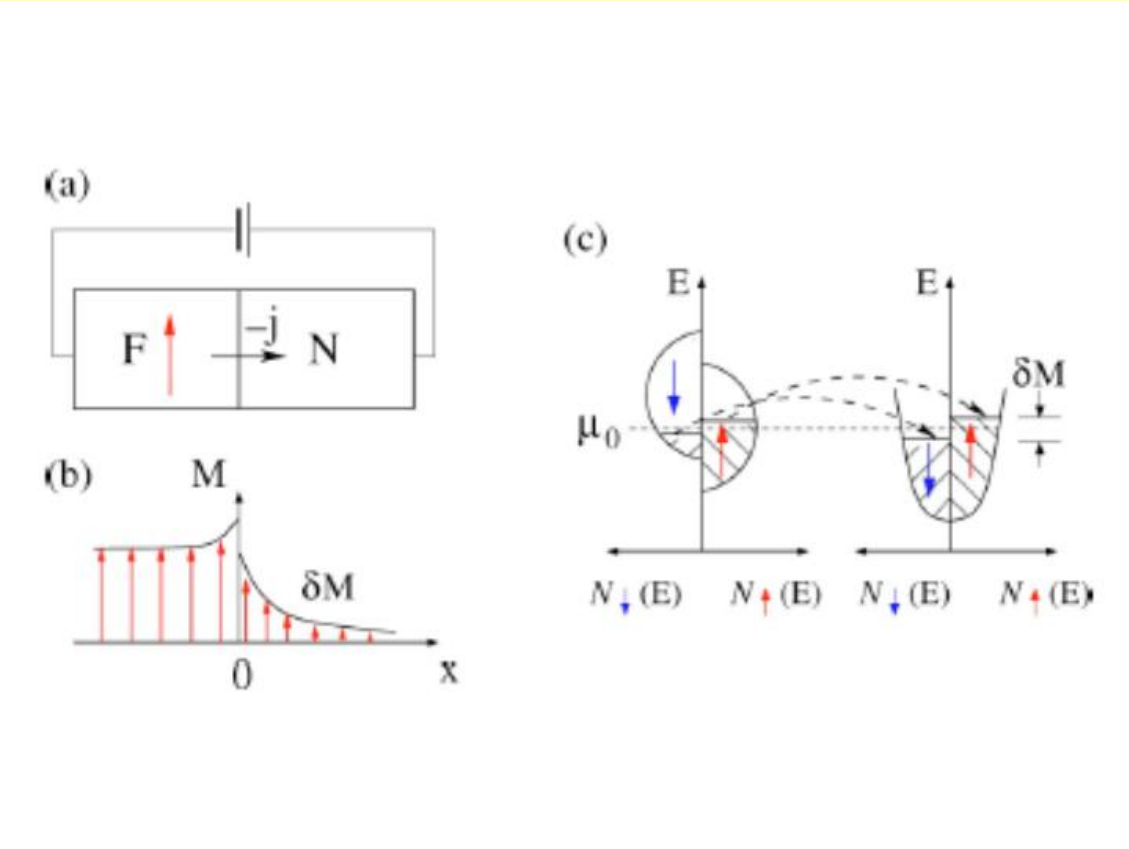


Nevil Mott (1936): a baixas temperaturas, não existe espalhamento de mágnons, e os elétrons de spin ˙ e ° em um ferromagneto não se misturam nos espalhamentos. Podemos considerar que há dois canais independentes, elétrons ˙ e °.

Injeção de spin I

Injeção de spin de um metal FM em um não-magnético (N).

a) geometria do dispositivo
b) distribuição de magnetização (mostrando magnetização injetada em N)
c) esquema de bandas



Em um FM ou em um material em contato com este existe polarização estática. O que interessa aqui é a população de spin fora do equilíbrio, que pode ser controlada externamente

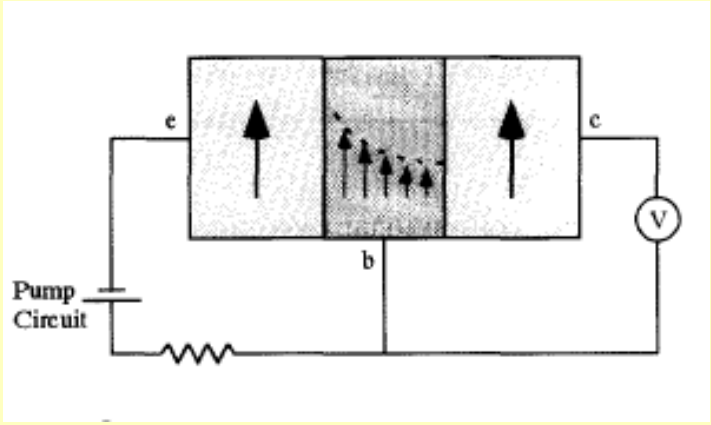
Zutic (2004)

Spintrônica

Spintrônica ou eletrônica de spin: efeitos e aplicações que dependem da capacidade de manipular separadamente elétrons de spin para cima e para baixo

A Eletrônica tradicional faz uso da carga dos elétrons – ignora o spin

As aplicações incluem sensores de campo, cabeças de leitura, memórias magnéticas de acesso aleatório (MRAM's), inversão de magnetização induzida por correntes, etc.



Primeiro dispositivo: transistor de Johnson (Gregg 1997)

Magnetorresistência túnel: tunelamento quântico

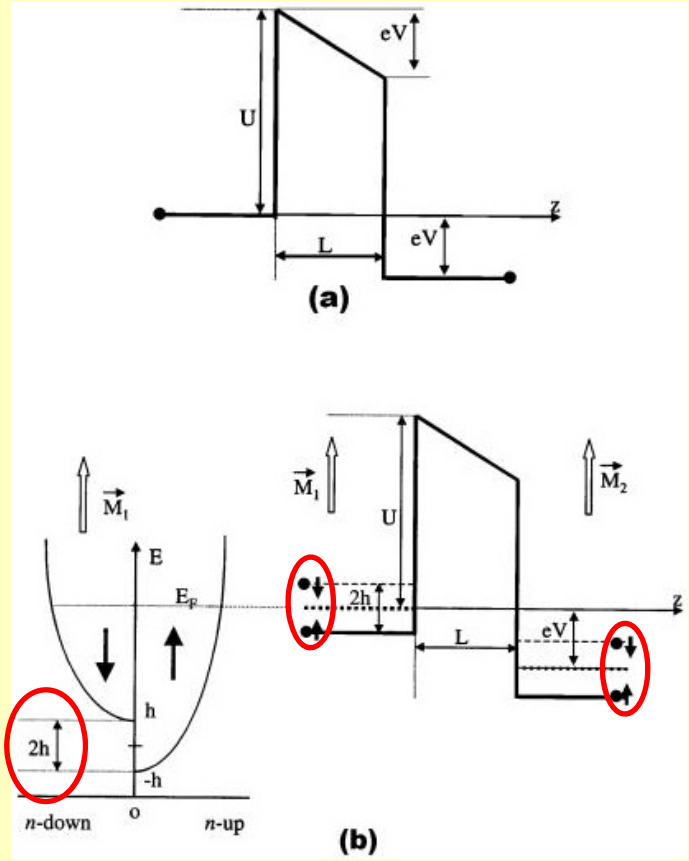
Modelo Jullière

Variação da resistência, sistema F/I/F

The image cannot be displayed. Your computer may not have enough memory to open the image, or the image may have been corrupted. Restart your computer, and then open the file again. If the red x still appears, you may have to delete the image and then insert it again.

Polarização

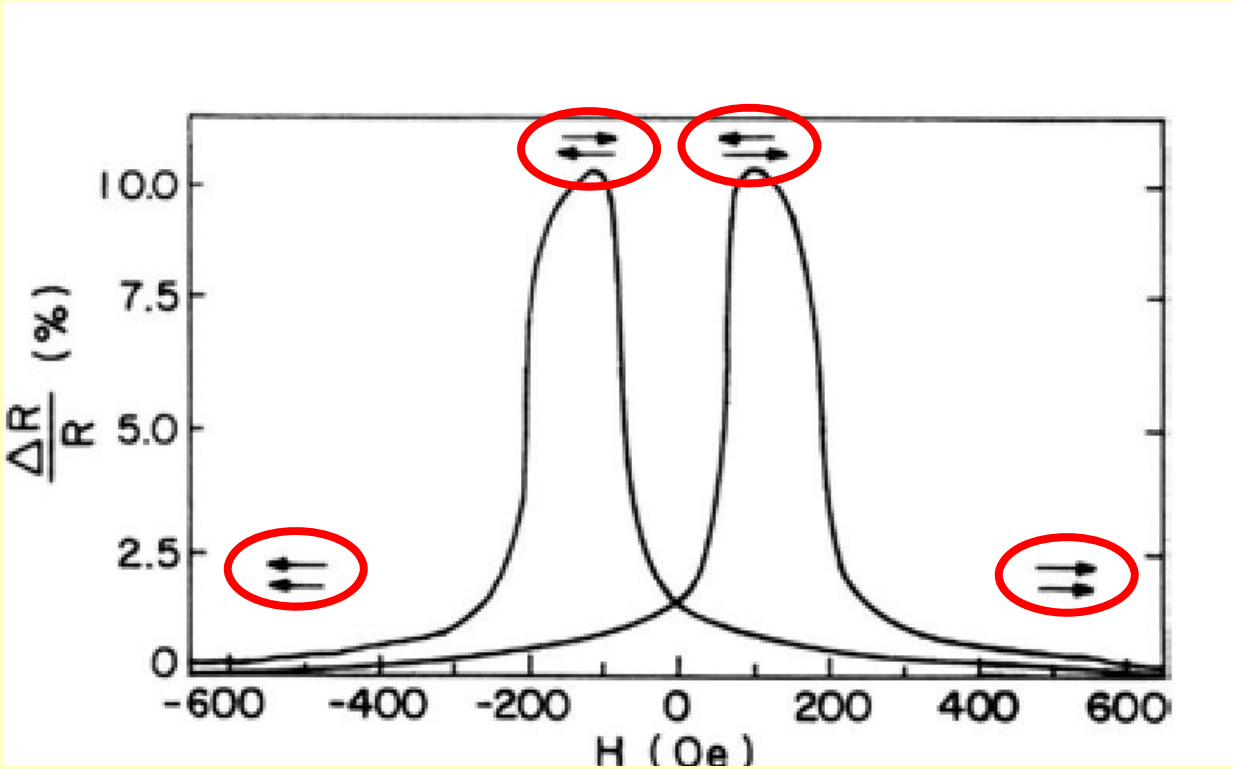
$$P_i = \frac{N(E_F)^{\uparrow} - N(E_F)^{\downarrow}}{N(E_F)^{\uparrow} + N(E_F)^{\downarrow}}$$



a) Barreira entre dois metais
b) Densidade de estados e forma da barreira entre dois metais ferromagnéticos com desdobramento entre ↑ e ↓

Dennis (2002)

Magneto-resistência túnel



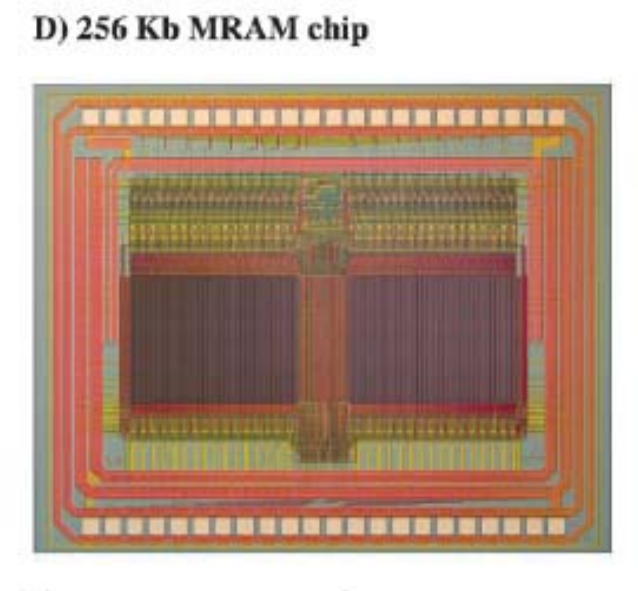
Magneto-resistência túnel em junção $CoFe/Al_2O_3/Co$, em função de H
Note as mudanças no alinhamento dos momentos

Magneto-resistência túnel: exemplos

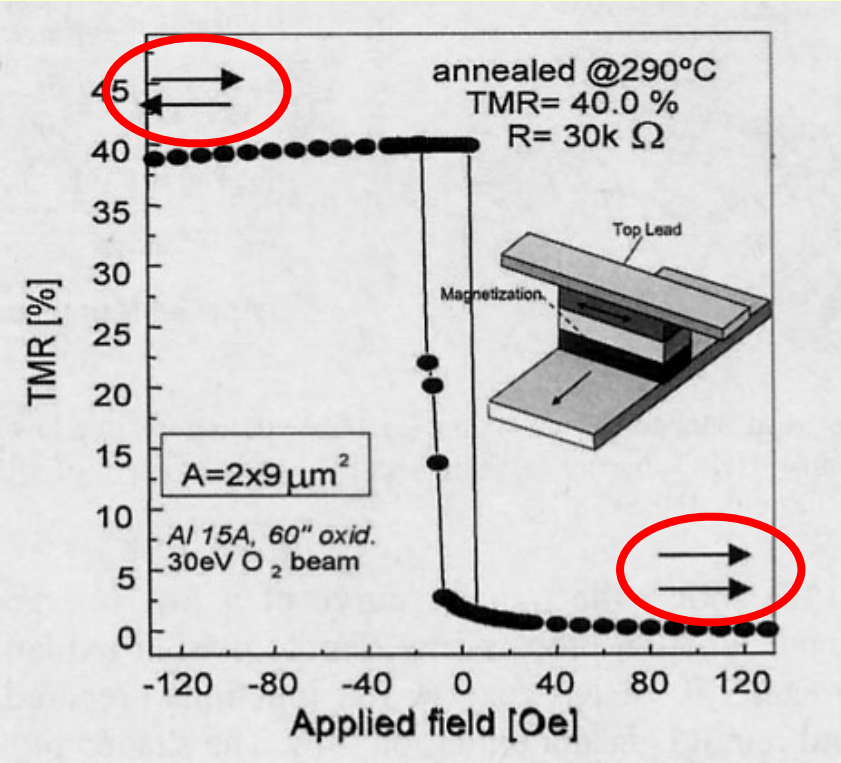
Estrutura da junção	MRT (%)
CrO_2/Cr_2O_3	-7
$Fe_3O_4/Al_2O_3/Co$	43
$NiMnSb/Al_2O_3/Ni_{80}Fe_{20}$	19
$Sr_2FeMoO_6/SrTiO_3/Co$	50
$La_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3/NdGaO_3/La_{2/3}Ca_{1/3}MnO_3$	700
$La_{2/3}Sr_{1/3}MnO_3/SrTiO_3/La_{2/3}Sr_{1/3}MnO_3$	1850
$Ga_{0.96}Mn_{0.04}As/AlAs/Ga_{0.967}Sr_{0.033}As$	75

Valores de magneto-resistência túnel (Bobo (2004))

Aplicação da MRT – memória



Memória magnética de acesso aleatório usando junção túnel (Wolf 2001)



Magneto-resistência túnel (40%) versus campo H – aplicação como elemento de memória

Freitas (2006)

Equação de Landau-Gilbert

O movimento da magnetização em presença de um campo

é descrito pela equação de Landau-Gilbert

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B}_{ef} + \alpha \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt}$$

onde i é o fator giromagnético, B_{ef} é o campo efetivo e c é um fator de amortecimento.

Esta é a equação usada para descrever a ressonância magnética de materiais magnéticos (RFM ou FMR).

Quando uma corrente de elétrons polarizados (caracterizados por magnetização **m**) atravessa um meio magnético, ela aplica um torque sobre a magnetização **M**; portanto, surge na equação acima um termo (Slonczewski 1996)

$$\xi \mathbf{M} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{M})$$

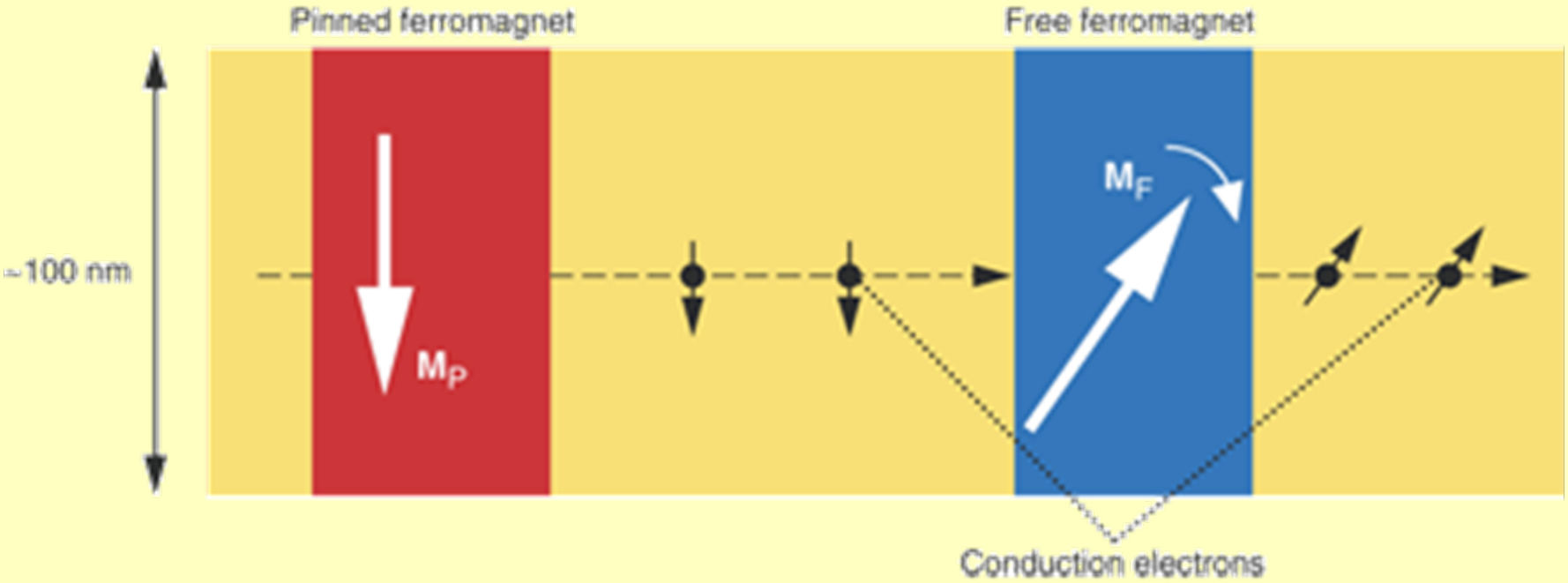
onde ξ é um fator que mede o amortecimento e cresce com a corrente. A

A equação de movimento fica

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{B}_{ef} + \alpha \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} + \xi \mathbf{M} \times (\mathbf{m} \times \mathbf{M})$$

A equação acima descreve portanto a evolução temporal da magnetização do meio magnético.

Torque de spin I



O efeito do torque é observado em multicamadas contendo uma camada com magnetização fixa e outra cuja magnetização pode girar. A equação de L-G nesse caso descreve a evolução temporal da magnetização da camada macia.

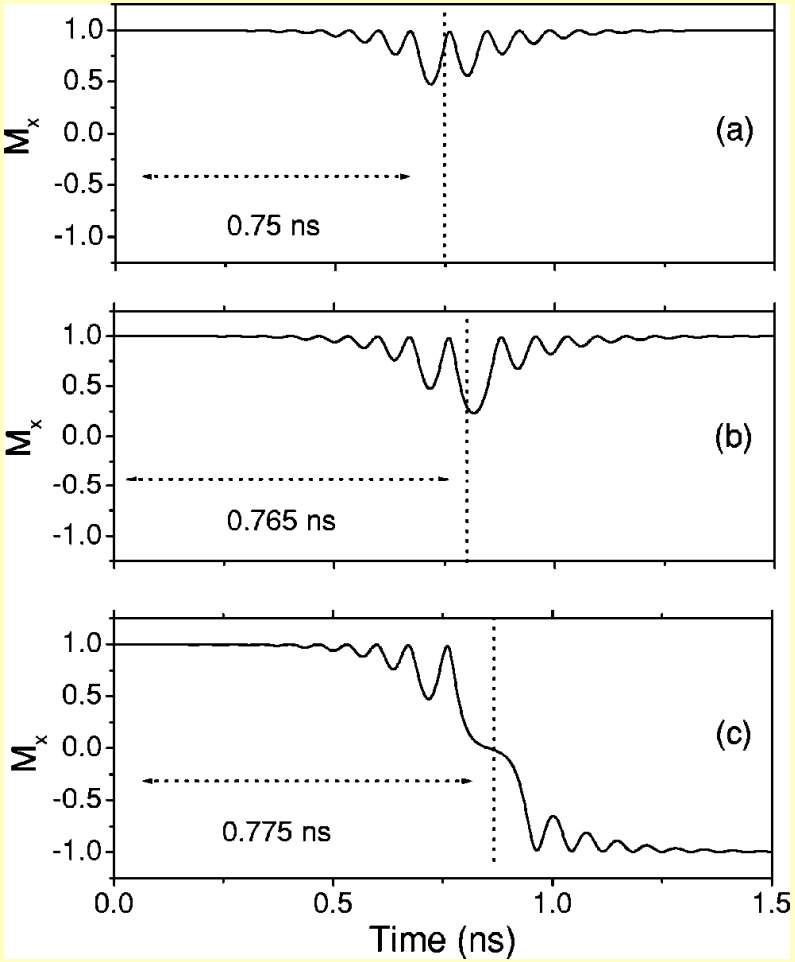
Acima de um valor crítico do campo aplicado pela corrente, a magnetização pode ser invertida (chaveamento).

Krivorotov in Sciencemag 14/01/2005

Chaveamento por corrente

O torque pode produzir a inversão da magnetização.

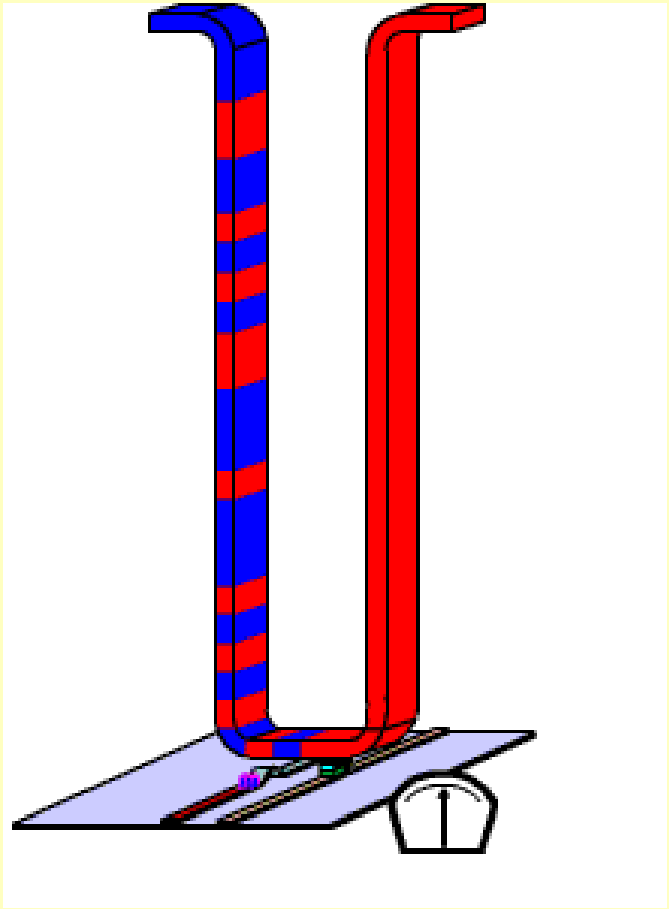
Na figura, a evolução da componente x da magnetização em função do tempo é mostrada para diferentes durações do pulso de corrente. Na última figura, a magnetização é invertida.



Li (2003)

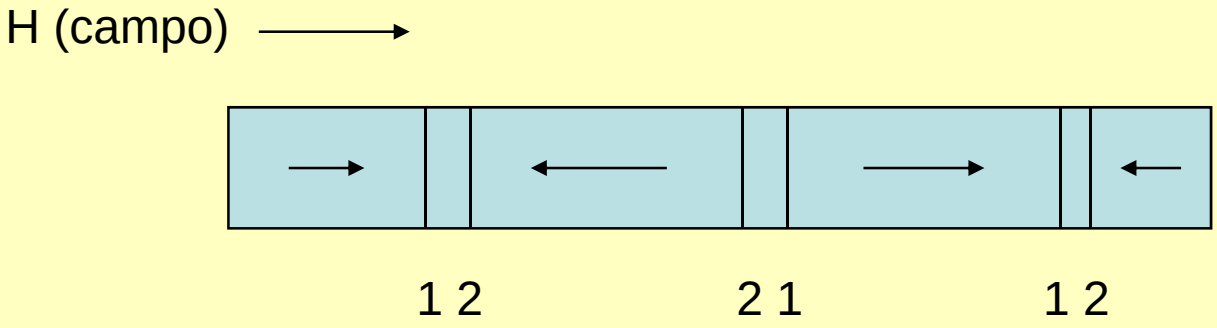
Movimento de paredes induzido por corrente - aplicação

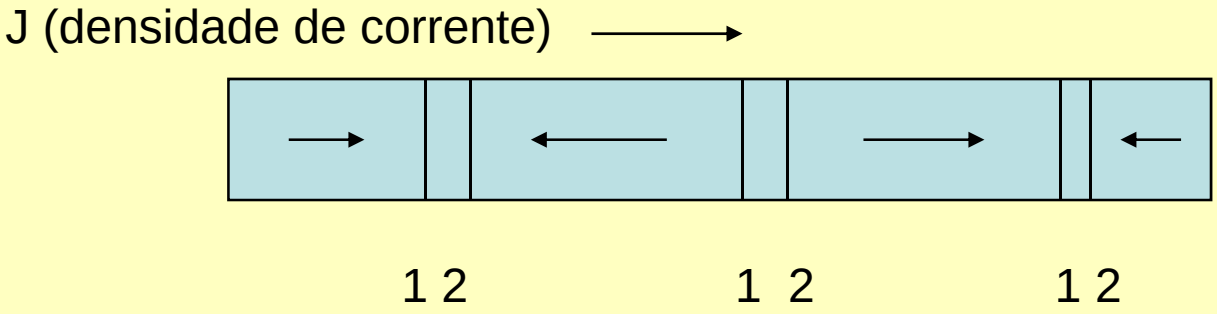
Memória que utiliza o movimento das paredes para armazenar dados (IBM)



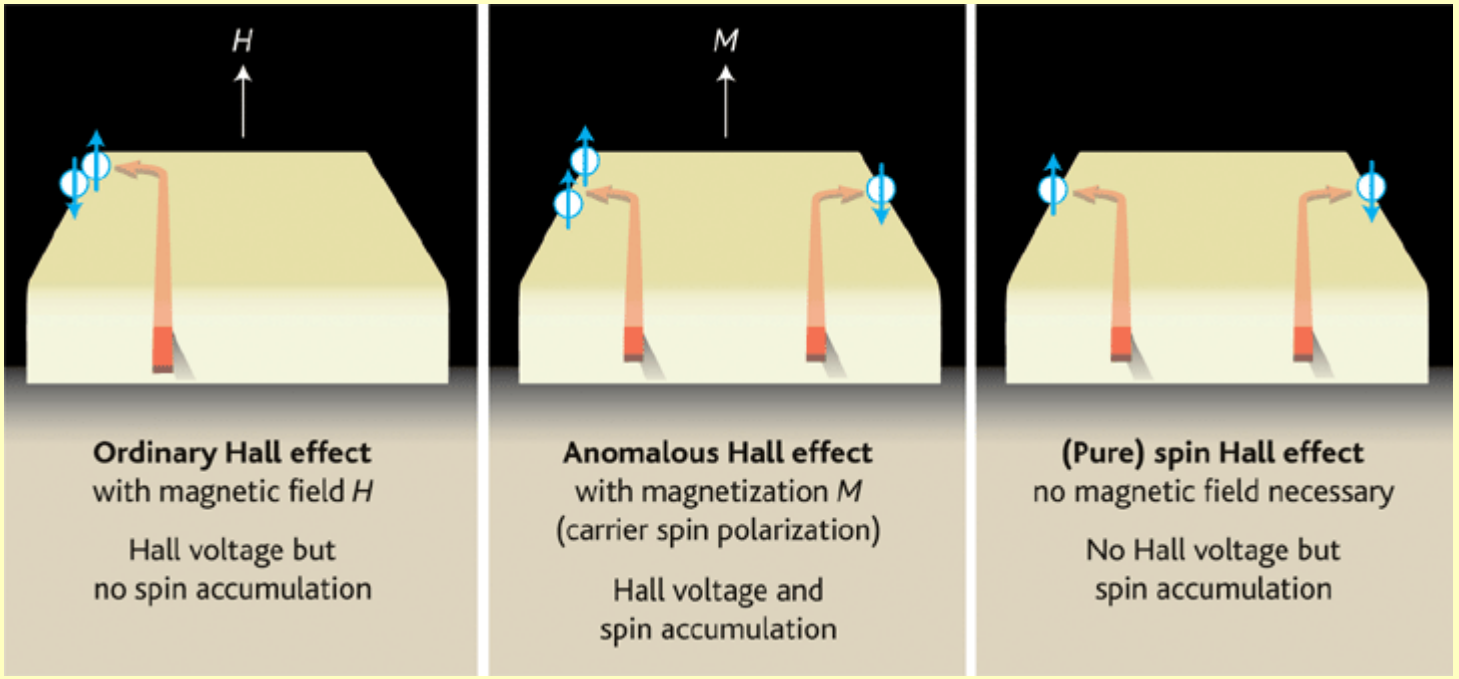
Movimento de paredes induzido por corrente

Uma corrente polarizada pode induzir movimento das paredes de domínios





Efeito Hall



1. Efeito Hall ordinário
2. Efeito Hall extraordinário e
3. Efeito Hall de spin

Inoue in Sciencemag 23/09/2005

Referências

1. I. Zutic, J. Fabian e S. Das Sarma, “Spintronics: fundamentals and applications", Rev. Mod. Phys. 76 (2004) 323-410.
2. 10. C. Chappert e A. Barthelémy, 'Nanomagnetism and spin electronics', in Nanoscience, Eds. C. Dupas, P. Houdy e M. Lahmany, Springer, Berlim, 2007, p.503-582.
3. P.P. Freitas, H. Ferreira, S. Cardoso, S. van Dijken e. Gregg,"Nanostructures for spin electronics",in Advanced Magnetic Nanostructures, Eds. D. Sellmyer e R. Skomski, Springer, New York, 2006, p. 403—460
4. Principles of Nanomagnetism, A.P. Guimarães, versão preliminar em http:/mesonpi.cat.cbpf.br, login: nanomag, senha: nanomag2008.

FIM