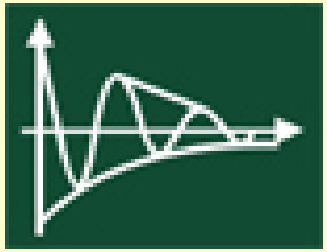
Nanomagnetismo

Parte 3

Escola do CBPF 2008



Nanomagnetismo

Escola do CBPF – 2008

Alberto P. Guimarães
Renato A. Silva

1	• **Introdução**	14/07
2	• **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

Definição de filmes finos: são materiais (cristalinos ou não-cristalinos) depositados com forma bidimensional sobre a superfície de um substrato através de métodos físicos ou químicos.

Espessura $< 1\ \mu m$

Importância dos filmes finos

- Filmes finos são os sistemas que apresentam propriedades nanoscópicas mais estudados

- A gravação magnética emprega filmes no meio magnético e nas cabeças de gravação e leitura

- Os filmes de interesse para o Nanomagnetismo podem ser de dois tipos:

a) planares extensos

b) com dimensões laterais nanoscópicas (alguns destes sistemas têm propriedades semelhantes aos grãos magnéticos)

Técnicas de preparação de filmes

- Deposição de vapor
- Pulverização catódica (“sputtering”)
- Eletrodeposição

Crescimento de filmes

Aderência depende das energias superficiais

Quanto maior a energia superficial relativa do substrato, maior a tendência do material depositado a se espalhar (molhar).

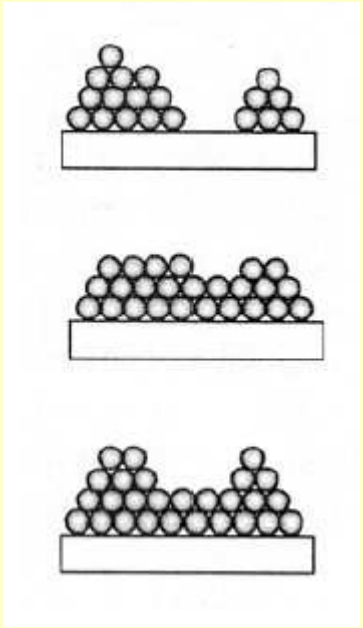
Island Growth

$$\gamma_{substrate} < \gamma_{overlayer} + \gamma_{interface}$$

Layer-by-Layer

$$\gamma_{substrate} > \gamma_{overlayer} + \gamma_{interface},$$

Stranski-Krastanov



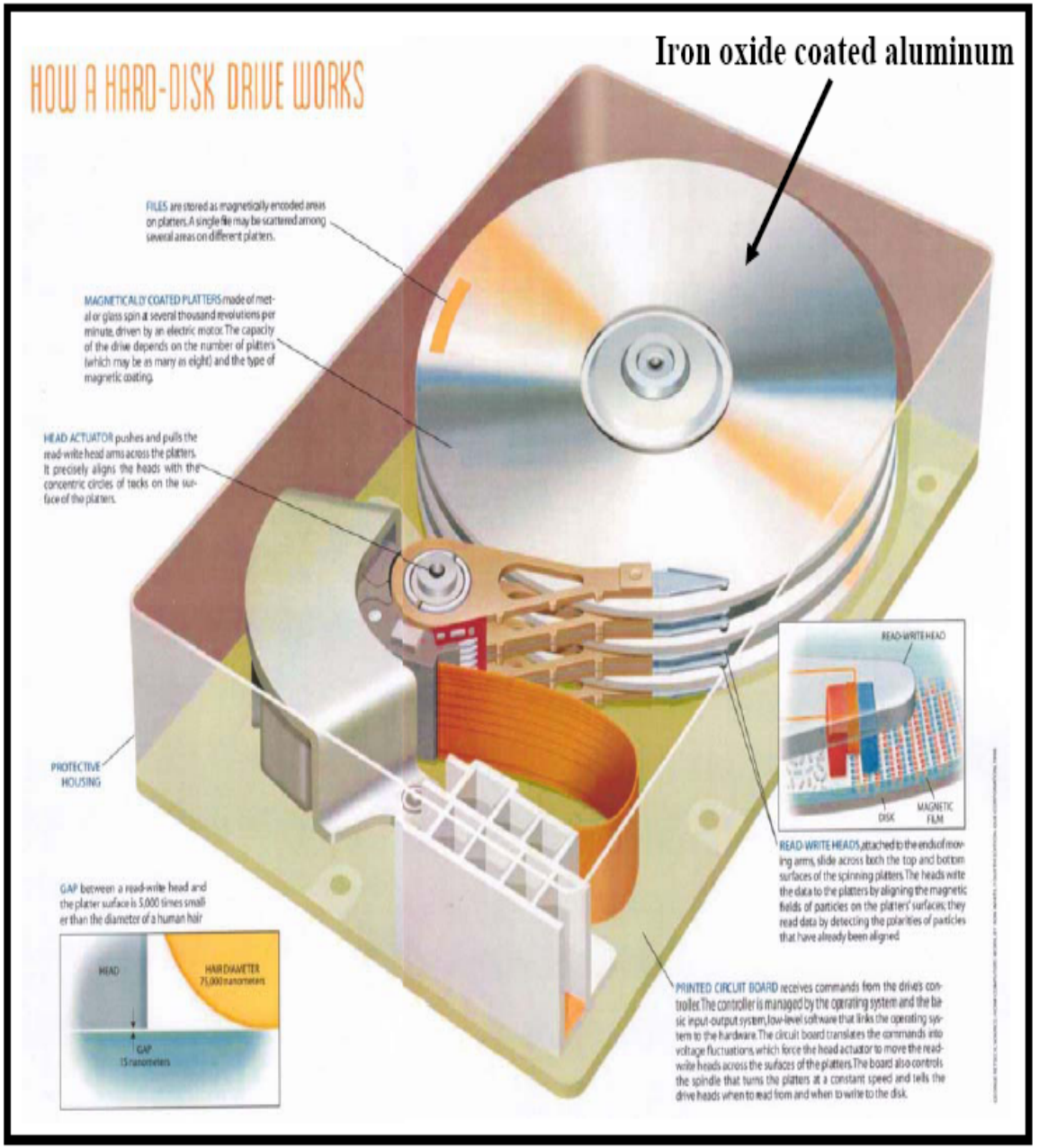
F.J. Himpsel, et al, Magnetic nanostructures. Adv. Phys., 47:511–597, 1998.

Energia livre dos materiais

Magnetic metal	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Gd				
γ ($J\,m^{-2}$)	2.1	1.4	2.9	2.7	2.5	0.9				
Transition metal	Ti	V	Nb	Mo	Ru	Rh	Pd	Ta	W	Pt
γ ($J\,m^{-2}$)	2.6	2.9	3.0	2.9	3.4	2.8	2.0	3.0	3.5	2.7
Simple or Noble metal	Al		Cu		Ag		Au			
γ ($J\,m^{-2}$)	1.1		1.9		1.3		1.6			
Semiconductor	Diamond		Si		Ge		GaP		GaAs	
γ ($J\,m^{-2}$)	1.7		1.2		1.1		1.9		0.9	
Insulator	LiF		NaCl		CaF_2		MgO		Al_2O_3	
γ ($J\,m^{-2}$)	0.34		0.3		0.45		1.2		1.4	

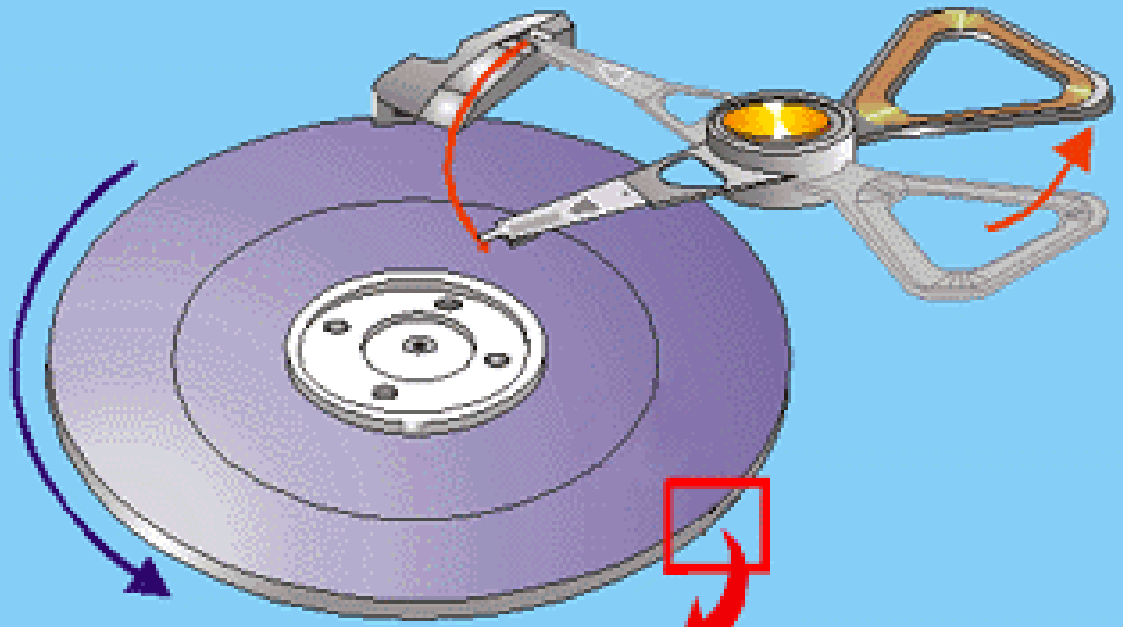
Capacity of magnetic hard disks:

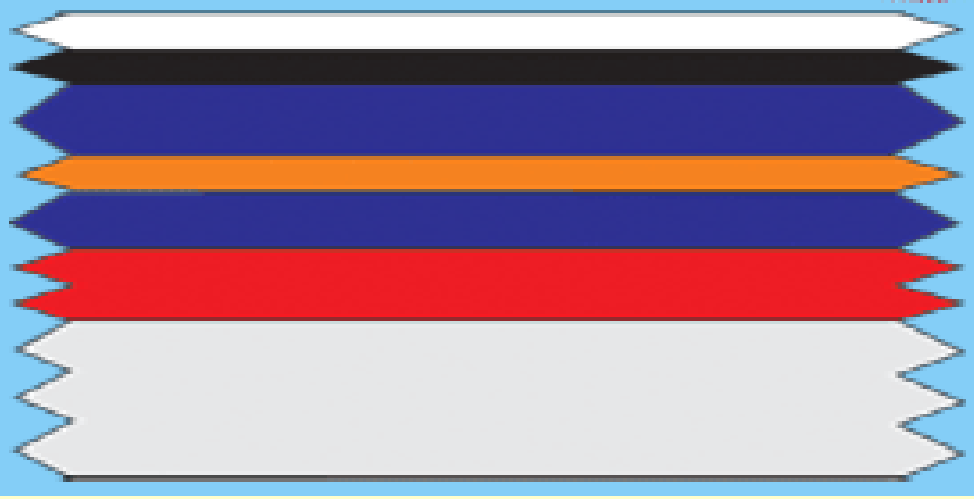
- 1980's: 30% growth per year
- early 1990's: 60% growth per year
- late 1990's: 130% growth per year
- disk capacity doubling every 9 months (twice the pace of Moore's Law)



J. W. Toigo, *Scientific American*, **282**, 58 (2000).

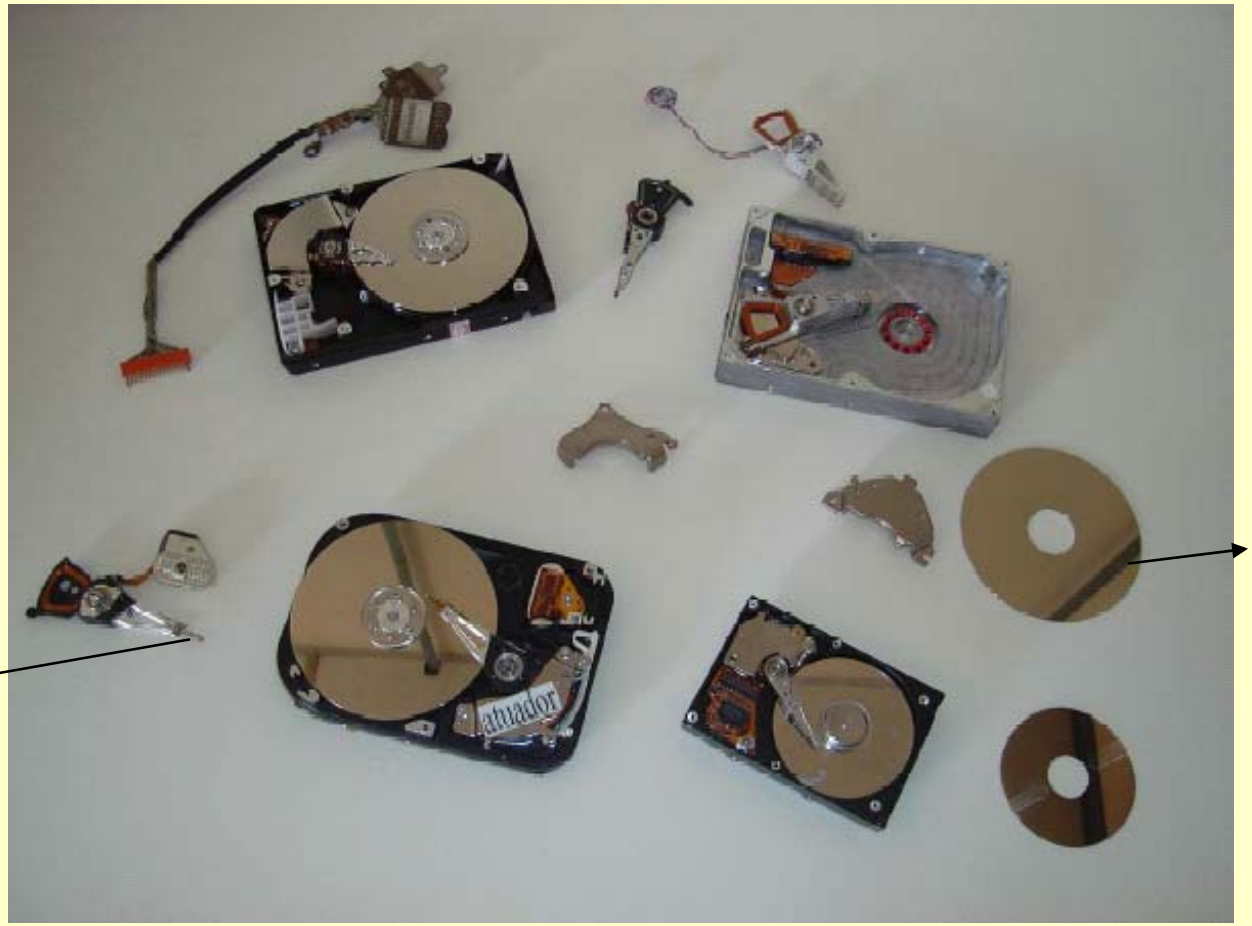
Disk Technology





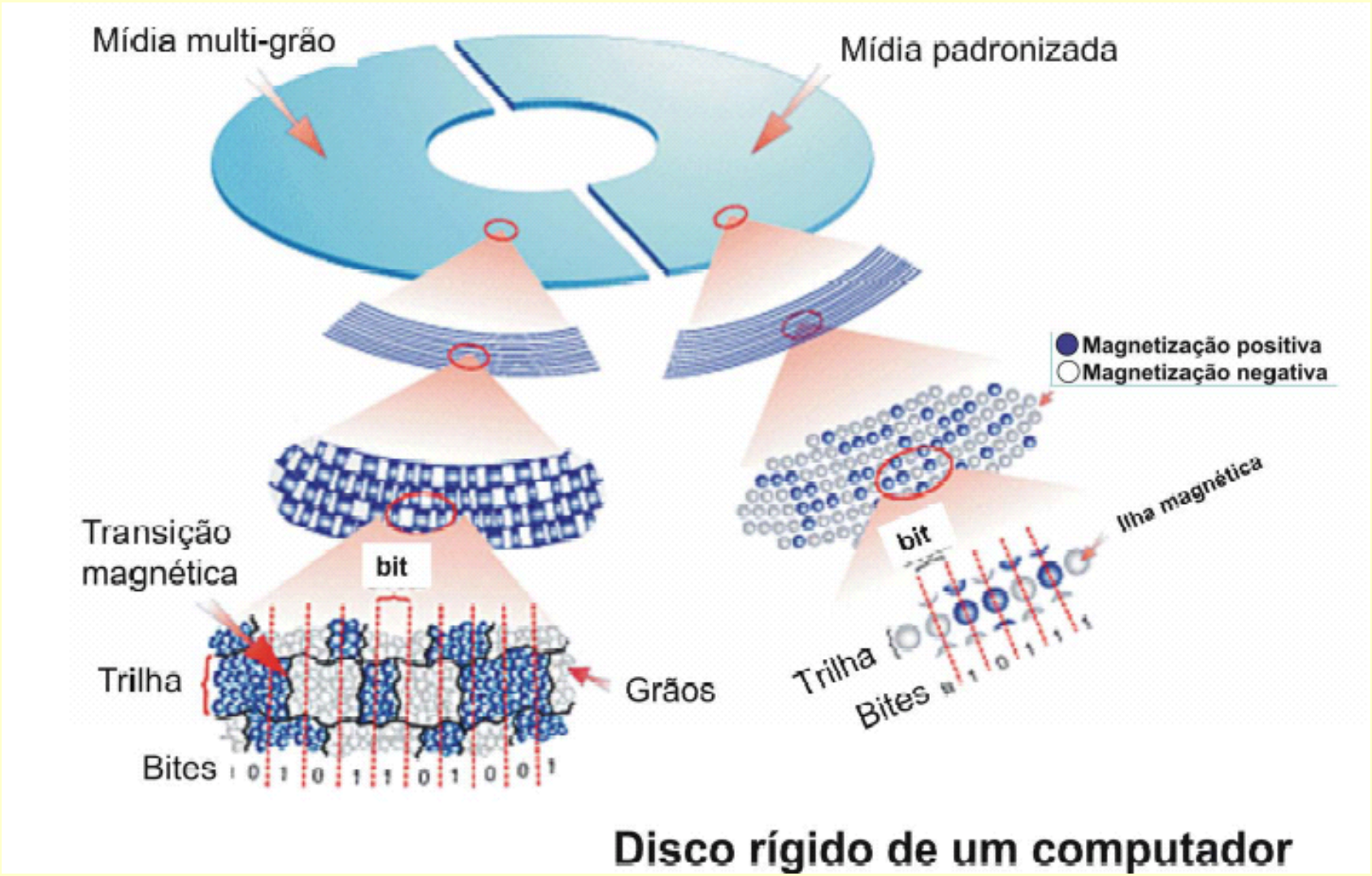
Lubricant
Carbon Overcoat
CoPtCrB Magnetic Layer
6 Å Ruthenium Layer
CoPtCrB Magnetic Layer
Cr Underlayer
Glass Substrate

Partes do disco rígido de um computador



Disco Rígido

Cabeçote leitura

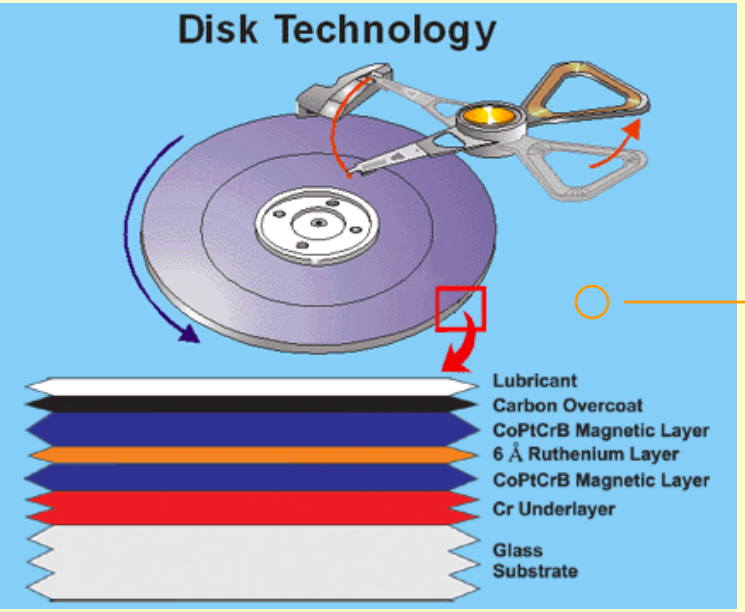


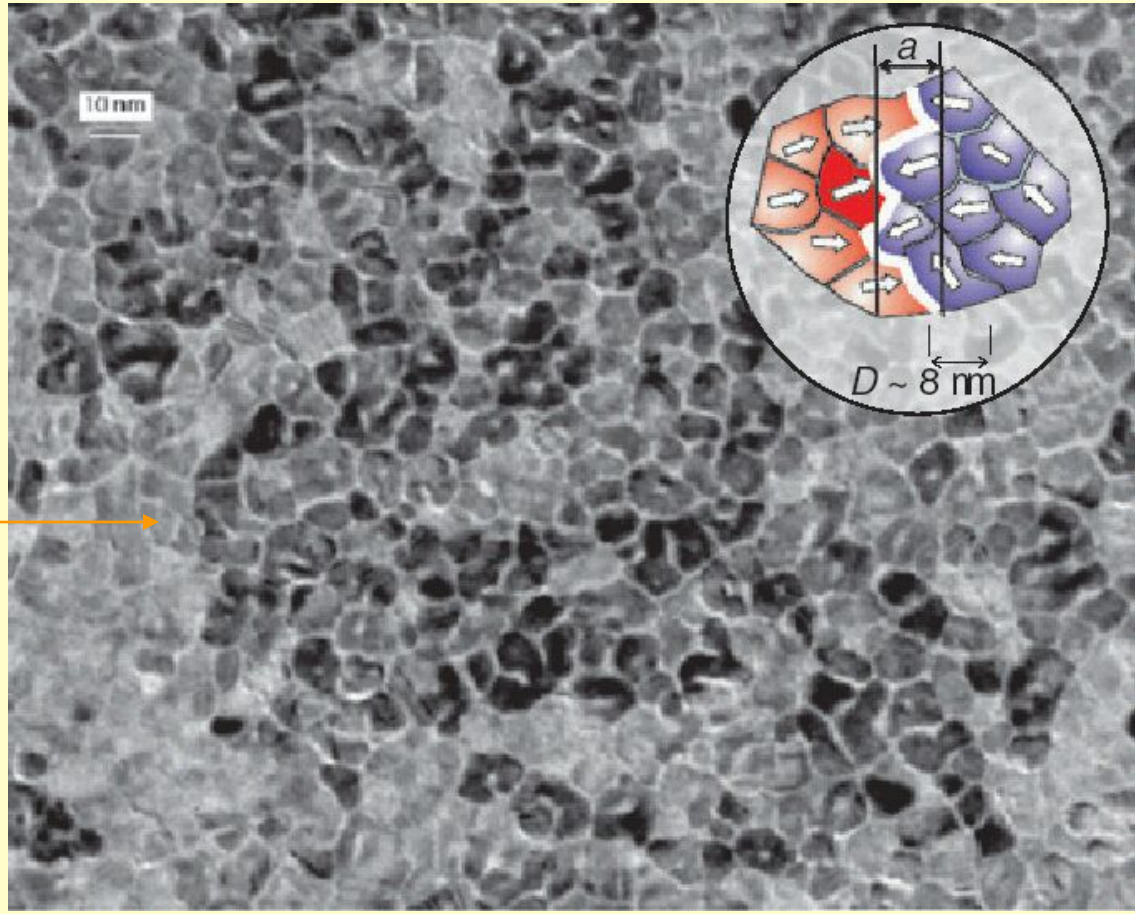
Página do Instituto de Física da UFRGS www.if.ufrgs.br

Media particulada consiste de pequenas partículas, por exemplo ferrita de ferro, γ-Fe_2O_3, coberto por metal ou polímero.

Mídia Magnética Particulada

- Hoje: Gravação longitudinal:
  - Densidade ~ 100 Gbit/in^2



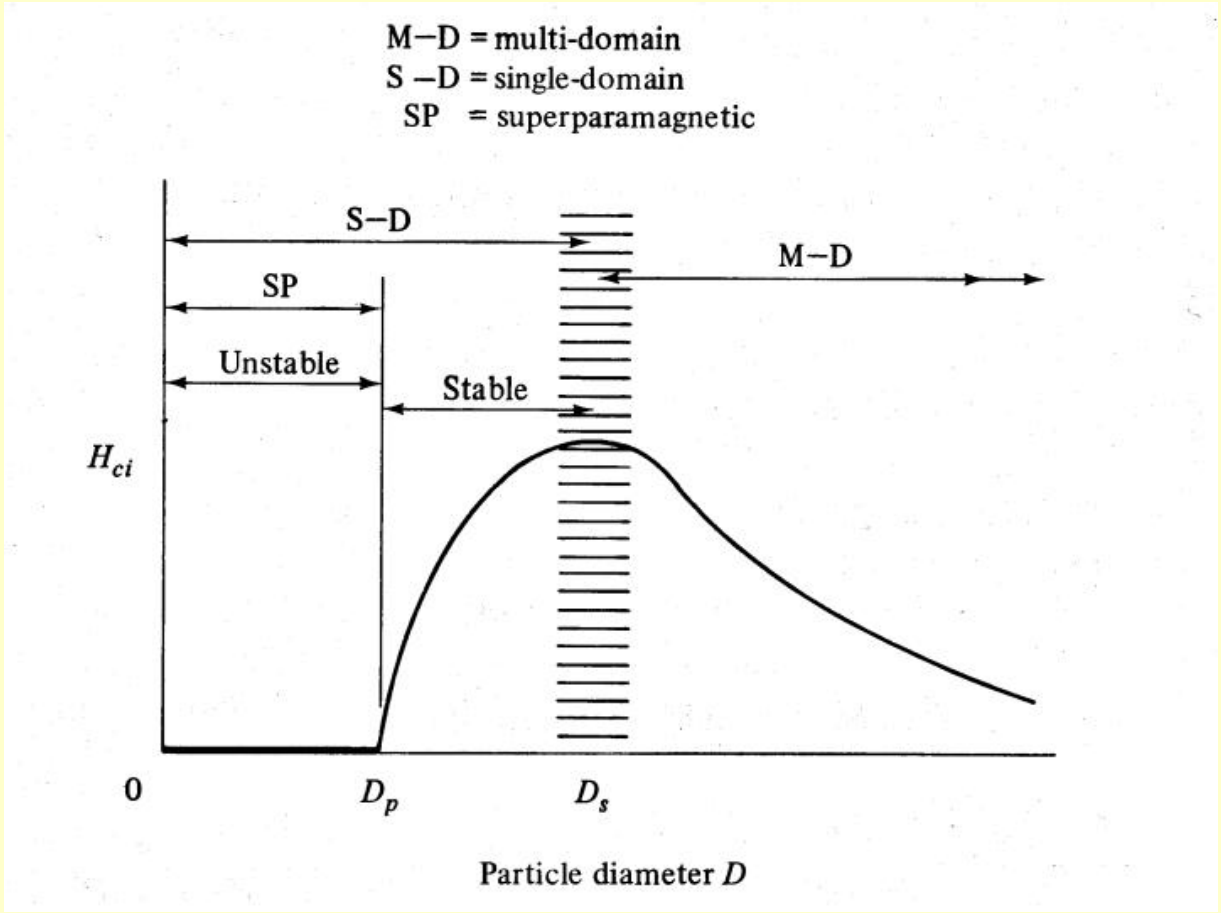


CoCrPtB (TEM)

Comportamento magnético e tamanho de partículas

Três regimes

a) Superparamagnético
b) Monodomínio FM
c) Multidomínio FM



(a) “ rotação livre” dos momentos devido à desordem térmica

(b) direção fácil

(c)

Aumentando D

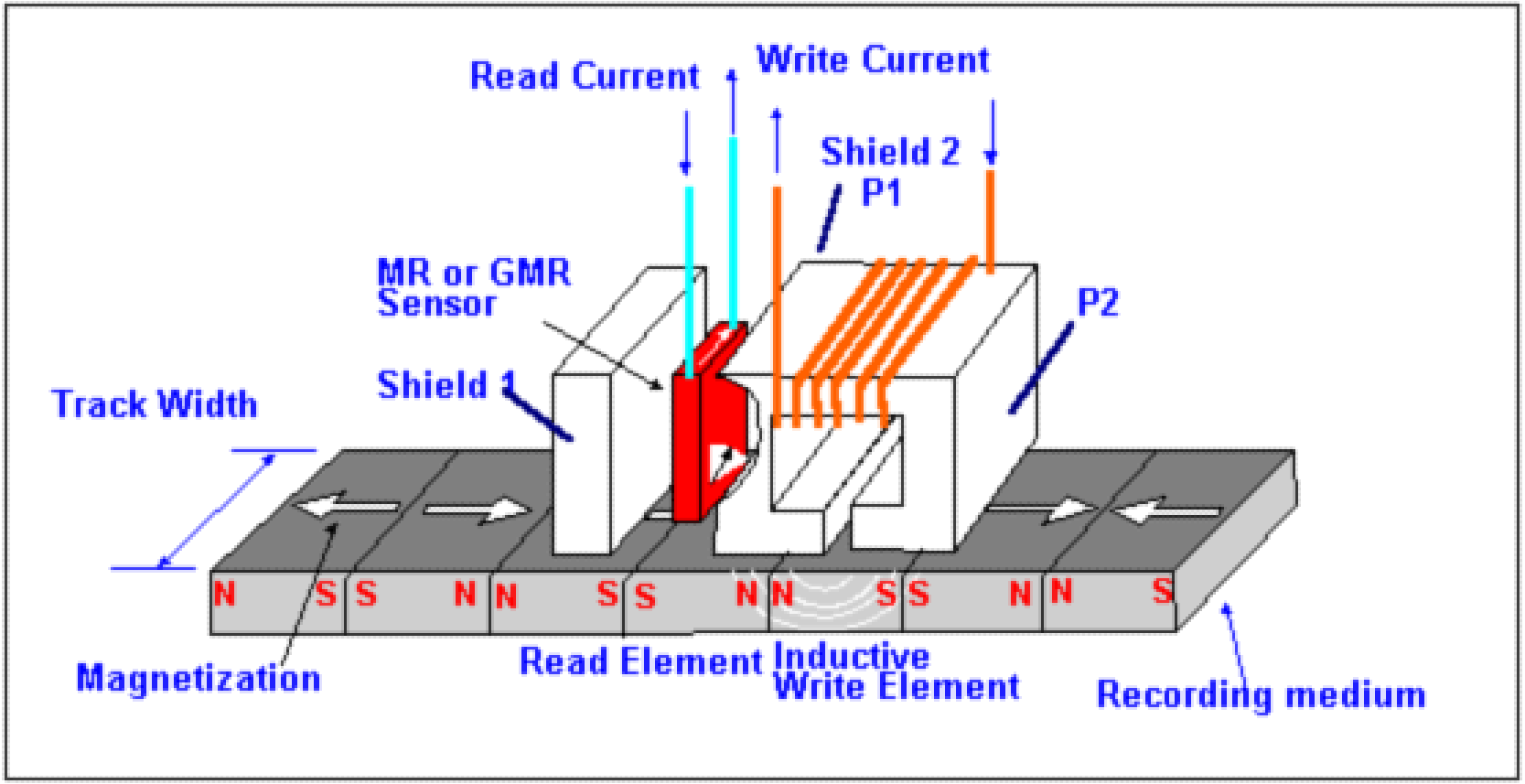


Figure 3. Magnetic recording process.

Anisotropia Magnética em filmes finos

Tipos de anisotropia:

- **Anisotropia magnetocristalina**
- **Anisotropia de forma**
- **Anisotropia de superficie**

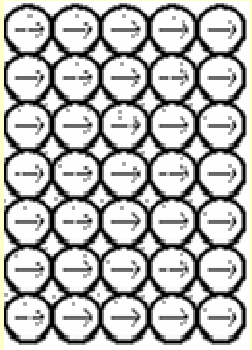
$$E_{an} = K_{effetivo} \sin^2 \theta$$

A direção de fácil magnetização surge da competição entre as diferentes anisotropias!

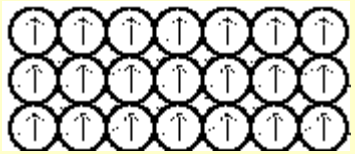
Anisotropia Magnética em filmes finos

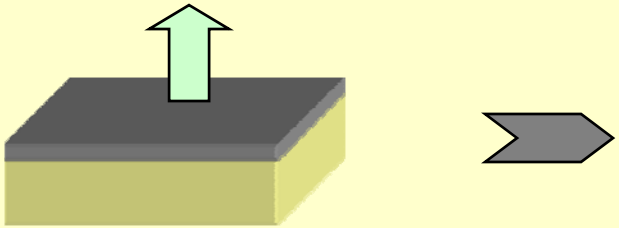
Filmes espessos:
Anisotropia magnetocristalina
Anisotropia de forma





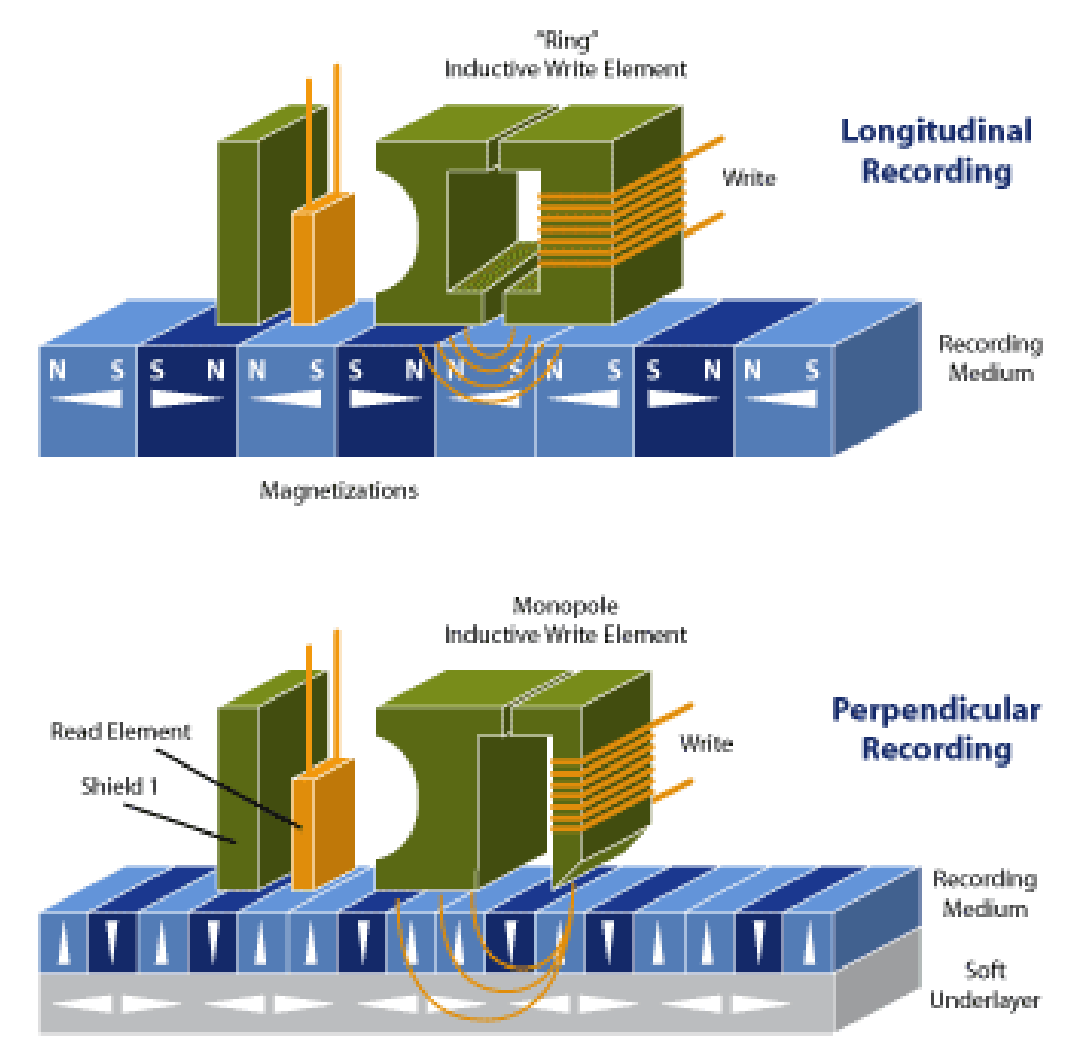
Redução da espessura





+ Anisotropia
de superfície

Gravação Magnética



Cabeças de leitura e gravação magnética, longitudinal e perpendicular

Limitations of Nanomagnetic Storage

(1) Superparamagnetic effect (SPE) → at the nanoscale, the magnetization energy becomes comparable to ambient thermal energy → bits become susceptible to random flipping

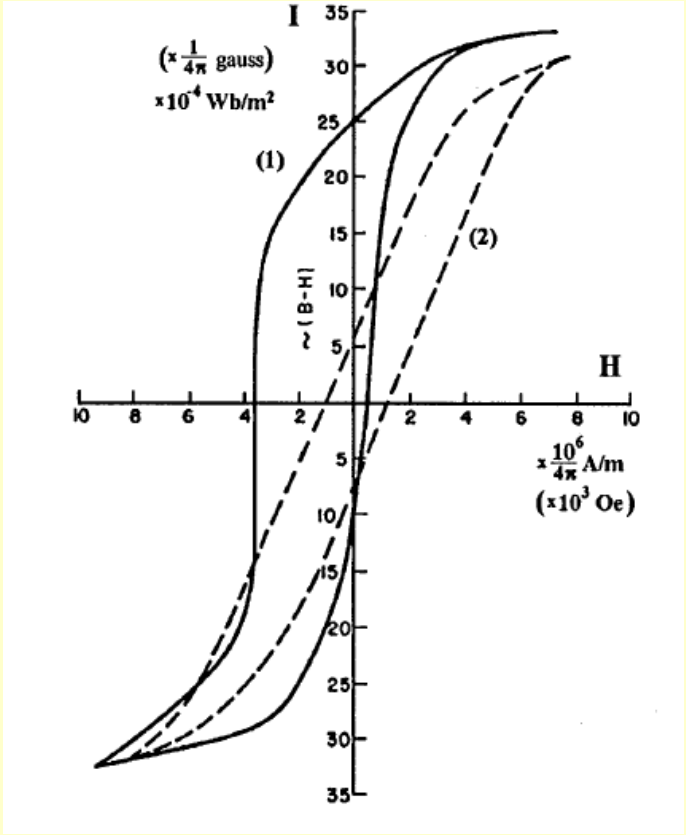
(2) Track width → currently: 20,000 tracks/inch
→ at 150,000 tracks/inch, each track will be ~170 nm wide
→ difficult for heads to follow (requires secondary actuator)

(3) Access speed → at speeds greater than 10,000 revolutions/minute, hard disks emit noticeable audible noise

(4) Read head sensitivity → improved by giant magnetoresistance

Exchange bias

Trabalho pioneiro de Meiklejohn e Been



Nano-particulas de Co, previamente oxidadas, apresentam anisotropia uni-direcional quando o material é resfriado desde o estado PM até o estado AF na presença de um campo magnético.

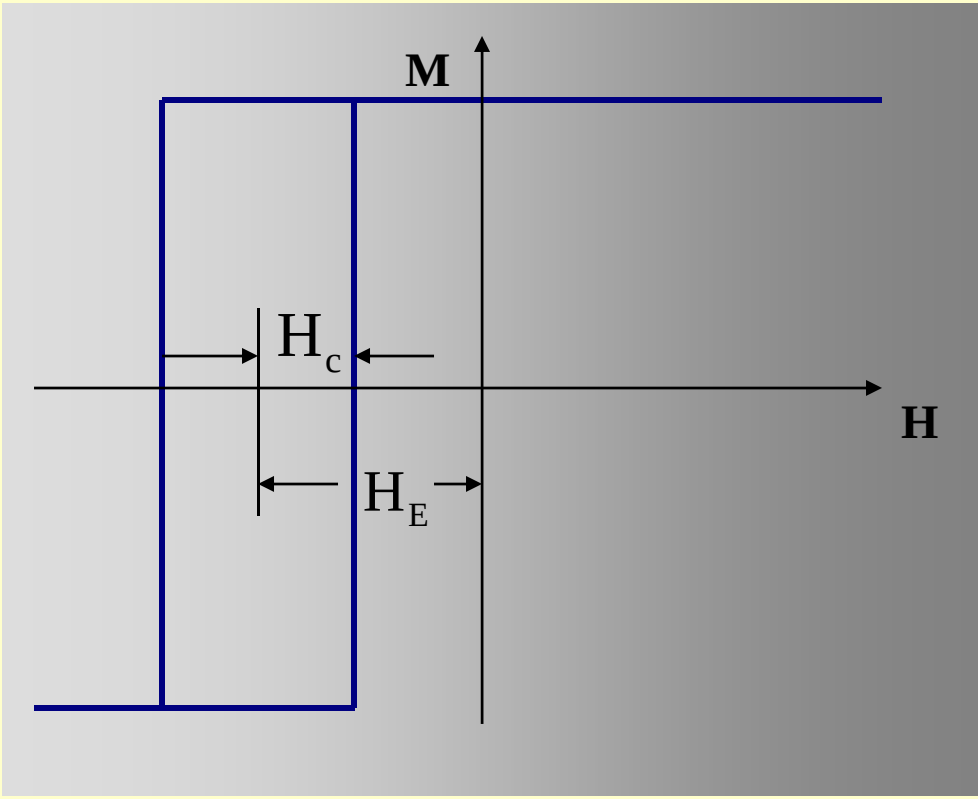
W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev., **102**, 1413 (1956).

W. H. Meiklejohn and C. P. Bean, Phys. Rev., **105**, 904 (1957).

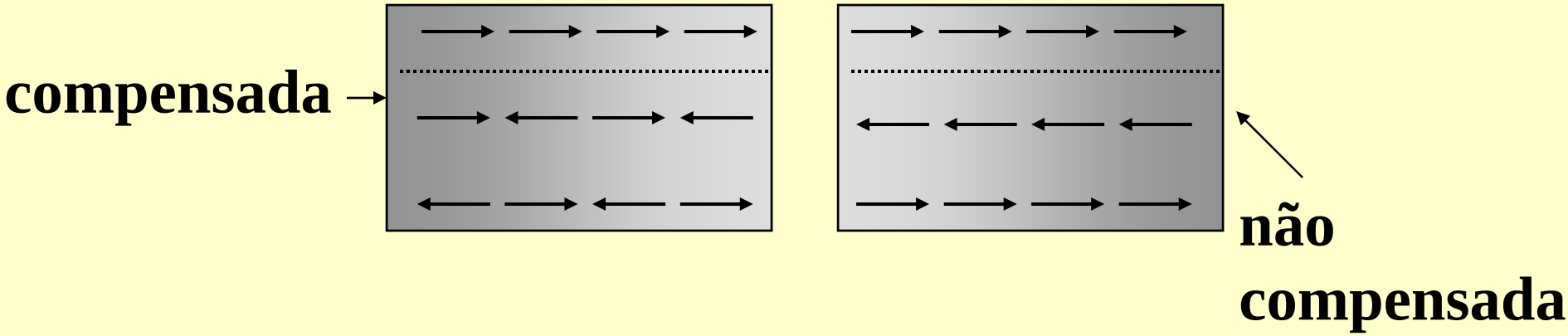
Em que consiste o efeito exchange bias ?

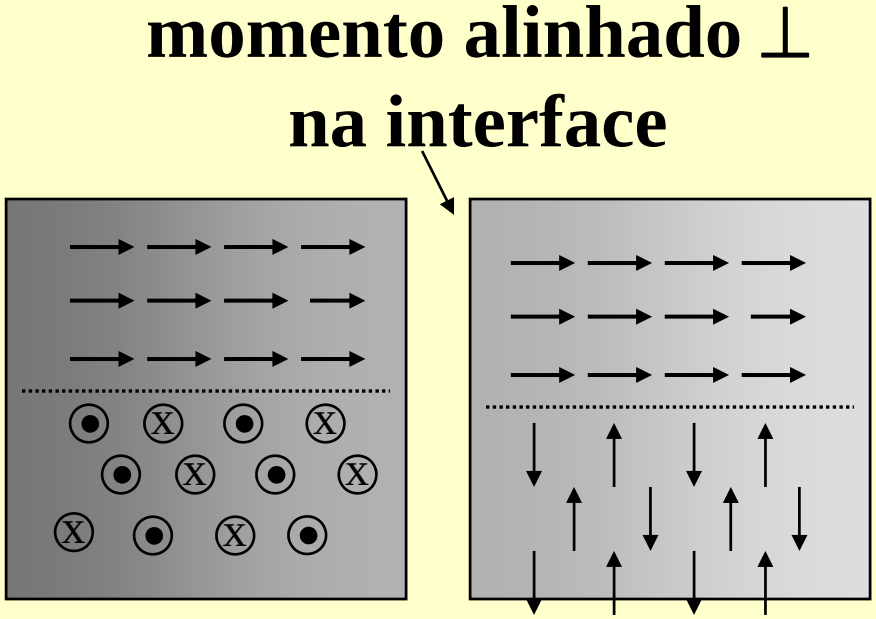
Exchange bias ou polarização de troca é um fenômeno associado com a anisotropia de troca criada na interface entre um FM e um AFM

Uma das manifestações mais conhecidas do fenômeno consiste no deslocamento do ciclo de histerese.

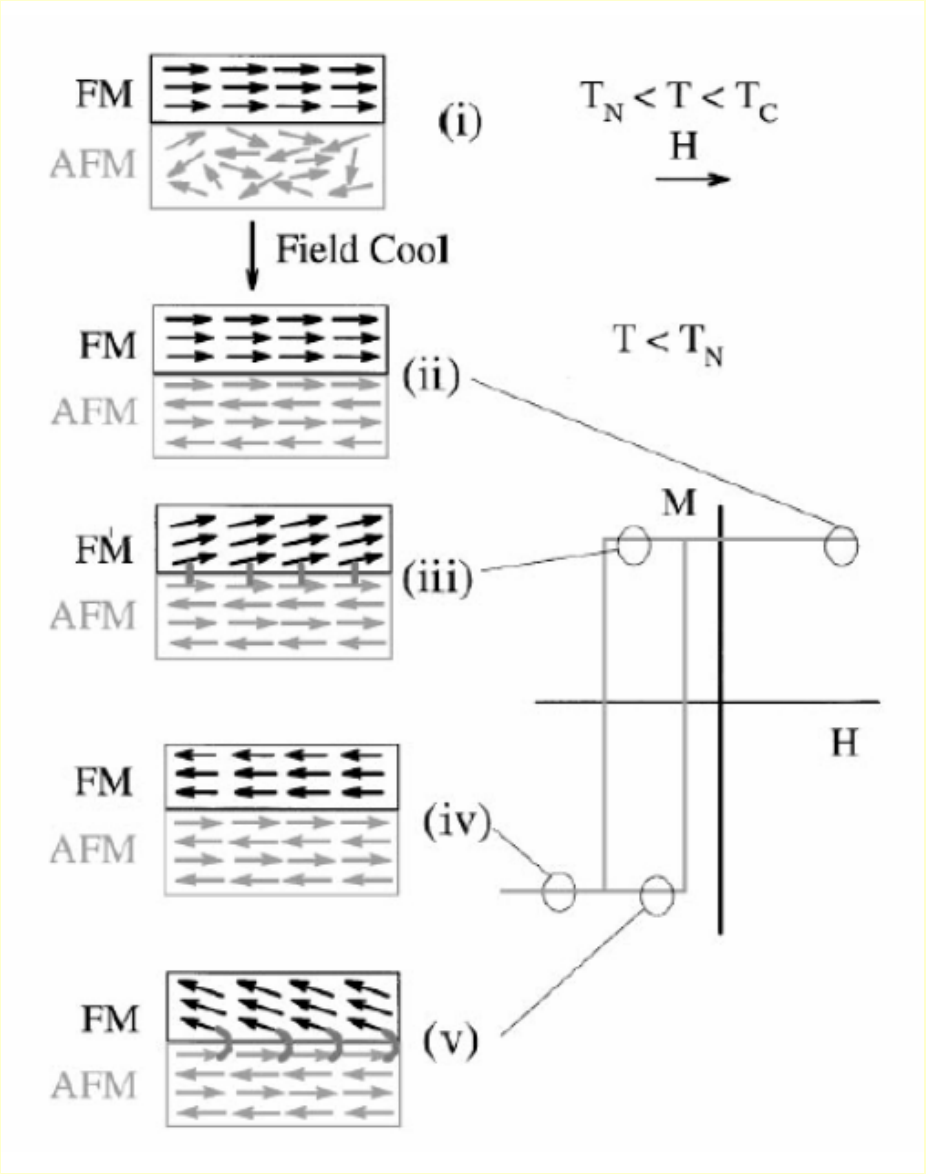


Interfaces AFM/FM





Fenomenologia



J. Nogués and Ivan K schuller. JMMM **192** (1999) 203

Sistemas experimentais mais investigados

- pequenas partículas

  Co-CoO, Ni-NiO, Fe-Fe_3O_4

- filmes Finos

  AF-FM

  camadas AF oxidadas

  camadas AF metálicas

  camadas de sulfitos, fluretos e nitretos

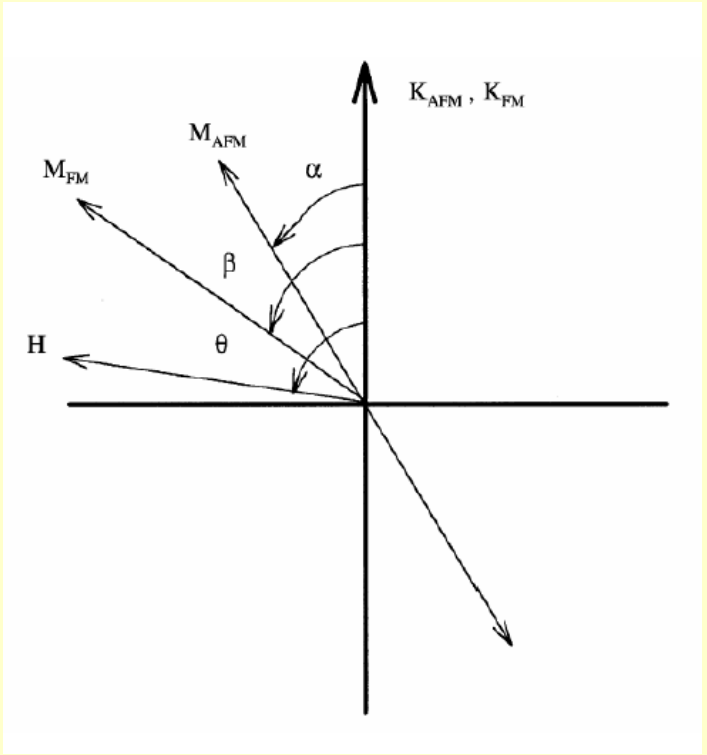
  ferri-FM

  AF-ferri

  ferri-ferri

Considerando rotação coerente da magnetização (modelo mais simples)

$$E = -HM_{FM}t_{FM}\cos(\theta-\beta) + K_{FM}t_{FM}\sin^2(\beta) + K_{AFM}t_{AFM}\sin^2(\alpha) - J_{int}\cos(\beta - \alpha)$$



Termos da energia magnética

Primeiro - energia de Zeeman
Segundo - energia de anisotropia no ferromagneto
Terceiro - energia de anisotropia no antiferromagneto
Quarto - energia de exchange na interface

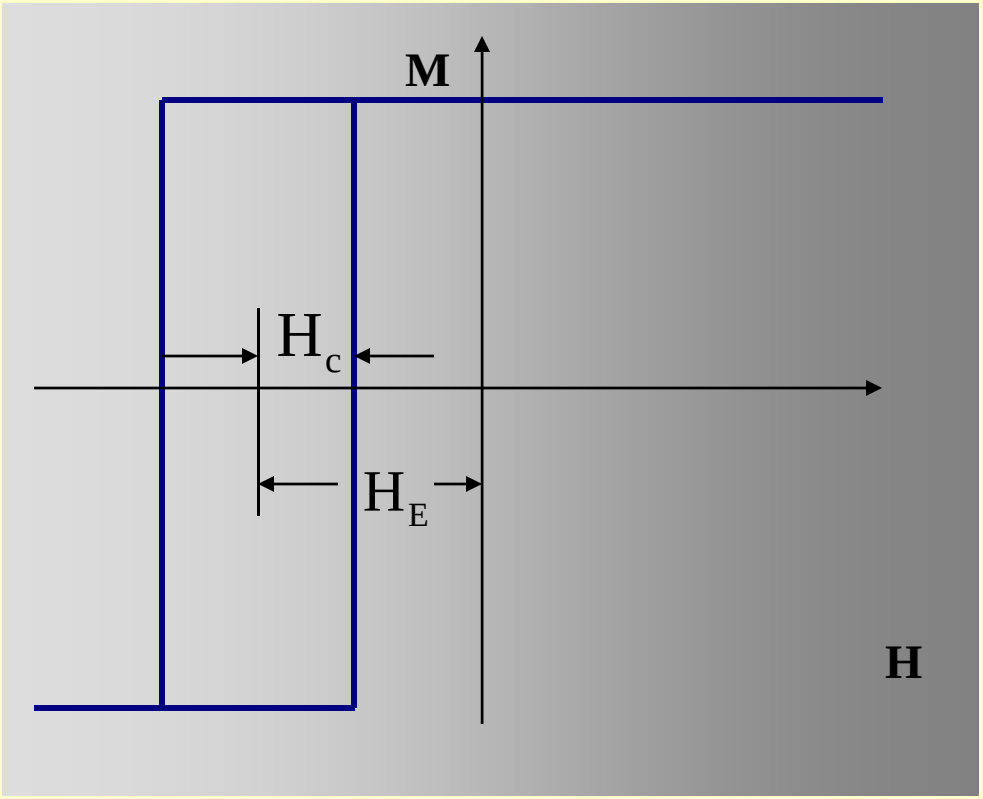
Minimizando a energia é possível encontrar H_E

$$H_E = \frac{J_{INT}}{M_{FM} t_{FM}}$$

Com as condições:

$$K_{FM} t_{FM} \ll K_{AFM} t_{AFM}$$

$$K_{AFM} t_{AFM} \geq J_{INT}$$



Contudo o valor estimado é muito maior que o valor observado, e várias outros efeitos devem ser levados em consideração:

- Formação de domínios
- distribuição de tamanho de grão
- não alinhamento dos spins na interface AFM-FM, etc.

Modelos teóricos

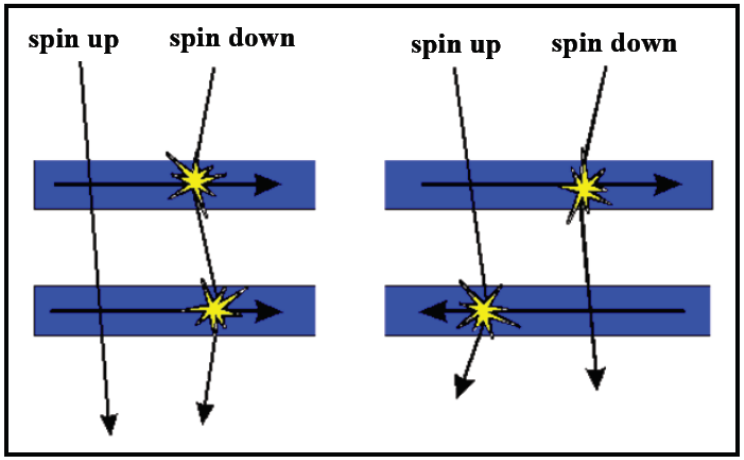
Teoria	Principais características	Estrutura magnética da interface	Principais resultados
Primeiro trabalho (*Meiklejohn*)	Rotação coerente da magnetização F e AF	Camada AF da interface não compensada, $\mathbf{m_F} \mid\mid \mathbf{m_{AF}}$ (**m**: magnetização bulk)	H_E muito maior do que observado experimentalmente
Primeiro modelo de Interface aleatória (*Malozemoff*)	Defeitos aleatórios criam campos aleatórios	Camada AF da interface não compensada, $\mathbf{m_F} \mid\mid \mathbf{m_{AF}}$	Razoável valor H_E o qual depende da concentração de defeitos
Modelo de paredes de domínio AF (*Mauri*)	Acoplamento na interface F; filme fino F	Camada AF da interface não compensada, $\mathbf{m_F} \mid\mid \mathbf{m_{AF}}$	Razoável valor H_E
Magnetização Ortogonal da F e AF (*Koon*)	Spins oblicuos na interface AF	Camada AF da interface compensada, $\mathbf{m_F} \perp \mathbf{m_{AF}}$	Estrutura da interface magnética realística
Interface distribuída aleatoriamente (Schulthess)	Rugosidade na interface; interação dipolar é incorporada	Interface AF compensada $\mathbf{m_F} \perp \mathbf{m_{AF}}$ e $\mathbf{m_F} \mid\mid \mathbf{m_{AF}}$ são investigadas	Razoável valor H_E coercividade finita, dependente da concentração de defeitos

M. Kiwi, JMMM. 234 (2001) 584

Possíveis Aplicações

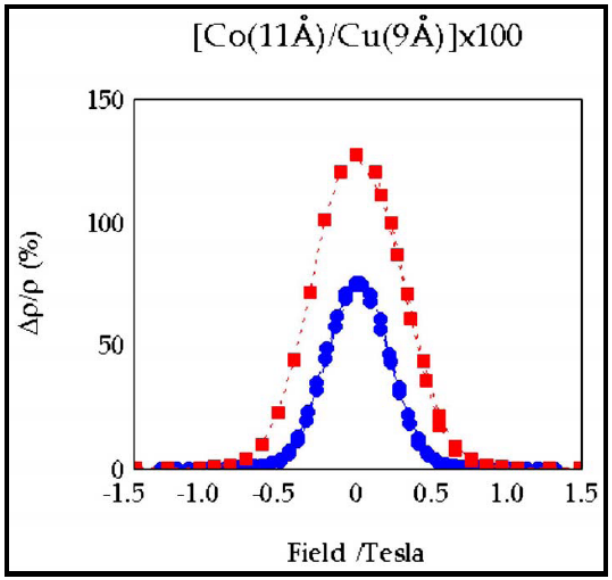
- ímãs permanentes;
- sensores magnéticos;
- memórias magnetoresistivas;

Giant Magnetoresistance (GMR)



http://www.stoner.leeds.ac.uk/research/gmr.htm

GMR Field Dependence



http://www.stoner.leeds.ac.uk/research/gmr.htm

Acoplamento entre camadas

- Duas camadas ferromagnéticas de momentos μ_1 e μ_2 separadas por uma camada paramagnética têm uma energia de acoplamento

$$E = -J_1 \mu_1 \cdot \mu_2 \ cos\theta$$

- Este é o acoplamento bilinear
- Outro termo que pode ser importante tem a forma

$$-J_1 \mu_1 \cdot \mu_2 \ cos^2\theta$$

- Este termo em geral está associado à rugosidade da interface

J_1 é dado pela diferença de energia da configuração paralela e antiparalela das camadas por unidade de área

M.D. Stiles, 'Interlayer exchange coupling', J. Magn. Magn. Mat. 200 (1999) 322-337.

Acoplamento através de camada não-magnética

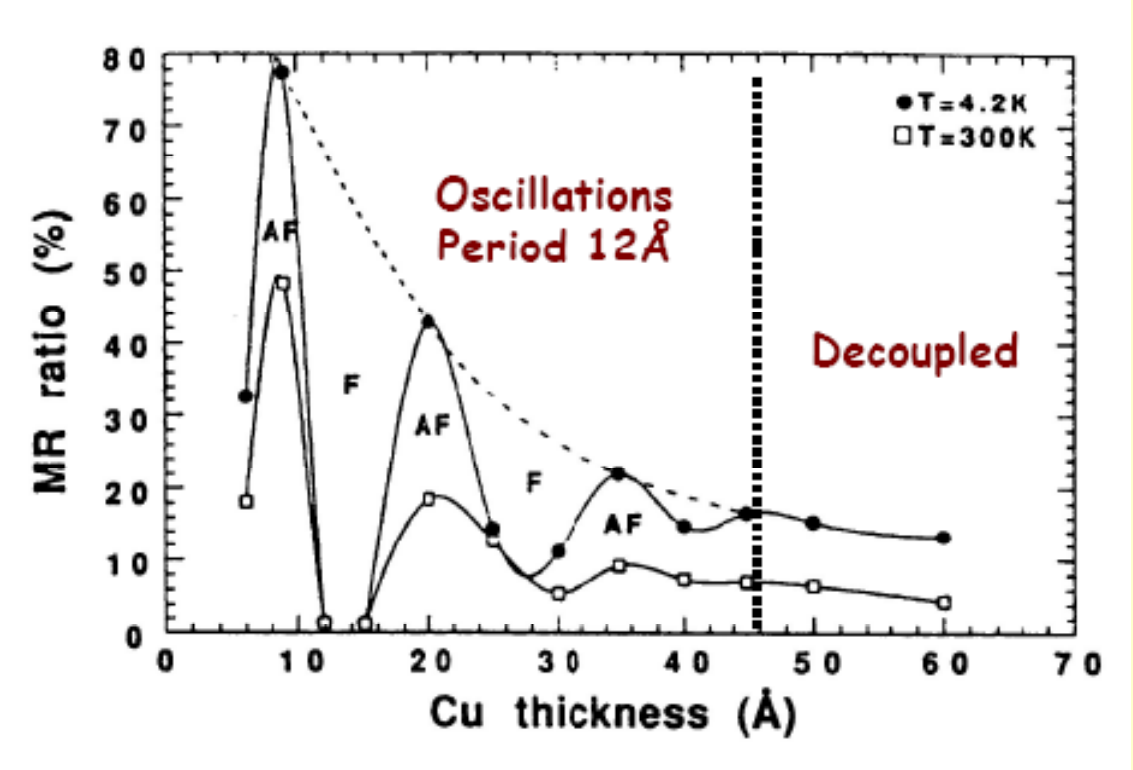
- A constante J_1 usualmente varia de forma oscilatória

- Dentro da descrição RKKY, o acoplamento é dado por uma função dos vetores L que limitam a superfície de Fermi e por uma fase ϕ

$$J_1(t) = \sum_\alpha \frac{J^\alpha}{t^2} sin\left(\frac{2\pi}{L^\alpha}t + \phi^\alpha\right)$$

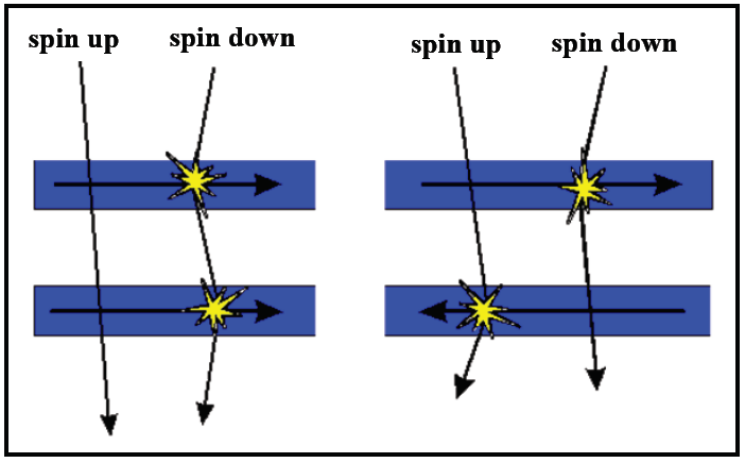
M.D. Stiles, 'Interlayer exchange coupling', J. Magn. Magn. Mat. 200 (1999) 322-337.

Acoplamento através de camada não-magnética



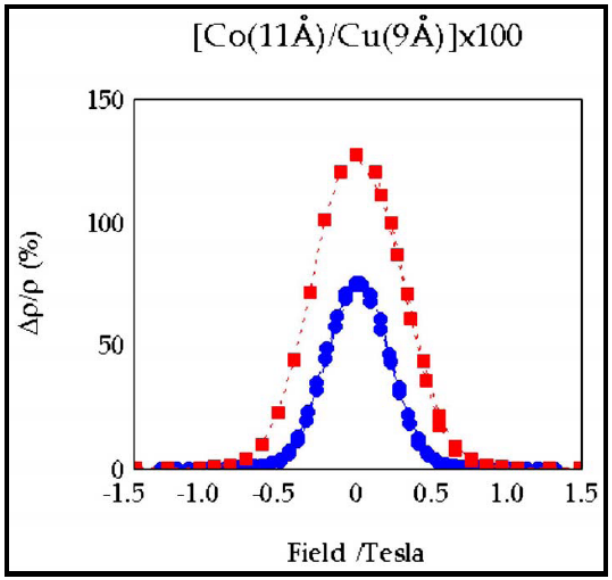
Acoplamento entre camadas de Co com espaçador de Cu, em função da espessura deste, mostrando comportamento oscilatório

Giant Magnetoresistance (GMR)



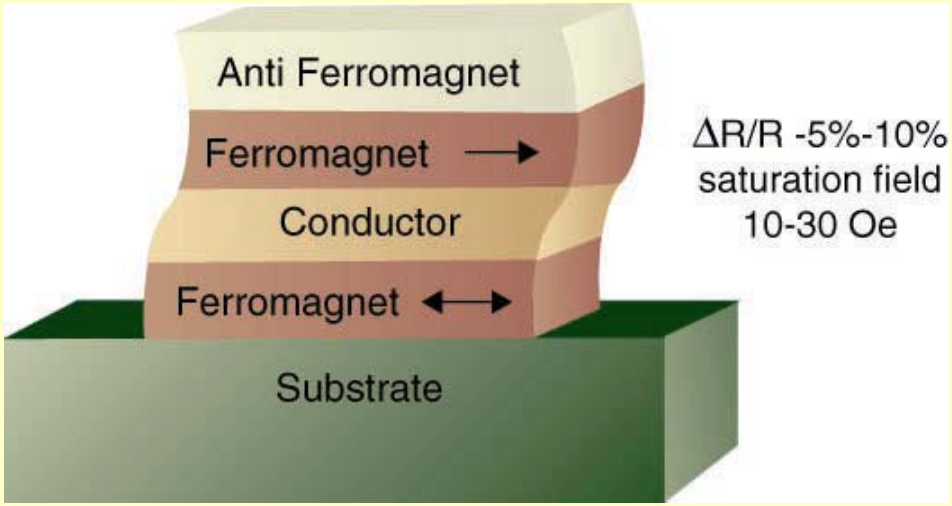
http://www.stoner.leeds.ac.uk/research/gmr.htm

GMR Field Dependence

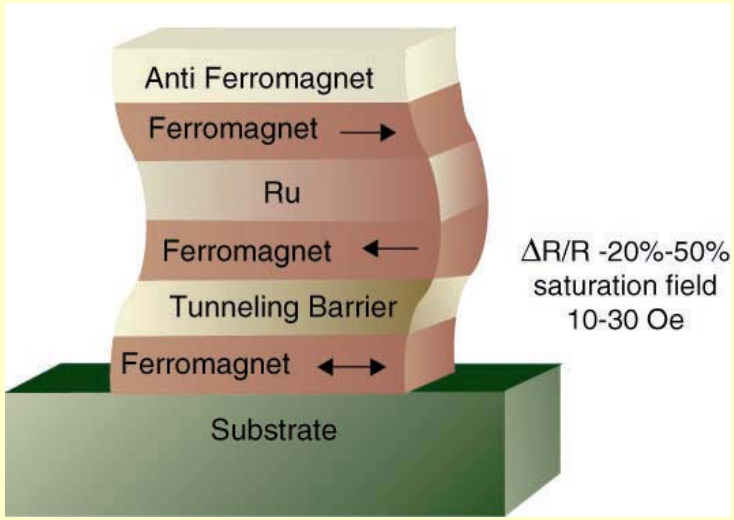


http://www.stoner.leeds.ac.uk/research/gmr.htm

Aplicação: sensores de campo magnético

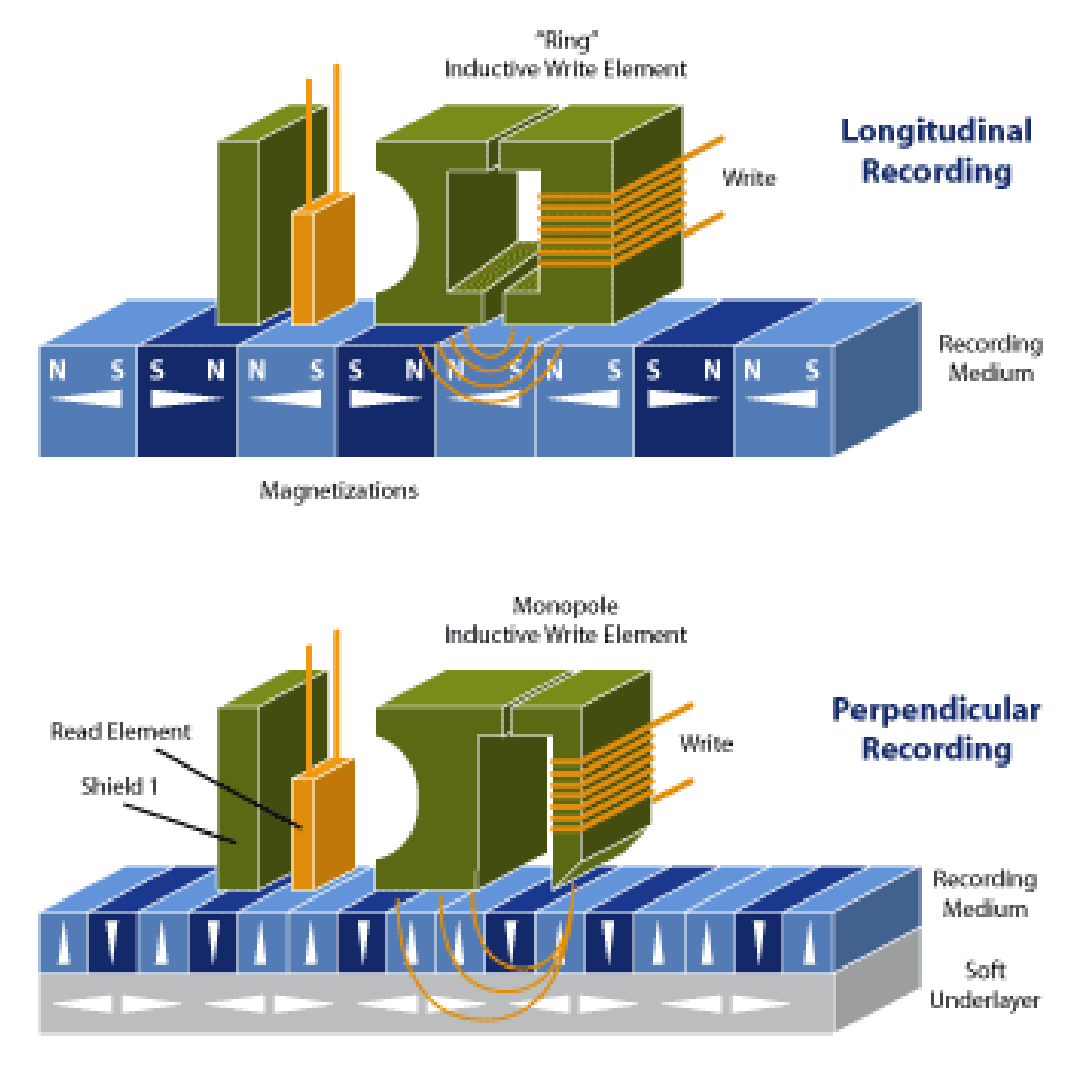


Válvula de spin



Magneto-resistência túnel

Gravação Magnética



Bibliografia

- U. Gradmann, 'Magnetism in ultrathin transition metal films', in Handbook of Magnetic Materials, Ed. K.H.J. Buschow, North Holland, Amsterdam, 1993, pg. 1-96.
- F.J. Himpsel, J.E. Ortega, G.J. Mankey and R.F. Willis, 'Magnetic nanostructures', Adv. Phys. 47 (1998) 511-597.
- P. Grünberg, 'Layered magnetic structures: history, facts and figures', J. Magn. Magn. Mat. 226 (2001) 1688-1693.
- R.C. O'Handley, Modern Magnetic Materials, John Wiley, Nova York, 2000.
- J. Nogués and I.K. Schuller, 'Exchange bias', J. Magn. Magn. Mat. 192 (1999) 203-232.
- M.D. Stiles, 'Interlayer exchange coupling', J. Magn. Magn. Mat. 200 (1999) 322-337.

Fim