

Estudo de efeitos de Magnetorresistência: Anisotrópica em Filmes Finos e Gigante em Válvula de Spin

André Almeida - up201304658

Abstract

Nesta realização experimental foi estudado o comportamento de duas amostras de filmes finos construídas especificamente para relevar significativamente o efeito anisotrópico e gigante (válvula de spin), respetivamente. Este estudo vou realizado tirando proveito do método dos 4 contactos para determinação precisa da resistência e aplicação de campo magnético uniforme numa configuração de Bobinas de Helmholtz. Foi determinada variações de 2.6% para a anisotropia em configuração paralela da corrente-magnetização. No caso da magnetorresistência gigante atinge-se variações de 7.6% para campos superiores a 25 Oe. Sensibilidades de aproximadamente 8 mΩ/Oe e 200 mΩ/Oe são atingidas para, respetivamente, filmes finos Ta/NiFe/Ta e válvulas de spin.

1 INTRODUÇÃO

A realização desta experiência vem motivada pela sua importância histórica e contributo para a comunidade científica. A essência da mesma foi glorificada com o Prémio Nobel de 2007[1], para Albert Fert e Peter Grünberg pela descoberta da Magnetorresistência Gigante (GMR). Com este tão importante efeito é possível construir vários dispositivos, dentre eles a importante Válvula de Spin. Dentro do mesmo tópico é também estudada a Magnetorresistência Anisotrópica (AMR), em que já foram reportados na literatura variações relativas de até 50% em compostos ferromagnéticos de Urânio[2].

2 TEORIA

Magnetorresistência é a tendência que um dado material tem em alterar a sua resistência elétrica quando sujeito a um campo magnético[3]. Este efeito foi descoberto por William Thomson em 1851. É conhecido que é um efeito dependente do ângulo presente entre a direção de corrente aplicada ($\vec{j}$) e o campo magnético ($\vec{H}$). Na sua natureza, este efeito surge devido ao desvio que os eletrões sentem, segundo a lei de Lorentz ($\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$). Com o avanço de tecnologias de sala limpa e deposição de filmes finos, as várias configurações de materiais fazem surgir efeitos específicos, entre eles efeito Anisotrópico e Gigante[1].

2.1 Magnetorresistência Anisotrópica

Um efeito conhecido, que leva a variações substanciais da resistência como função do ângulo em que é aplicado o campo. É um efeito que surge devido à interação spin-órbita. Neste efeito a resistência elétrica do material tem valor máximo quando a direção da corrente aplicada ($\vec{j}$) é paralela ao vetor de campo magnético $\vec{B}$.

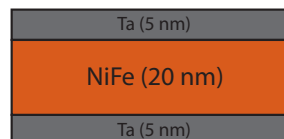


Figura 2.1. Filme fino utilizado aquando do estudo do efeito de Magnetorresistência Anisotrópica.

A posição dos contactos para medição da resistência é feita pelo método dos 4 contactos. A distância entre aqueles que aplicam corrente e os

que medem a tensão é significativa do ponto de vista geométrico, uma vez que devem ter uma distância suficiente para permitir uma homogeneidade das linhas de campo e o fluxo eletrónico seja laminar, sendo este uniforme e exista contribuição efetiva por parte de todas as camadas importantes do filme fino em uso - figura 2.1. Dada a resistividade do material e definindo ϕ como a diferença de ângulo entre o campo magnético $\vec{H}$ e a corrente elétrica $\vec{j}$, espera-se obter um comportamento como aquele definido na equação 2.1.

$$\rho(\phi) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp})\cos^2\phi \quad (2.1)$$

Como tal, é esperado um comportamento em $\cos^2(\dots)$, revelando um processo reversível e que por isso não danifica a amostra.

2.2 Magnetoresistência Gigante

Este é o efeito responsável pelo Prémio Nobel da Física de 2007. Surge quando é estudado o efeito de variação angular por campos magnéticos aplicados[4] em amostras com conjuntos camadas alteradas entre materiais ferromagnéticos e não magnéticos. Para completa caracterização do efeito é necessária a introdução de Mecânica Quântica.



Figura 2.2. Configuração das várias camadas do filme fino que constitui a válvula de spin enunciada.

Esta configuração permite construir um dispositivo denominado de válvula de spin, cuja resistência pode variar conforme o alinhamento magnético das camadas finas. Como essa alteração de resistência é significativa, o material apresenta uma grande resistência aos elétrons que apresentem dado spin e grande condutividade (quando comparada) aos restantes.

3 REALIZAÇÃO EXPERIMENTAL E DADOS EXPERIMENTAIS

Com o uso de uma Bobina de Helmholtz, cujas linhas de campo no seu centro geométrico são uniformes permitem aplicar um campo igualmente distribuído à amostra. Com um gerador de

signal (e fonte de corrente) e um multímetro controlados por software LabVIEW são configurados os vários parâmetros que se ajustam ao estudo e ao filme fino. Para este estudo aplicamos um largo varrimento de Campo Magnético aplicado a um passo de $\approx 40e$. A dependência angular foi ajustada por movimentos relativos e registadas fotografias das várias configurações geométricas aplicadas. Com uso de software gratuito *ImageJ* foi possível depois extrair das imagens o real ângulo aplicado.

3.1 AMR

Este fenómeno é estudado com uso de um filme fino constituído por uma sandwich de Ta (5nm)/NiFe (20nm)/Ta (5nm). É aplicada uma corrente de 5mA nos terminais exteriores do método dos 4 contactos. A leitura é feita pelo SourceMeter Keithley. O campo magnético é obtido a partir de uma sonda de Hall aplicada perpendicular ao campo pelo que a determinação e transmissão de dados é protagonizada pelo Gaussmeter. O culminar de todos os ficheiros registados e analisados é apresentado na janela gráfica do LabVIEW e guardado em ficheiros *.lvm*. Pode-se verificar na figura 3.1 o comportamento deste filme para os vários ângulos ϕ indicados, uma vez aplicada a lei de Ohm para inferir sobre a resistência do filme.

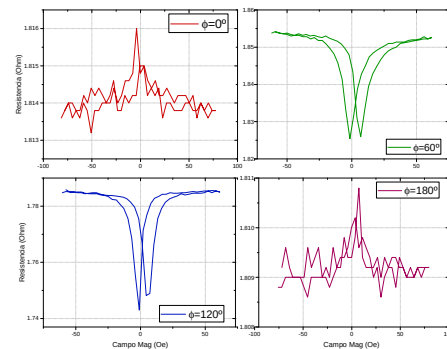


Figura 3.1. Representação simples dos dados experimentais obtidos para os ângulos indicados. De notar a flutuação (ruído) dos dados para ângulos paralelos ao campo $\vec{B}$.

Como se pode ver existe um comportamento significativo da resistência com o campo aplicado. Mais ainda, existe também comportamento significativo com o ângulo entre o vetor campo e corrente, tal como era de esperar. Um caso importante e significativo é aquele em que se vê a variação máxima observado no estudo de cada ângulo entre os vetores significativos ($\vec{j}$ e $\vec{H}$). Pode-se observar nas figuras ... e ... duas representações esclarecedoras sobre o material.

Observa-se uma ligeira forma de caracterização por um $\cos^2(\dots)$. Importante é, de facto, observar a existência de um eixo fácil e difícil da direção em que é aplicada a corrente elétrica.

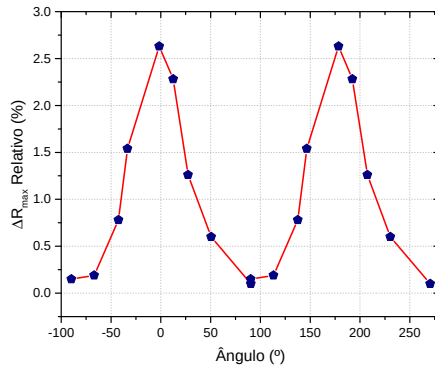


Figura 3.2. Representação ortogonal dos dados experimentais obtidos para a variação máxima da resistência medida com o avanço do ângulo aplicado entre a corrente elétrica e o campo magnético.

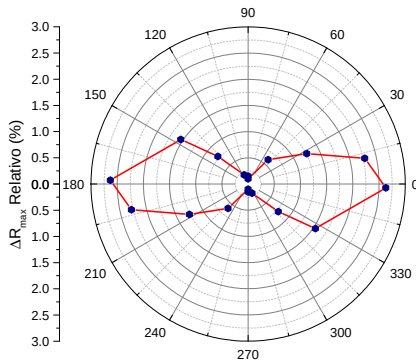


Figura 3.3. Representação polar dos mesmos dados experimentais que na figura 3.2.

É importante referir que as várias camadas têm um efeito dramático no desempenho do filme fino. Por exemplo, a orientação do eixo fácil e difícil impõem um comportamento importante no comportamento quando está na ausência de campo.

Mais ainda, devido à sua grande potencialidade para efeitos de sensores, uma característica essencial a estudar neste efeito é a sua sensibilidade e gama de operação. Como se pode ver pela figura 3.1 a gama de operação suficiente para se identificar claramente o efeito é próxima de $|\vec{B}| = 80\text{Oe}$. Uma representação bastante clara dos dados de sensibilidade, obtidos por diferenciação, está presente na figura 3.4.

Como se pode ver, existe grande sensibilidade deste sensor nos casos em que o ângulo entre

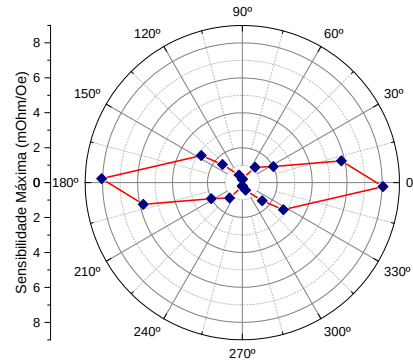


Figura 3.4. Comportamento da sensibilidade característica da configuração em estudo.

o campo aplicado $\vec{B}$ e a corrente elétrica $\vec{j}$ é paralela.

3.2 GMR

Este efeito, aquele que deu o Nobel, é de uma significância tremenda. O artigo original revela efeitos para vários $k\text{Oe}$, porém com alterações estruturais à constituição do filme fino pode-se construir uma válvula de spin que apresenta igualmente efeitos bastante significativos para ordens de 10^2Oe em campo aplicado. Esta válvula de spin utilizada é amplamente na indústria pela sua enorme aplicação nas agulhas de leitura de discos rígidos. Uma vez tendo esta motivação presente para proceder ao estudo deste efeito, foi utilizada uma válvula de spin constituída por Ta (5nm)/CoFe (2nm)/NiFe (1.5nm)/Cu (2.2nm)/CoFe (3nm)/MnIr(7nm)/Ta (5nm). Com exatamente a mesma configuração e equipamento utilizado para o estudo da AMR procedeu-se à aquisição de dados experimentais - figura 3.5. Verifica-se a presença de um ciclo histerético para este efeito que mostra a dependência natural do "percurso" do campo aplicado.

Apesar de tudo, obtém-se variações bastante significativas e elevadas quando comparadas com a AMR. Este tipo de resultado está identificado claramente nos eixos do gráfico identificado na figura 3.5. É evidente a variação até do centro geométrico em que o ciclo se encontra localizado. Isto surge devido ao alinhamento do eixo fácil da amostra não estar alinhado com a corrente elétrica que se propaga no filme fino. Foi conhecido que o eixo fácil da amostra faz um ângulo de aproximadamente 45° com o vetor de propagação $\vec{j}$.

Com estes dados, mais uma vez aplicamos a Lei de Ohm para inferir sobre a resistência (sabemos que a corrente aplicada pela amostra

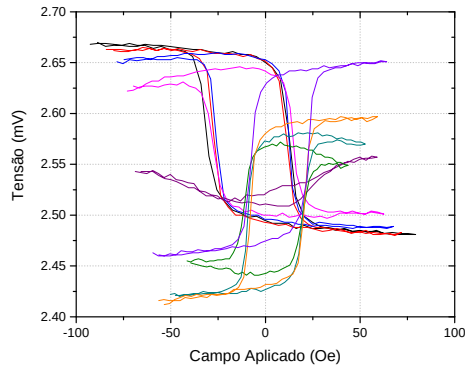


Figura 3.5. Aglomerado de todos os dados experimentais recolhidos para as várias orientações angulares investigadas.

foi de $0.1mA$). Uma vez determinada a relação entre a leitura do SourceMeter e a resistência oferecida pela amostra ao fluxo de eletrões podemos estudar a variação máxima que a amostra apresenta para as várias orientações angulares. Essa caracterização da amostra torna-se bastante fácil de visualizar se for representada num gráfico polar, como aquele da figura 3.6.

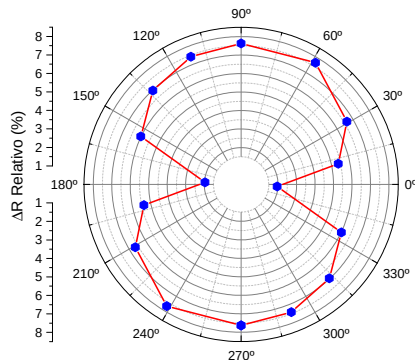


Figura 3.6. Representação polar da variação relativa que a válvula de spin apresenta com o ângulo entre o a corrente $\vec{j}$ e o campo $\vec{B}$ aplicados.

Dada a natureza com que os dados foram adquiridos (interação angular) este tipo de gráfico oferece, além de dados experimentais, uma observação bastante mais intuitiva. Devido à aplicabilidade industrial e de larga escala possível com este efeito, atualmente bastante presente nas agulhas de discos rígidos, ser capaz de caracterizar a sensibilidade torna-se vital para conhecer a melhor gama de trabalho e forma de aplicar. Como se pode ver na figura 3.7, a maior sensibilidade é obtida a $\pm 90^\circ$, com o ângulo ϕ já previamente definido.

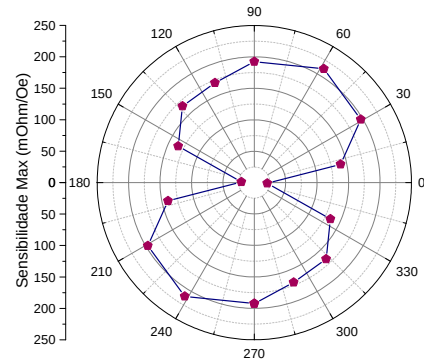


Figura 3.7. Sensibilidade observada para a válvula de spin. De notar a grande diferença obtida quando comparada com a sensibilidade obtida para o efeito anisotrópico.

4 CONCLUSÕES

Com a realização experimental e estudo de ambos os fenómenos relatados neste documento podemos concluir que tanto o efeito da Magnetoresistência Anisotrópica e Gigante têm presença bastante significativa e suficiente para se quantificar. Porém, verifica-se que a anisotrópica apresenta menores variações relativas do que aquelas obtidas para a magnetoresistência gigante. Relativamente à AMR verificamos que observamos um efeito muito significativo ($\Delta R \approx 2.6\%$) para configurações que revelem alinhamento paralelo entre os vetores em estudo. Como consequência, e dado o interesse de aplicabilidade, obtemos para estas mesmas condições de alinhamento a mais alta sensibilidade. Verifica-se que a curva apresenta um carácter que vai com $\cos^2(\dots)$. Com o estudo da GMR verificamos atingir variações relativas da resistência R medida muito superior àquela obtida para a AMR, atingindo casos bem superiores a 5%. Também se verifica-se que a sensibilidade permite determinar este fenómeno com equipamento não tão sofisticado.

Potencialidades destas tecnologias são vastas e existem já aplicações bastante notáveis, como é o caso já referido das agulhas de leitura em discos rígidos.

REFERÊNCIAS

- [1] The Royal Swedish Academy of Sciences. The nobel prize in physics 2007. 2007.
- [2] Piotr Wisniewski. Giant anisotropic magnetoresistance and magnetothermopower in cubic 3:4 uranium pnictides. *Applied Physics Letters*, 2007.
- [3] Sarah M Thompson. The discovery, development and future of gmr: The nobel prize 2007. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008.
- [4] J. L. Duvail A. Fert R. Morel L. B. Steren, A. Barthelemy and F. Petroff. Angular dependence of the giant magnetoresistance effect. *Physics Review B*, 1995.