

磁阻的研究簡介

現就讀於臺灣大學物理所博士班

何家驊

歷史記載，關於磁性的研究遠從中國黃帝發明指南針就開始了；雖然磁性如此早被發現，但千年後磁性的研究仍然很緩慢；自量子力學逐漸地被建立，磁性的起源才慢慢地被了解。目前已了解且發現的磁性有鐵磁、反鐵磁、順磁、逆磁等等，其中鐵磁與反鐵磁被稱為集體磁性(collective magnetism)(註1)，顧名思義，是整體的原子或分子聚集在一起才可以產生磁性，這種集體的行為從Heisenberg提出的exchange coupling $w_{ij} = -2J_{ij} \cdot S_i \cdot S_j$ 而被開始研究。為何元素週期表中，鐵、鈷、鎳的磁性較強？我們不能給予一個簡單的解釋或公式去計算，因為當many-body problem加入量子力學的計算後，其複雜程度是可想而知的；但可以確定的一點是，從實驗的觀點可以找到exchange的範圍 - 即多少原子聚在一起時才會有磁性。

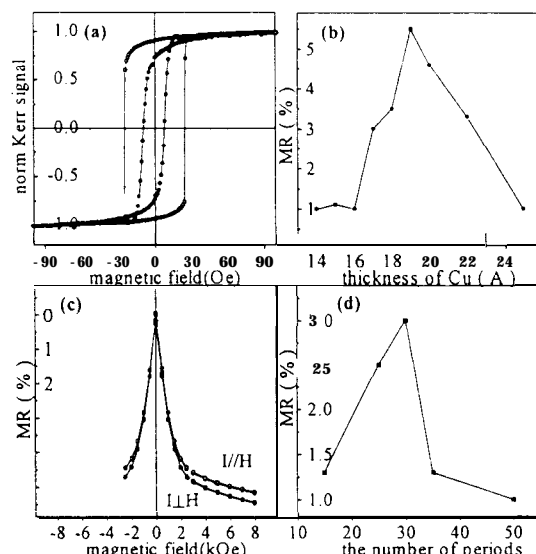
筆者研究的題目是磁阻的性質，明白一點就是外加磁場之後物質電阻的變化情形，專門是以磁性物質為研究的對象，如鐵、鈷、鎳及其合金等。這類的研究在近幾年來由於應用範圍廣而被廣受重視，一年之內會有超過千篇以上的這類論文被發表，實是令人驚訝。已經成功地應用且上市的产品有如硬碟讀寫頭(註2)及磁感應器(註3)等等，均大幅地提高原有產品的效率，接下來更令電子業者垂涎的研究有如磁阻記憶體(MRAM)(註4)、磁阻電晶體等等

的大宗產業，現在中央研究院與工研院合作的MRAM計畫便是將學術推向工業化的例子。

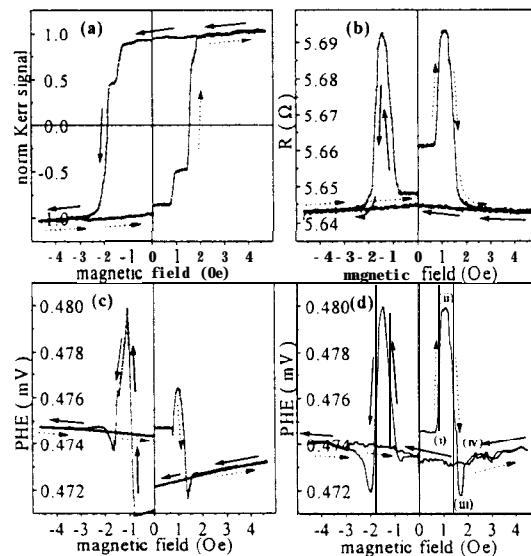
基本上筆者所用的材料是鐵鎳合金，成份比例是20：80，這種合金又稱坡莫合金(permalloy)，它要飽和所須的磁場非常小，就薄膜而言，飽和磁場約不到5Oe(比地磁大一點)，可以說是應用化上的最佳材料。將其以濺鍍(sputter)方式製成薄膜，再加上其他材料，如銅、鉻、鐵、鈷等，可以做成目前磁性研究上最熱門的巨磁阻效應(簡稱GMR)(註5)，這是筆者論文之內最主要的研究。磁阻(以下簡稱MR)是非常早被發現的性質，1857年Tomson在鈷鎳合金中發現異向性磁阻(簡稱AMR)到1988年中，有非常多的學者以古典或量子力學的理論對MR做一合理的解釋，且有人以AMR的性質去做成應用的產品；1988年後Baibich發現鐵/鉻多層膜， $(Fe/Cr)_n$ ，具GMR的性質(註6)至今，已有數種MR的形態被發現，如超巨磁阻(CMR)和穿透式磁阻(TMR)等(註7)。

GMR簡單來說是外加磁場後，薄膜的電阻不會依測量方向的不同而有不同的變化，且這電阻的變化是極大的。若以電阻變化的百分比值來看，一般金屬約小於-0.1%、一般磁性薄膜約小於±3%，而GMR薄膜可達20~30%，這裡正或負分別定義為外加磁場後電阻是下降或上升，這些比較都是在室溫的，在

低溫下由於自旋被凍住(frozen) (註8)，將使百分比更加提高。由於巨大且各向同性的電阻變化對元件而言就是巨大且各向同性的0-1訊號，因此GMR被格外的受重視。GMR已經發展十年了，有三種類型的薄膜先後被發現有GMR的性質：(1)磁性金屬多層膜(MMM)，層與層分隔開的磁性與非磁性金屬厚度分別都只約10~20埃與5~30埃，由於RKKY反鐵磁耦合(註9) (見圖一a)及自旋相關性散射(簡稱SDS)，使得某些厚度的多層膜會出現GMR(見圖一b)。在筆者所作的研究中發現，若磁性層NiFe厚度固定15埃且多層膜週期數 $n=30$ ，則在Cu厚度19埃時會出現室溫約6%的GMR(見圖一c)。這類的薄膜由於品質要求非常高(厚度誤差小於1埃)，因此不易做出GMR，而筆者所在的組群也是試了非常多的鍍膜技巧後才成功的。圖一d是在各種不同的週期數時其MR的變化(註10)。(2)自旋閥薄膜(SV) (註11)，顧名思義，是將自旋控制得有如閥門一樣的開關；即某一磁性層的自旋被外加條件控制住(如被反鐵磁層拉住或本身的頑磁較高)，另一磁性層的自旋即可藉由外加磁場的控制，而與被固定住的自旋平行或反平行，造成鐵磁或反鐵磁態，由於SDS的影響而出現GMR。最好的例子是FeMn/NiFe/Cu/NiFe(註12)，與FeMn鄰近的NiFe其自旋被FeMn拉住，而另一NiFe的自旋便可與其平行或反平行。對於自旋閥的研究，筆者是針對NiFe/Cu/NiFe三層膜開始的，下層NiFe是鍍在Si(100)基板上的，與上層NiFe是鍍在Cu上的不同，其頑磁力必定也不同，因此會在某一磁場範圍造成反鐵磁(見圖二a)而產生GMR(見圖二b)；這



圖一 (a)多層膜Si(100)//Fe₅₀/(NiFe₁₅/Cu_x)₃₀/NiFe₁₅在Cu厚度14埃(空心點)和19埃(實心點)的磁滯曲線分別顯示鐵磁和反鐵磁態(b)固定週期數30,在Cu厚度19埃附近,其MR值較大,顯示了RKKY反鐵磁耦合(c)Cu厚度19埃-圖b中MR值最大一時的MR曲線,不僅顯示了巨大的電阻變化且也可看出各向同性(d)固定Cu厚度為17埃而只改變多層膜的週期數,其MR的變化,發現30週期時的MR值較大

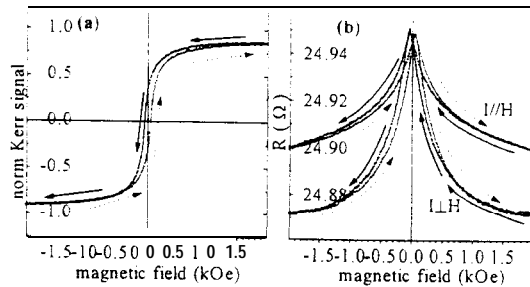


圖二 (a)三層膜Si(100)//NiFe₂₀₀/Cu₁₅₀/NiFe₂₀₀的磁滯曲線,出現在磁場約10e的step即為上下兩層NiFe因磁化強度反向所造成的反鐵磁(b)此樣品的MR曲線,在反鐵磁處因SDS使得電阻變大,此即SV的GMR(c)此樣品PHE的量測,在反鐵磁處會有double-peak現象(d)對此樣品的PHE做模擬,(i-iv)是兩層NiFe的磁化強度不同時翻轉180°在cos θ sin θ 中所產生的peaks

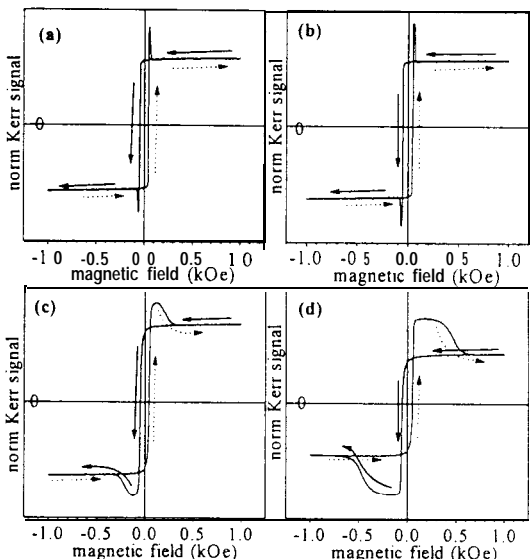
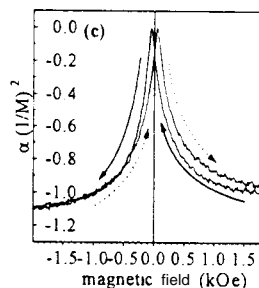
也可以從平面霍爾效應(PHE)(量測電壓與電流垂直,不同於量測電壓與電流平行的MR)去驗

證(註13)(見圖二c)。圖二d是由extra-ordinary PHE的公式 $E_y = -j\Delta\rho \cos\xi \sin\xi$ 所模擬圖二c的結果。 E_y 是樣品內電場的y分量，即PHE的值； j 是被提供的電流密度； $\Delta\rho$ 是電流平行和垂直磁場時電阻率的差； ξ 是磁化強度與電流的夾角。圖中(i)到(ii)代表其中一層NiFe其磁化強度翻轉所造成的 $\cos\xi \sin\xi$ ，而(iii)到(iv)代表另一層NiFe的翻轉。(3)晶粒態(granular)薄膜(註14)，最著名的例子是將NiFe晶粒(約nm的大小)鑲入銀的介質中，由於巨大的面積-體積比例，使得介面SDS效應變大而造成GMR。這鑲入的方法一般是用加熱退火(annealing)多層膜而得，筆者研究中以電流加熱退火NiFe/Cu/NiFe三層膜，發現亦可以產生GMR的性質，且符合由理論推導granular的式子 $MR \propto \left(\frac{M_s}{M}\right)^2$ (註15)。圖三a和b分別為三層膜加熱退火後的磁滯曲線及MR，圖三c是由上式模擬的MR圖。

在研究GMR的過程中，也有些意外的發現：(1)(註16)原本是屬於自旋閥的薄膜在磁滯曲線中卻出現了磁化強度的超出(overshooting)如圖四a、b、c、d。雖然我們可以以模型去模擬它，但其實際的物理機制我們仍不確定，有可能是Cr的反鐵磁性質造成，也有可能是MOKE對此系列樣品的反射率有另一性質，因此有必要將更進一步地探討。圖四中可以了解當緩衝層(buffer layer)越厚時，其磁化強度的超出將越明顯。(2)多層膜中即使是同樣的厚度、週期、基板等等條件，其MR性質會因鍍膜的方向不同(註17)或加了緩衝層後而出現完全不同的性質(註18)，如圖五a、b、c、d。雖然都是多層膜，但(a)我們發現其與單層膜時的AMR

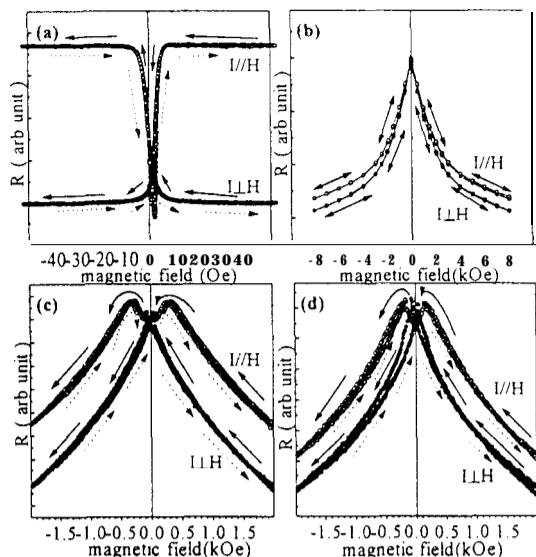


圖三 (a)三層膜Si(100)//NiFe_{200Å}/Cu_{150Å}/NiFe_{200Å}以900mA的電流加熱退火後所得的磁滯曲線，除了無easy與hard之分外，其飽和磁場增加了近千倍(b)在電流平行與垂直磁場時MR的趨勢一樣，即產生GMR；不過在飽和時，電阻差別不小，因此自旋-軌道耦合的效應仍很大(c)以granular所推導出的公式模擬的MR，除了零磁場的電阻值外，一般而言，與(b)的圖形差不多

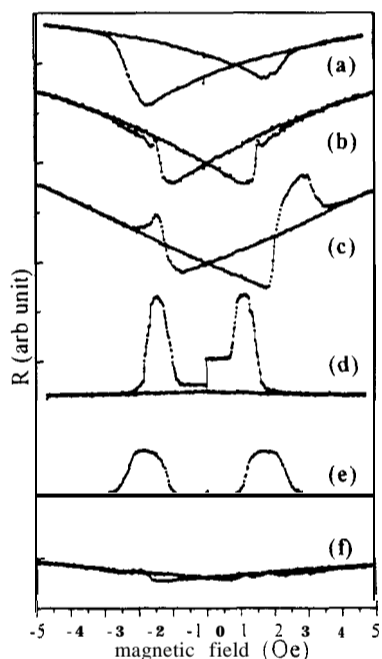


圖四 (a)glass//Cr_{xÅ}/Co_{200Å}/Cr_{70Å}/NiFe_{150Å}的磁滯曲線，x=150(b)x=235(c)x=500(d)x=650，可以清楚地發現當緩衝層Cr的厚度越厚時，磁滯曲線的超出(overshooting)就越明顯；由於此為SV形式的薄膜，因此超出可預測為NiFe與Co形成反鐵磁；緩衝層Cr鍍在玻璃上是使表面的平整度變好，因此第二層Co的品質依好壞為(d)>(c)>(b)>(a)

差不多，可能的原因很多，如每層的NiFe自旋並不是我們以RKKY理論所假設的單磁區，而是各種方向都存在的多磁區，因此反鐵磁耦



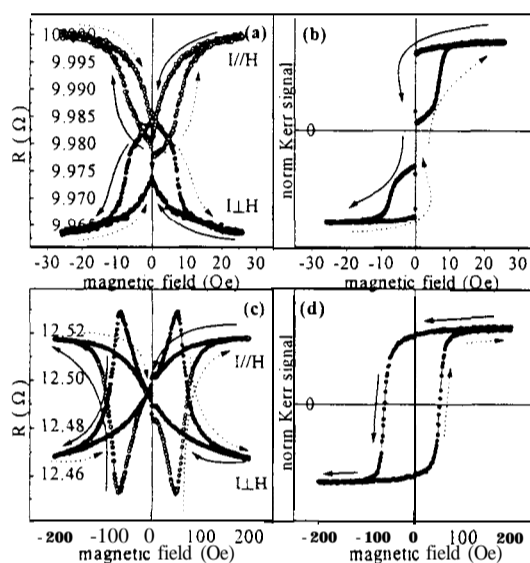
圖五 (a)多層膜(NiFe₁₅A/Cu₁₄A)/NiFe₁₅A鍍在Si(100)上所
得的MR,這是AMR的形式,其I//H與I⊥H的電阻變化趨勢不一樣
(b)同一個多層膜但鍍在Fe的緩衝層50Å上,基板仍是Si(100),
這是GMR的形式,且飽和磁場比(a)大多了(c)同一多層膜
但以offaxis的方式鍍出,除了類似GMR之外,其飽和磁場也比
(a)大(d)同一多層膜以offaxis鍍在Fe的緩衝層50Å上,與(c)
的情形差不多,但與(b)就差別很大



圖六 三層膜NiFe₂₀₀A/Cu_xA/NiFe₂₀₀A在各種不同
Cu厚度的MR(a)x=15(b)x=60(c)x=100(d)x=150(e)x=400
(f)x=600

合便很弱；或是layer texture所造成。(b)以Fe
做為緩衝層，便如理論所得的結果一樣。Fe對

其所造成的影響，我們仍然不完全清楚，但
兩種極可能的原因是：Fe的自旋影響了NiFe的
自旋；或Fe對NiFe/Cu多層膜的結構產生影響。
(c)當鍍膜的方向與原先的改變了約90度，-稱
為ofaxis-此時的MR卻出現了類似GMR的形狀。
與(a)來比較，其兩多層膜的結構不同，因而
造成不同的結果。(d)與(c)一樣的鍍膜方式，
且與(b)一樣鍍在Fe的緩衝層上，其結果與(c)
的結果差不多，並沒有造成像(b)一樣的GMR。
(3)並非所有的三層膜NiFe/Cu/NiFe都有GMR性
質。如果Cu厚度太薄，會使上下兩層NiFe鐵



圖七 (a)三層膜NiFe₂₀₀A/Cu₁₅₀A/NiFe₂₀₀A以300mA加熱退火
後所得的MR曲線(b)為其對應的磁滯曲線,磁滯曲線已經幾
乎是各向同性(c)三層膜NiFe₂₀₀A/Cu₁₅A/NiFe₂₀₀A以900mA加
熱退火後的MR(d)為其對應的磁滯曲線,也是各向同性

磁耦合而無法形成反鐵磁態，因而造成AMR
(如圖六a、b)；但Cu如果太厚且超過電子的反
應距離(response distance)(電子能記憶其自旋所
走的距離)，則上下兩NiFe的反鐵磁態便無法
分辨，也是形成AMR(如圖六f)。筆者的研究
中發現能有GMR的Cu厚度範圍約 100~400埃，

因此電子在三層膜內的反應距離約有400埃，比塊材內的190埃大兩倍以上。圖六中也可看到GMR的peaks會從AMR的coecivity後漸漸出現(圖六c)；當Cu厚度增加後，AMR項將由於GMR的產生而無法辨識(圖六d、e)。(4)雖然可以由加熱退火三層膜NiFe/Cu/NiFe而得到granular的GMR，但並非所有的三層膜加熱退火都有此性質。一般得到granular GMR的組群也都會藉由加熱退火的溫度及磁性晶粒-介質比例兩個變數來顯示MR的特性(註19)；筆者針對三層膜中不同的Cu厚度經加熱退火來比較及不同加熱退火的電流來比較。圖七c、d顯示了當介質(Cu)的量比磁性晶粒少時，縱使用各種不同的電流來加熱退火都不會有GMR的產生，這是合理的，因為此時已經變成磁性層內夾雜著非磁性晶粒，當然還是AMR，不過與未加熱退火時比較，除了飽和磁場增加外，在 $I//H$ 與 $I \perp H$ 時coecivity的MR將較顯著。圖七a、b顯示了由SV的GMR經加熱退火後變成granular GMR的中間情形，在零磁場時MR與磁滯曲線的急速變化代表著NiFe部分變成晶粒而部分仍是一整塊的，因此晶粒部分會使飽和磁場增加，而未成晶粒的NiFe將使MR與磁滯曲線在零磁場時產生急速變化。

上述是筆者在碩士班期間所做的相關研究。近年來真空、測量的技術突飛猛進，使得固態的理論跟不上實驗的腳步，就如磁阻的研究來講，雖然只是電阻的量測，但其牽涉的領域甚廣，也很複雜，包括自旋、晶體結構、表面或介面條件、散射等等，這是一種巨觀的現象，如何把這巨觀且包括各種複雜因素的混合以簡

單的模型或公式條列出，便是我們做實驗的責任，進而對於材料的開發及工業的進展將有莫大裨益。

感謝讀者不吝花費時間看完本篇，希望它能讓您對這跨世紀記憶材料 - 磁阻材料 - 有所幫助，不啻在新知識的了解甚至研究上的新構想。

本篇的實驗結果完成於中央研究院物理所，非常感謝指導老師 - 姚永德博士的大力指導，也很感謝組群內的老師們，包括劉鏞老師、I.Klik、盧志權博士、吳至原博士等等的大力協助，及助理潘逸民、賴素貞、林政德、同學徐丹凱、趙堅銘等的幫忙。

(中華民國研究生優良論文研究心得)

參考資料：

- 註1: S.Chikazumi, Physics of Magnetism, 83, New York: John Wiley (1964)
- 註2: Yun Zhang, S.Shtrikman, H.Neal Bertram, IEEE trans.magn, 33, 1093, (1997)
- 註3: Timothy, J.Moran and Dan Dahlberg, Appl. Phys.Lett, 70, 1894, (1997)
- 註4: D.D.Tang, P.K.Wang, V.S. Sperious, S.Le and K.K.Kung, IEEE trans.magn, 31, 3206, (1995)
- 註5: S.S.Parkin, Phys. Rev. Lett, 67, 3598, (1991)
- 註6: M.N.Baiaich, J.M.Broto, A. Fert, F.Nguyen van Dau, F. Petroff, P.Etienne, G.Creuzet, A. Friederich and J.Chazelas, Phys. Rev.Lett, 61, 2472 (1988)
- 註7: Terunobu Miyazaki, Seiji Kumagai and Toshihiko Yaoi, J.Appl.Phys, 81, 3753, (1997)

註 8 : S.S.P.Parkin, R.Bhadra and K.P.Roche,
Phys.Rev.Lett, 66, 2152 (1991)

註 9 : D.N.Aristov, Phys.Rev.B, 55, 8064, (1997)

註 10 : M.Sato, Ishio and T. Miyazaki, J.M.M.M.,
126, 460, (1993)

註 11 : B.Dieny, J.M.M.M 136, 335 (1994)

註 12 : B.Dieny, V.S.Speriosu, S.S.P.Parkin, A.
Gurney, P. Baumgart and D.R.Wihoit, J.
Appl.Phys, 69, 1297 (1991)

註 13 : B.Zhao, X.Yan and A.B. Pakhomov, J.Appl.
Phys, 81, 5527, (1997)

註 14 : B. Dieny, S.R.Teixeira, B. Rodmacq, C.

Cowache, S.Auffret, O.Redon and J.Pierre,
J.M.M.M, 130, 197, (1994)

註 15 : L.Sheng, D.Y.Xing, modern physics letter B
7, 1365 (1993)

註 16 : C.K.Lo, I.Klik, C.H.Ho, Y.Liou, Y.D.Yao,
IEEE trans. magn, 33, 3526, (1997)

註 17 : Y.Hoshi, E.Suzuki and M.Naoe, J.Appl.Phys,
79, 4945, (1996)

註 18 : R.Nakatani, K.Hoshino, S.Noguchi and Y.
Sugita, Jpn. J.Appl.Phys, 33, 133, (1994)

註 19 : X.Bian, Z.Altounian, J.O Stom-Olsen and A.
Zaluska, J.Appl. Phys, 75, 6560, (1994)



健仁氣體股份有限公司

專業氣體商



一般工業用、醫療用各種氣體
 O_2 、 C_2H_2 、Ar、 N_2O 、 CO_2
半導體、特殊、雷射用氣體
 WF_6 、LHe、Xe、 PH_3 、 SiH_4
各種氣體配件，低温容器

解決您使用上的困擾
是我們服務的最大宗旨

新竹縣竹北市博愛街760巷6號
電話：(035)516256-7
傳真：(035)551732