



**E**ste ano o prêmio Nobel de Física é oferecido para a tecnologia que é usada para ler dados nos discos rígidos. É graças a essa tecnologia que tem sido possível miniaturizar discos rígidos tão radicalmente em anos recentes.

Assim foi anunciado o prêmio Nobel de Física de 2007 pela Academia Real de Ciências da Suécia, no último 9 de outubro.

Essa miniaturização impressionante dos discos rígidos usados em computadores, i-pods, celulares e outros dispositivos eletrônicos tem sido uma consequência direta da descoberta do efeito chamado magnetoresistência gigante, GMR (do inglês *giant magnetoresistance*), descoberto pelo físico francês Albert Fert e pelo físico alemão Peter Grunberg há quase 20 anos, de maneira independente. Por tal descoberta, que já revolucionou a tecnologia de gravação magnética (e que po-

**A magnetoresistência gigante é uma tecnologia padrão para discos rígidos, pois permitiu sua miniaturização em um grau sem precedentes até então**

derá afetar outras áreas também no futuro), ambos foram contemplados com o Nobel de Física de 2007, dividindo um prêmio de 10 milhões de coroas suecas (cerca de 2,5 milhões de reais).

No início dos anos 80, a área de materiais magnéticos nanoestruturados experimentava um grande “boom” na Europa, Estados Unidos e Japão. Tanto Fert e seus colaboradores, na Universidade de Paris Sul, em Orsay, França, como Grünberg e seu grupo, no então Centro de Pesquisas Nucleares (KFA, do alemão *Kernforschungsanlage*), hoje Centro de Pesquisas de Jülich (FZJ), na Alemanha, dedicavam-se à física experimental na área do magnetismo de filmes finos e ultrafinos, e de multicamadas (estas, verdadeiros *big-macs*, feitos com o empilhamento de camadas finíssimas de diferentes metais, magnéticos e não-magnéticos).

Fert investigava o efeito da aplicação de um campo magnético na corrente elétrica através de multicamadas de ferro e cromo (amostras com várias camadas

alternadas de Fe e Cr, cada uma com espessura de poucos átomos), e Grünberg estudava efeitos semelhantes no mesmo sistema Fe/Cr, mas utilizando amostras com apenas duas camadas de ferro separadas por uma fina camada de cromo (tricamadas). De maneira independente, ambos os grupos obtiveram resultados experimentais que evidenciavam uma mudança enorme na resistência elétrica em função do campo magnético aplicado. Os valores observados chegavam a variações de até 50%, muito superiores aos valores conhecidos da magnetoresistência tradicional, apresentada por metais e conhecida há muito tempo, que é de no máximo 2%. Vale destacar que o trabalho realizado no laboratório do prof. Fert

contou com a colaboração fundamental de um pesquisador brasileiro, Mário N. Baibich, atualmente docente do Instituto de Física da

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O impacto de tal artigo foi tal que o mesmo está hoje entre os dez artigos mais citados entre todos os trabalhos já publicados na revista *Physical Review Letters*, uma das mais prestigiosas revistas da física (3.580 citações até novembro de 2007).

O imenso potencial da magnetoresistência gigante para aplicações tecnológicas foi imediatamente percebido tanto pelos descobridores e demais pesquisadores da área quanto pela indústria de gravação magnética. Poucos anos depois, em 1997, a IBM já lançava no mercado o primeiro disco rígido com cabeça de leitura de dados baseada no efeito GMR. Tal tecnologia tornou-se padrão para discos rígidos, e o tamanho físico dos mesmos não parou de encolher desde então, enquanto a capacidade de armazenamento de dados (densidade de informação superficial gravada, normalmente medida em bits/polegada<sup>2</sup>) crescia continuamente. A razão para essa revolução tecnológica é discutida brevemente a seguir.

.....  
**Marcelo Knobel**

Instituto de Física ‘Gleb Wataghin’,  
 Universidade Estadual de Campinas,  
 Campinas, SP, Brasil

**Waldemar A.A. Macedo**

Laboratório de Física Aplicada, Centro  
 de Desenvolvimento da Tecnologia  
 Nuclear (CDTN)  
 Belo Horizonte, MG, Brasil  
 .....

---

Os vencedores do Prêmio Nobel deste ano propulsionaram a capacidade de armazenamento dos discos rígidos através de suas pesquisas em magnetoresistência. Outra área correlata, a spintrônica, representa o próximo passo de um avanço que trará a nova revolução da informática.



Albert Fert, nascido a 7 de março de 1938, concluiu sua graduação em 1962 na Escola Normal Superior de Paris. Recebeu seu título de mestre em 1963, na Universidade de Paris, e se doutorou em 1970, na Universidade de Paris Sul, em Orsay, onde se tornou professor. Foi agraciado com vários prêmios importantes ao longo de sua carreira, e em 2004 foi eleito para a Academia de Ciências da França.



Peter Grünberg nasceu em 18 de maio de 1939 em Pilsen, na então Boêmia (hoje parte da República Tcheca), e chegou à Alemanha logo após a Segunda Guerra Mundial, quando a população de língua alemã, a maioria, foi expulsa pelo governo local. Graduou-se em física em 1962, na Universidade Johann Wolfgang Goethe, em Frankfurt, e fez pós-graduação na Universidade Técnica de Darmstadt (mestre em 1966; doutor em 1969). Entrou para o KFA no início dos anos 70, onde permanece até hoje, embora aposentado desde 2004.

### Gravação magnética e GMR

O princípio da gravação e leitura magnética é relativamente simples. Na gravação magnética convencional, um cabeçote magnético indutivo é usado para “escrever” a informação em um meio de gravação magnética (fita ou disco). Esse meio se move com relação ao cabeçote, e assim os *bits* (transições entre regiões magnetizadas em sentidos opostos) são gravados ao aplicar pulsos de correntes positivas ou negativas à bobina. O mesmo cabeçote pode ser utilizado para ler a informação, pois seu movimento em relação ao meio magnético induz pequeníssimas correntes na bobina sensora, que são detectadas após uma cuidadosa amplificação e processamento. O sinal obtido está diretamente relacionado com a velocidade relativa do cabeçote e com o tamanho do *bit*.

Em estruturas formadas por sanduíches de ferro “recheados” com uma camada de três átomos de cromo, os pesquisadores mediram a resistência elétrica do sistema, para diferentes campos magnéticos aplicados. Quando as camadas de fora do sanduíche estão com alinhamento magnético contrário um ao outro, o dispositivo tem resistência elétrica alta. Entretanto, quando o alinhamento é paralelo (gerado pelo campo magnético externo), a resistência é menor, da ordem da metade da confi-

guração anterior (50%). A surpresa residia no fato de que até então uma variação máxima de cerca de 2% era conhecida, e portanto o fenômeno ganhou o adjetivo “gigante”. A explicação do efeito é razoavelmente complexa, e está fortemente relacionada com a mobilidade eletrônica em materiais magnéticos. De fato, o efeito GMR só foi descoberto graças ao impressionante desenvolvimento de diversas áreas da física da matéria condensada, em particular o crescimento de filmes finos. Em meados dos anos 1980 era finalmente possível crescer filmes ultra-finos e controlar isso de uma maneira adequada. Variando sistematicamente a espessura da camada de Cr, foi possível encontrar diferentes espessuras para as quais as camadas externas de Fe possuíam momentos magnéticos apontando em sentidos contrários. Nesse caso, a aplicação do campo leva a uma configuração onde os momentos magnéticos de ambas camadas se alinham. Essa mudança é fundamental para entender o fenômeno físico. O que ocorre é que os elétrons de condução dos materiais não possuem apenas a carga, mas também uma outra propriedade denominada spin, que pode ter essencialmente dois valores: “para cima” e “para baixo”. Pode-se considerar que a corrente elétrica é o resultado de duas correntes paralelas, uma devida aos elétrons com spin para cima, e outra aos elétrons com spins para baixo. O que leva à magnetoresistência é o fato da resistividade elétrica depender da orientação relativa entre o spin do elétron e a magnetização do material. Quando os sentidos são iguais, a resistividade é baixa, e quando eles são opostos, a resistividade é alta. Assim, ao ter um sistema com orientações anti-para-

lelas, ambos canais de spin terão resistividades equivalentes, e a resistividade total do sistema será elevada. Por outro lado, quando pelo menos um dos canais tem resistividade baixa, a resistividade do sistema será baixa também.

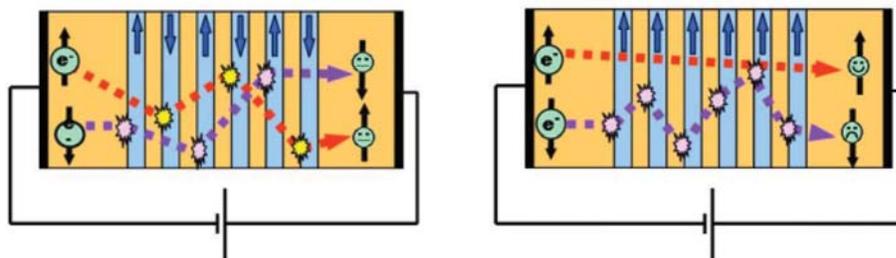


Figura 1. Esquema que representa os dois canais independentes de corrente elétrica, um com “spin para cima” e outro com “spin para baixo”. Quando as camadas magnéticas encontram-se no estado chamado anti-ferromagnético, ou seja, com momentos magnéticos alternados, cada canal de elétrons encontra regiões onde a probabilidade de espalhamento é alta, e assim ambos canais têm uma resistência similar, e a resistência total do sistema é alta. O esquema da direita ilustra a configuração ferromagnética, onde todos os momentos das camadas magnéticas apontam no mesmo sentido graças à presença de um campo magnético. Nessa configuração, apesar de um dos canais de elétrons ter uma resistência bem alta, o outro canal tem uma probabilidade de espalhamento bem baixa, e a resistência elétrica desse canal torna-se bem baixa. Assim como ocorre em um sistema de resistores em paralelo, a resistência total do sistema é bem menor do que a resistência da configuração antiferromagnética. É o chamado “efeito curto-circuito”

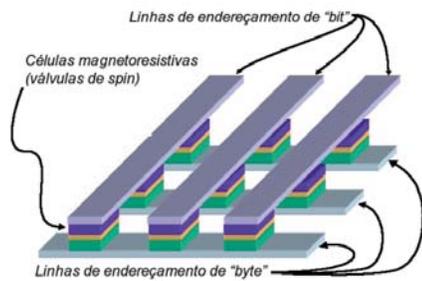


Figura 2. Esquema de possível dispositivo spintrônico, denominado “memória magnética de acesso aleatório”, em inglês MRAM. Linhas de corrente elétrica formam uma espécie de tecido, onde duas matrizes perpendiculares, conectadas por junções, apresentam magnetoresistência gigante. É possível controlar a leitura de cada linha dessa complicada matriz e, assim, descobrir se a resistência da junção é alta ou baixa, o que indica o estado magnético de suas camadas, que assim representam zeros e uns, onde a informação é armazenada. Esse dispositivo é não-volátil, ou seja, a informação armazenada não é perdida mesmo que a energia elétrica seja desligada. Há já protótipos bem interessantes de MRAMs no mercado.

A descoberta da magnetoresistência gigante rapidamente entusiasmou a indústria da informática, que vivia de ler campos magnéticos muito pequenos nos discos rígidos ou flexíveis. Ter um efeito maior significava poder ler coisas menores e com mais precisão. A utilização da magnetoresistência gigante na construção de cabeçotes de leitura permitiu que se convertessem alterações mínimas de campos magnéticos

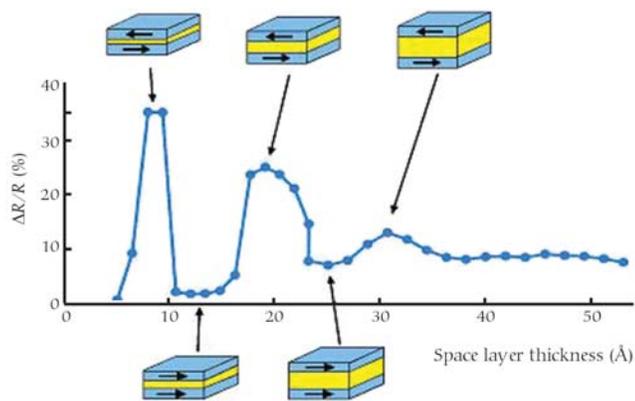


Figura 3. Ilustração do fenômeno do acoplamento magnético oscilatório entre camadas, descoberto por Grunberg. O acoplamento entre as camadas magnéticas depende da espessura da camada não-magnética de modo oscilatório, ou seja, a configuração varia entre ferromagnética e antiferromagnética conforme a espessura da camada não-magnética vai sendo aumentada. Assim foi possível escolher uma configuração ideal para estudar o fenômeno da magnetoresistência, onde o acoplamento fosse antiferromagnético.

em diferenças significativas na resistência elétrica e, por sua vez, em diferenças de sinal elétrico “facilmente” observáveis pelo cabeçote de leitura. Assim, após essa descoberta, uma nova tecnologia tem crescido continuamente nestes últimos anos, os chamados cabeçotes ativos, quase sempre baseados no fenômeno da magnetoresistência. Um cabeçote magneto-resistivo pode detectar um *bit* de informação ao passar por ele, pois este muda a sua resistência elétrica pela presença do campo magnético. Além disso, os cabeçotes magneto-resistivos não precisam ter uma geometria complicada, e eles podem ajudar a aumentar a densidade de informação contida nos discos magnéticos atuais, já que são capazes de ler as informações mesmo em maior densidade. Na realidade, os mais modernos cabeçotes de seu disco rígido usam um efeito conhecido como “válvula de spin”, que é uma adaptação inteligente do efeito originalmente descoberto. O efeito válvula de spin foi amplamente estudado, otimizado e implementado pelo grupo do dr. Stuart Parkin, nos laboratórios da IBM em Almaden, nos Estados Unidos. O uso da tecnologia de válvulas de spin nos cabeçotes de leitura possibilitou um aumento de mais de 100 vezes da densidade de armazenamento de informação dos discos rígidos de 1998 até hoje.

Os discos magnéticos comerciais podem guardar mais de cinquenta megabits por centímetro quadrado (Mbits/cm<sup>2</sup>), e espera-se muito brevemente atingir densidades de até mais um gigabit por centímetro quadrado (ou seja, para ter um disco rígido de 40 Gbits bastaria um disquinho de pouco mais de 3,5 cm de raio). A tecnologia envolvida nesse desenvolvimento é muito delicada, pois altas densidades de bits requerem que as cabeças de leitura e gravação sejam muito sensíveis e estejam muito próximas ao disco. Ao buscar aumentar a densidade de bits, há novos desafios a vencer para fabricar o material magnético do qual o disco é produzido (que deverá manter a informação gravada ao longo dos anos), para fabricar o material magnético do cabeçote de gravação (que fará o processo de escrever e ler a informação) e também no desenho geral do sistema, onde os atritos devem ser

minimizados e as colisões, evitadas. Hoje em dia, a maioria dos discos de computador é feita de filmes finos metálicos, de espessura inferior a 100 nanômetros, quase sempre de ligas a base de cobalto.

Apesar de ser uma descoberta de menos de vinte anos, hoje em dia o fenômeno da GMR é utilizado na enorme maioria dos cabeçotes de leitura dos discos rígidos, e toda uma nova área da física, conhecida como eletrônica de spin, ou spintrônica, tem se desenvolvido a partir dessa descoberta.

## Spintrônica

Além dos avanços na tecnologia relacionada com a leitura e gravação magnética, no que se refere a avanços na mídia de gravação e nas cabeças de leitura, há todo um campo novo que vem surgindo nos últimos anos, que promete literalmente revolucionar o nosso conceito de armazenamento e leitura de dados no computador. Até hoje, todos os componentes eletrônicos utilizavam somente uma propriedade dos elétrons: a sua carga. E mesmo assim maravilhas como o transistor foram desenvolvidas e aprimoradas. Mas após a descoberta da magnetoresistência gigante em 1988, vislumbrou-se a possibilidade de poder também controlar outra propriedade eletrônica, o *spin*. Com isso, vem surgindo uma série de idéias e protótipos que utilizam as incríveis propriedades de correntes elétricas com elétrons com apenas uma direção de spin bem definida, que atualmente podem ser bem controlados. Essa nova área de tecnologia de ponta vem sendo conhecida como *eletrônica de spin*, ou simplesmente *spintrônica*. Já existem protótipos de transistores de spin e até memórias comerciais não-voláteis que utilizam essa tecnologia.

Ninguém sabe ao certo aonde essas pesquisas irão levar, mas sabe-se que certamente irão revolucionar o futuro da eletrônica, da informática e até mesmo dos eletrodomésticos convencionais, com a massificação da incorporação de discos rígidos, microprocessadores e outros dispositivos nos mesmos. Vale a pena destacar que toda essa atividade de pesquisa iniciou-se e teve continuidade com a presença importante de pesquisadores brasileiros, que têm contribuído enormemente para fazer desta área uma das mais ativas no mundo da tecnologia, apesar das enormes dificuldades de fazer pesquisa de ponta no Brasil.

### Para saber mais

- M. Knobel, *Ciência Hoje* **159** (2000).
- M. Knobel, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**, 387, (2000).