

教學心得

巨磁阻效應教學實驗

呂虹萱 陸健榮

國立台灣師範大學 物理所

摘要：2007 年物理諾貝爾獎得獎題目為「巨磁阻效應」。此效應的發現，不但開啓了自旋電子學的大門，而且使磁性記錄的技術有了重大的躍進。爲了讓學生在享受科技進步的同時，也能了解背後科學家的努力研究。我們設計了巨磁阻教學實驗，讓學生從操作中去學習巨磁阻效應的原理。實驗開端先設置一螺線管，提供螺線管電流，達到電生磁的效應，再將巨磁阻感測器放置在螺線管內，紀錄感測器的電阻值變化。由外加磁場改變，感測器電阻值隨之改變的情形，向學生引入巨磁阻效應的概念。對於中學生及大一新鮮人，我們使用他們能理解的電阻串並聯模型來解釋巨磁阻效應的機制；而更進階的學生，則可以做磁滯效應的數值分析部分。

關鍵詞：巨磁阻效應、教學實驗

壹、前言

一般高中教材中所教授的實驗，主要以一些驗證基本定律的實驗爲主。爲了更開拓學生的物理視野，引進現今科技產業中的技術，設計成教學實驗。將 2007 年諾貝爾得獎題目「巨磁阻效應(Giant Magnetoresistance, GMR)」融入教學，提供學生了解近年來的科技發展，與科技背後的物理知識背景爲何。

我們將巨磁阻感測器置放在通有電流的螺線管內部，以歐姆計測量其電阻值，觀察變換螺線管電流大小時，感測器電阻值的變化情形。並利用電流磁效應的運算，將電流值轉換爲磁場值，再將電阻代入 GMR 比值公式，做出 GMR 比值與外加磁場的關係圖，最後繪出之圖形結果可分階段性的提供學生學習。

貳、巨磁阻原理簡介

一、何謂巨磁阻效應？

若物質的電阻值於外加磁場下改變，即定義爲發生磁阻效應(Magnetoresistance effect, MR)。而巨磁阻效應因爲其磁阻效應遠大於常磁阻(Ordinary Magnetoresistance, OMR)，因而得名。人們一般約定一個 GMR 比值來量化材料的磁阻強弱，此 GMR 比值的定義是電阻值的變化量除以在飽和磁場中的電阻值，即[1]

$$MR = \frac{\Delta R}{R} = \frac{R(H \neq 0) - R(H = 0)}{R_{sat}(H \neq 0)} \quad (\text{Eq.1})$$

二、磁性複合膜

巨磁阻材料在外加磁場下，磁性層內的磁矩轉動，爲造成此效應的主要原因。以三層磁性複合膜爲例，也就是(磁性/非磁性/磁性)交錯相疊的金屬薄膜組合，如圖 1-(a)。當不存在外加磁場時，奈米厚度的磁性層內的磁矩彼此耦合[2]，磁矩會呈現反平行排列，

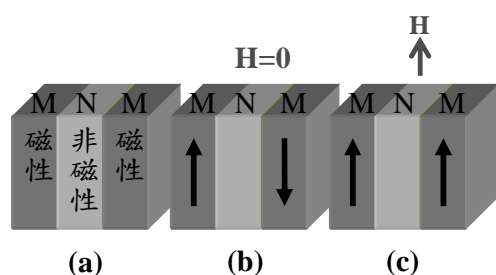


圖 1：多層磁性複合膜(a)三層結構-磁性 M/非磁性 N/磁性 M(b)無外加磁場時，磁性層內磁矩反平行排列(c)給予一外加磁場，磁性層內磁矩指向外加磁場方向。

如圖 1-(b)；當給予一外加磁場，磁矩指向皆改變為外加磁場的方向，參見圖 1-(c)。在零磁場下磁矩反平行排列，而在外加磁場下磁矩平行排列，這個差異造成電子通過磁性複合膜時，被散射的程度不同。

三、電阻率與電子自旋

探討電流通過磁性複合膜時電阻值的變化，可討論其電阻率便可知曉。已知電子被散射的機率越大，電阻率則越大。當電子通過圖 1 中磁矩向上的磁性層時，可從圖 2-(a) 中看見原子最外層軌域中，自旋向上的電子比自旋向下的電子多，造成自旋向下的空態較多。當自旋向上的電子通過時，由於缺乏自旋向上的空態，使其散射機率較低，因此磁性層中的自旋向上的電阻率 ρ_M^\uparrow 小，以小方格表示；反之，自旋向下的空態較多，自旋向下的電子通過時，就較易被散射而填進空態，而得到自旋向下的電阻率 ρ_M^\downarrow 較大，以大方格表示，比較後得知 $\rho_M^\downarrow > \rho_M^\uparrow$ 。

經過巨磁阻材料的非磁性層時，從圖 2-(b) 中可看見原子最外層軌域的自旋向上與向下的空態一樣少，造成自旋向上的電阻率 ρ_N^\uparrow 與自旋向下的電阻率 ρ_N^\downarrow 相等，也就是

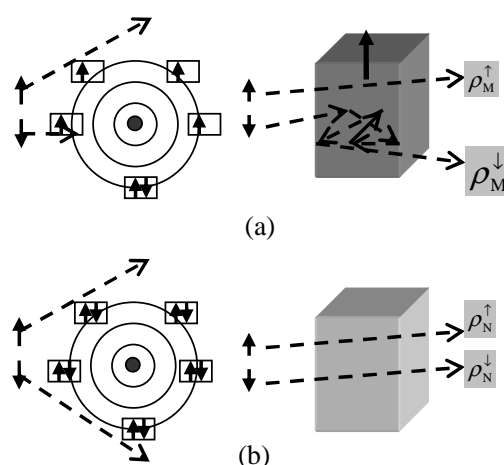


圖 2：電子散射機制圖(a)磁性物質最外層軌域電子填充方式以自旋向上較多、自旋向下較少，造成自旋向上電子被散射機率高、自旋向下電子被散射機率低(b)非磁性物質最外層軌域電子填充方式自旋向上與向下數目相同，使自旋向上、向下電子被散射機率相同。

$$\rho_N^\uparrow = \rho_N^\downarrow。$$

為了清楚三層磁性複合膜的綜合機制，先以圖 3-(a)來說明。當外加磁場為零時，磁性複合膜中的兩層磁性層的磁矩排列為反平行，而電子在自旋方向與磁矩排列方向相反時，被散射機率較大，因此我們可以看見自旋向上的電子在第三層被散射的機率較大、自旋向下的電子則在第一層被散射的機率較大。在圖 3 中我們僅以一次散射來表達多次散射的情形。類推到外加磁場不為零時，如圖 3-(b)，此時磁性複合膜中的兩層磁性層內的磁矩皆指向外加磁場方向，造成自旋向上電子通過時散射機率較低、自旋向下電子通過時分別在第一與第三層有較大的散射機率。

四、自旋電流雙通道模型

由於自旋向上與自旋向下的電子在通過

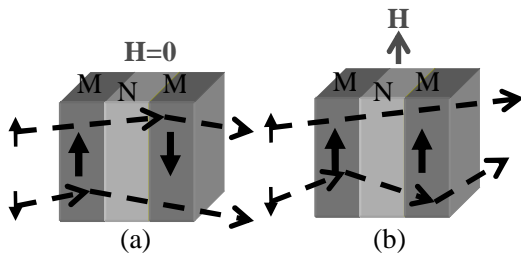


圖 3：電子在三層磁性複合膜中的散射情形(a)外加磁場為零，自旋向上、向下電子分別在與自身磁矩方向的相反層被散射(b)外加磁場不為零，只有自旋向下電子在兩磁性層中被散射。

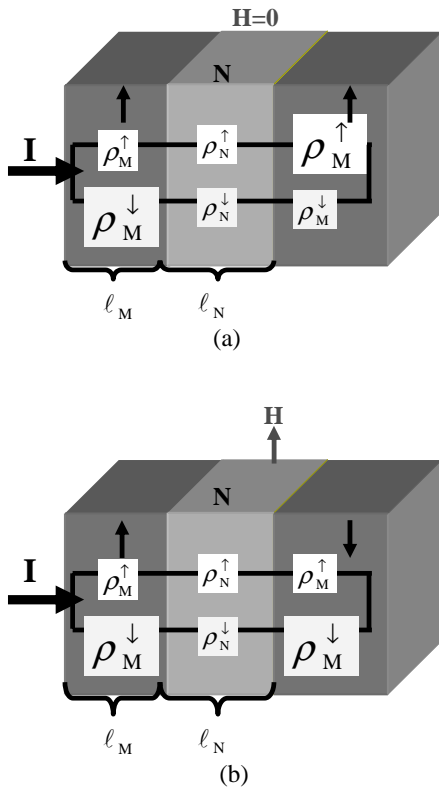


圖 4：電子在三層磁性複合膜中電阻率大小(a)外加磁場為零(b)外加磁場不為零

巨磁阻材料時，各自有自己的管道，因此我們使用自旋電流雙通道模型來計算整體材料的電阻值。不同自旋方向的電子對於電流的

貢獻不同，因此將兩種自旋情況分開討論，並假設會形成兩個電流通路，一為自旋向上，另一為自旋向下。在圖 4-(a)中可以看到磁場為零時，電流 I 通過時兩通道的電阻率組合皆為「小小大」，使得兩通道對電流來說皆不易通過。參照電阻率 ρ 的基本定義[3]

$$R = \frac{\rho \ell}{A} \quad (\text{Eq.2})$$

將電阻率乘以材料厚度 ℓ ，並假定面積 A 為單位面積後，可將電阻率轉變為電阻值 R 。串聯同一通道的電阻值，再並聯兩通道的等效電阻值，最後可得到磁場為零時的電阻值 $R(H=0)$ ，而此電路模型即稱為「自旋電流雙通道模型」。同理，在圖 4-(b)中，自旋向上的通道中的電阻率大小為「小小小」、自旋向下的通道中的電阻率大小為「大小大」，串並聯後得到等效電阻值 $R(H \neq 0)$ 。比較 $R(H \neq 0)$ 與 $R(H=0)$ 的大小，可得到 $R(H=0) > R(H \neq 0)$ 。

參、教學實驗設計對象

根據 99 新課綱的設計，一般普通高中學生，在高一修習基礎物理時，會提到磁場的概念與簡單的電流磁效應，而在高三物理的電流章節，應介紹基本電路、電阻值和電阻率的定義、以及電路串並聯的計算，並配合惠司同電橋的實驗，而後面電流磁效應的章節，內容還包括螺線管電流產生均勻磁場的機制。在近幾年，教育部通過成立的高中科學班中，學生更是提前在高一、二學完高中物理，而在高三先修大學普通物理及實驗。因此我們根據學生的學習基礎以及教師的教學需求，與巨磁阻效應背景理論相比對，將此實驗教材規劃為三個階級。

初階：適合一般高中生學習，內容主要包含電阻率的定義、電阻串並聯的計算，再延伸介紹自旋電流雙通道模型；再來為進

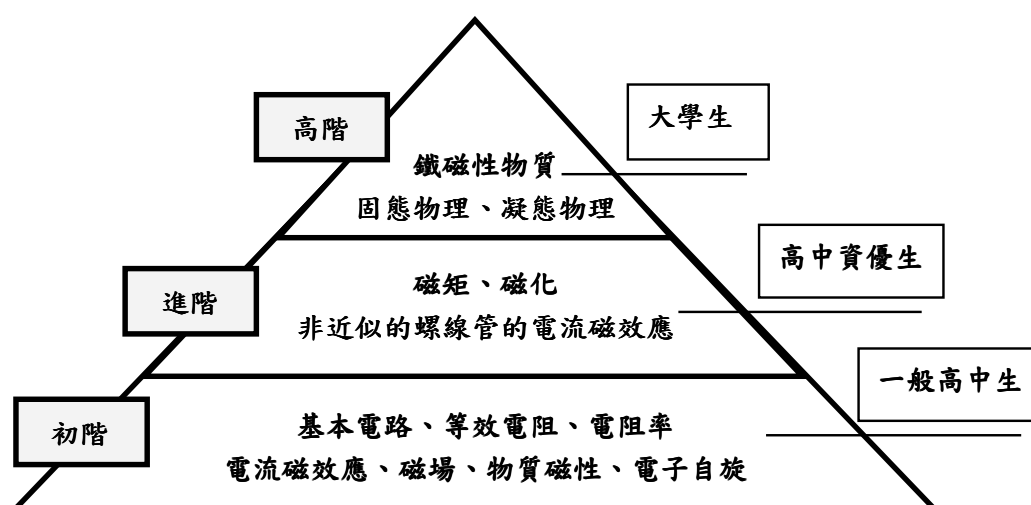


圖 5：巨磁阻效應教材階段分級圖。金字塔最低階的學科內容適合一般高中生，進階的內容適合高中資優生，最高階的學科知識則適合大學生研讀

階：規劃給高中資優生學習，不僅包括了第一階段的內容，並更深入介紹磁化的特性、磁滯曲線，另外可再補充非近似情況下螺線管的電流磁效應；最後為高階：適合大學生學習，能更清楚的介紹巨磁阻效應中較專業的知識部分，像是鐵磁性物質的特性、奈米科技、能帶結構。

教材階段分級整理如圖 5，提供給學生做為基礎實驗學習、專題研究或科展等用途。

肆、實驗裝置

本教學實驗使用 NVE 公司製造的 AAH-004 巨磁阻感測器。此感測器的外部構造如圖 6-(a)。圖中箭頭方向為此感測器的感測軸，磁場方向必須平行於此感測軸，感測器的探測才會最準確。

此外，感測器外觀有八個接腳，中間四個無作用，依據感測器上的圓形記號，逆時針數來分別為端點 1、2、3、4，各端點內部的電阻橋接如圖 6-(b)，其中兩個電阻為一般

電阻 R ，另外兩個為巨磁阻電阻 R_{GMR} 。

先將螺線管線圈的兩端接至電源供應器，並提供電流給線圈，使線圈內部產生均勻磁場。接著置放感測器於螺線管內部，根據感測器上接腳的方位，判斷其感測軸的方向，讓感測軸平行於螺線管方向後，固定感測器於螺線管內中心處。最後，連接歐姆計於感測器的兩端點，實驗裝置即設置完成如圖 7。

依據感測器構造與實驗裝置，可將本實驗分為兩部分電路，如圖 8。第一部分：如圖 8-(a)，為螺線管迴路，並由直流電源供應電流給線圈。第二部分：如圖 8-(b)，感測器迴路，並以歐姆計測量端點 2-4 間的電阻值(端點 1-3 與端點 2-4 等值)。

伍、實驗結果

一、零磁場時之初始電阻值測量

以歐姆計測量圖 6-(a)中之 1-2 端點的電

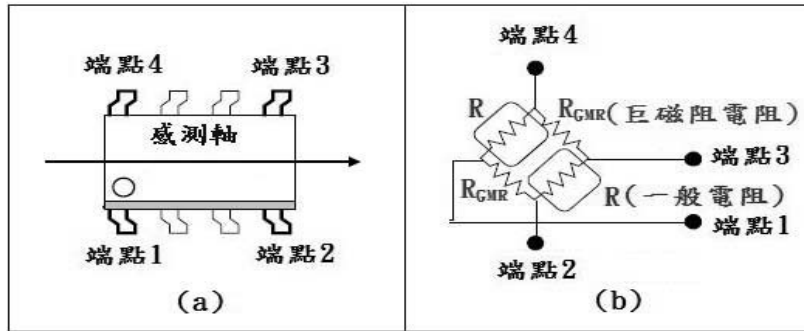


圖 6：巨磁阻感測器構造圖(a)外部設計(b)內部設計
(圖片引用自：GMR Sensor Catalog of NVE Corporation)

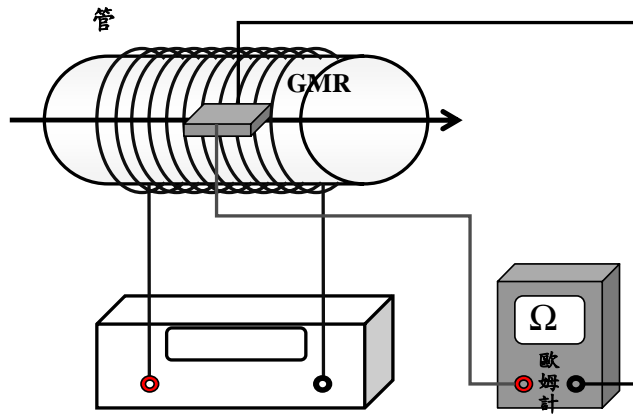


圖 7：室溫下巨磁阻效應實驗裝置圖

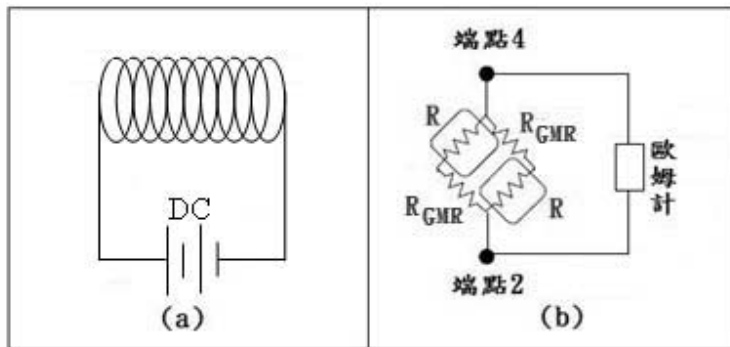


圖 8：巨磁阻教學實驗裝置電路圖(a)通 DC(直流電)的螺線管迴路(b)感測器迴路

阻 R_{12} 、1-3 端點的電阻 R_{13} 、1-4 端點的電阻 R_{14} 、2-3 端點的電阻 R_{23} 、2-4 端點的電阻 R_{24} 、3-4 端點的電阻 R_{34} ，結果如表一。根據圖 6-(b)電阻串並聯的情形，可以列出等

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_{34}} = \frac{1}{R_{GMR}} + \frac{1}{2R + R_{GMR}} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\frac{1}{R_{13}} = \frac{1}{R_{24}} = \frac{2}{R + R_{GMR}} \quad (\text{Eq.4})$$

表 1：感測器兩端點之電阻值

電阻	電阻檔位	20(k Ω)
$R_{12} = R_{34}$		1.55
$R_{13} = R_{24}$		2.06
$R_{14} = R_{23}$		1.56

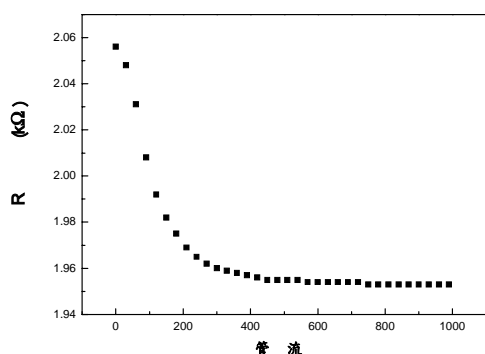


圖 9：室溫下感測器(AAH004-00)的電阻值隨螺線管的單向電流的變化圖

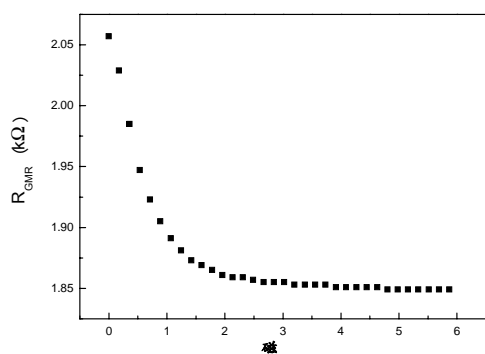


圖 10：GMR 電阻值-外加磁場圖

$$\frac{1}{R_{14}} = \frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{2R_{GMR} + R} + \frac{1}{R} \quad (\text{Eq.5})$$

將表 1 的數值代入後，得到 R 為 2.05 k Ω 、無外加磁場下的 R_{GMR} 為 2.07 k Ω ，皆約為 2 k Ω 。

二、單向電流操作

以磁場為操縱變因。單向增大螺線管電流值，電流每增加 30mA，紀錄一次歐姆計的讀數。當電流達到 420mA 時，感測器的電阻值不再有明顯下降，再陸續觀測至電流達 990mA，感測器電阻值都無太大變化，即停止增大螺線管電流。整理實驗數據繪製成圖 9，圖中的縱軸為感測器 2-4 端點間的電阻值，橫軸為通過螺線管之電流值。觀察圖形可發現，隨著電流值的增加，巨磁阻感測器的電阻值會先驟減再趨於平緩。

由於此實驗的目的是要探討電阻值與磁場之間的關係，因此，我們根據電流磁效應中螺線管與產生磁場的關係式

$$B = \mu_0 in \quad (\text{Eq.6})$$

來計算每個電流值所造成的磁場值大小。本實驗所使用的螺線管之 n 值為 708，並已知 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 。隨著磁場的改變，感測器內部的巨磁阻電阻值會改變，而一般電阻值不變，我們再次利用等效電阻(Eq.4)計算式，固定一般電阻 R 等於無外加磁場下的 R_{GMR} ，並將每個磁場下感測器 2-4 端點的電阻值 R_{24} 代入，經過計算得到隨磁場變化的 R_{GMR} 值。以電流磁效應造成的磁場為橫軸，隨磁場變化的 R_{GMR} 值為縱軸，繪出圖 10。圖中顯示隨著外加磁場的增大，巨磁阻電阻的電阻值則減小，呈現所謂的「負磁阻」效應。

三、雙向電流操作

將電流雙向操作，由 0mA 逐漸增大至 990mA，再由 990mA 減小，經過零點後，持續下降至 -990mA；接著反向增大電流，經過零，最後停在 990mA，為一次完整的實驗流程，實驗結果如圖 11。

依照單向電流操作所介紹的電流與磁場

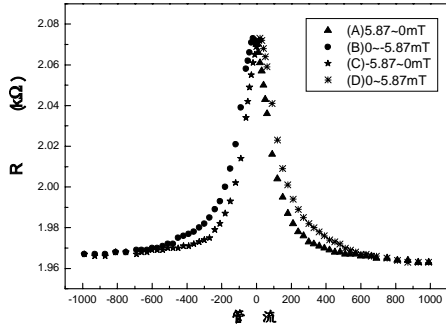


圖 11：室溫下感測器(AAH004-00)的電阻值隨螺線管的單向電流的變化圖

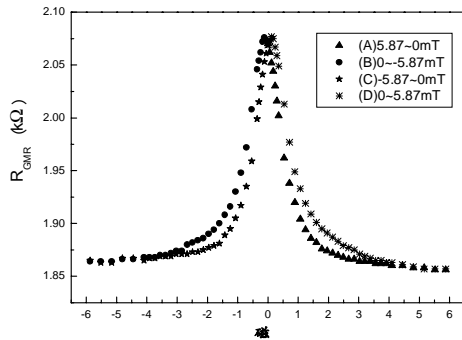


圖 12：GMR 電阻值-外加磁場圖

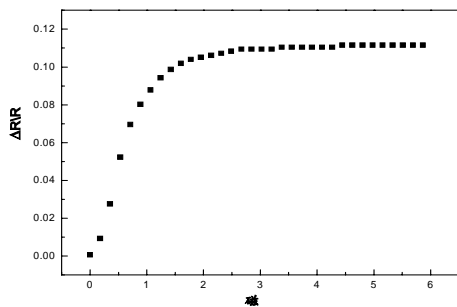


圖 13：單向電流操作的 GMR 比值-外加磁場圖

關係、感測器內巨磁阻電阻值 R_{GMR} 的計算，推算可將雙向電流操作時 R_{GMR} 隨外加磁場的變化情形整理如圖 12。由於一開始 0~990mA 的實驗結果屬於單向操作的部分，

在此就不再多做表示與論述。

陸、實驗分析

一、自旋電流雙通道模型計算

我們採用「GMR 比值」公式(如 Eq.1)來計算實驗中所使用的感測器內部的巨磁阻電阻效率。

單向電流操作的 GMR 比值隨磁場的變化如圖 13。圖中橫軸為外加磁場、縱軸為磁電阻比值 $\frac{\Delta R}{R}$ 。實驗結果的 $\frac{\Delta R}{R}$ 皆為正值，顯示在磁場中，系統的電阻值隨磁場增加而減小，所以 $\frac{\Delta R}{R}$ 值逐漸增大。並且，由圖 13

中的數值可看出當磁場達到 2.5mT，磁電阻比值即不再有大幅度的變化，此時磁電阻比值約為 11%，此磁場即為飽和磁場。

圖 14 為雙向電流操作 GMR 比值隨外加磁場變化的結果，橫軸為外加磁場、縱軸為磁電阻比值 $\frac{\Delta R}{R}$ 。觀察圖形，不難發現磁阻比值隨正向磁場增加而增加的趨勢和單向電流操作時相同。但雙向電流操作時，隨負向磁場增加，磁阻比值也一樣增加。

二、磁化曲線模擬

由巨磁阻效應的原理介紹中，可以知道巨磁阻材料中磁性層的磁矩指向影響著通過材料時的電阻值大小，因此可初步推論 GMR 比值和磁化強度密切相關。

接著由磁性材料的磁化強度與磁場的關係式[4]

$$M = N\mu \tanh\left(\frac{\mu(H + \lambda M)}{k_B T}\right) \quad (\text{Eq.7})$$

來看。此式中 M 為磁化強度、 N 為單位體積內的原子數、 μ 為磁矩大小、 λ 為分子場

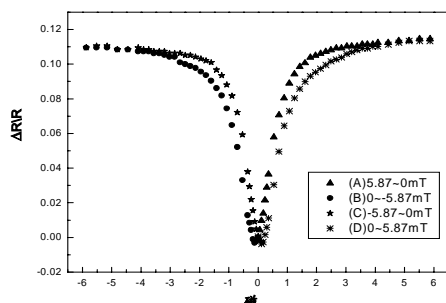


圖 14：雙向電流操作的 GMR 比值-外加磁場圖

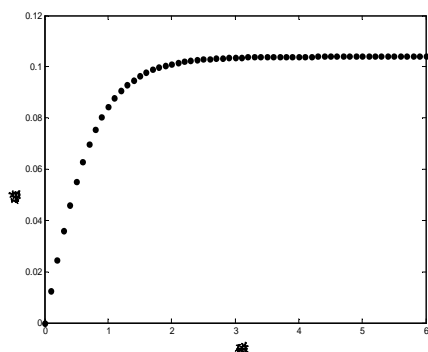


圖 15： $M = N\mu \tanh\left(\frac{\mu(H + \lambda M)}{k_B T}\right)$ ，利用圖解法求得的(單向)磁化強度-外加磁場圖

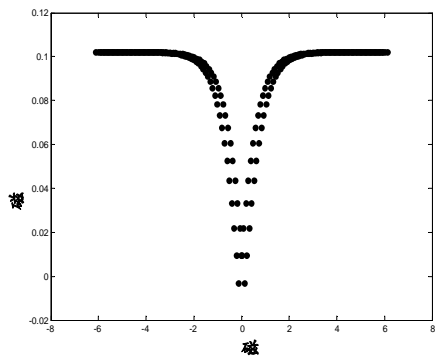


圖 16： $M = N\mu \tanh\left(\frac{\mu(H + \lambda M)}{k_B T}\right)$ ，利用圖解法求得的(雙向)磁化強度-外加磁場圖

係數、 H 為外加磁場、 $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ 為波茲曼常數、 T 為溫度(k)。

利用圖解法求解方程，若令

$x = \frac{\mu(H + \lambda M)}{k_B T}$ ，可得兩條曲線方程式，分別為

別為

$$M = \frac{k_B T}{\lambda \mu} x - \frac{H}{\lambda} \quad (\text{Eq.8})$$

$$M = N\mu \tanh(x) \quad (\text{Eq.9})$$

固定參數 N 、 μ 、 λ 、 k_B 、 T 的值，若給予一外加磁場 H ，就能求得兩曲線的一交點 (x, M) 。我們使用數學運算軟體 Matlab，設定磁場由 0 開始增加，並將 N 、 μ 、 λ 的值予以最佳化，每增加 0.1mT 取一次交點。接著將磁場值當成橫軸、得到的交點中的 M 值為縱軸，最後「磁化強度-外加磁場」對應的結果如圖 15 所示。與圖 13 比較，顯示兩圖的縱軸值皆隨著外加磁場增加先快速增加，再達飽和。證實巨磁組比值 $\frac{\Delta R}{R}$ 確實對應著內部磁性層的磁化強度大小。

在雙向電流操作的情形中，我們將(Eq.7)與(Eq.8)的磁場大小改為由 -6mT 到 6mT 的範圍去求取交點。至於磁矩記憶性造成的磁滯大小，可以從雙向電流操作的實驗數據圖 14 中推估。若使模擬曲線向左、向右平移約 0.12mT、向下平移約 0.003，則可得到如圖 16 的雙向磁滯曲線圖與圖 14 的雙向電流操作的[GMR 比值-外加磁場]圖一致。

三、磁滯現象分析

雙向電流操作時，磁場增加與磁場減小的曲線未重合，而有磁滯現象。參考圖 17 的磁滯曲線圖形中的點虛線部份，我們知道當磁場由 0 開始慢慢增加，順著外加磁場方向的磁區開始擴大，造成磁化強度增強，此時把外加磁場去除，磁區會退回原來的大小，整個材料會回到磁中性的狀態，此階段為可逆位移；超過可逆位移的外加磁場值後，如圖 17 中的虛線部分，隨著外加磁場的

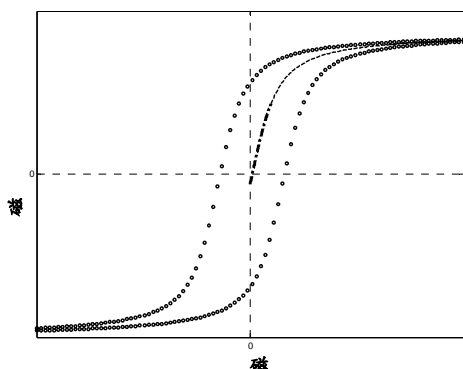


圖 17：磁

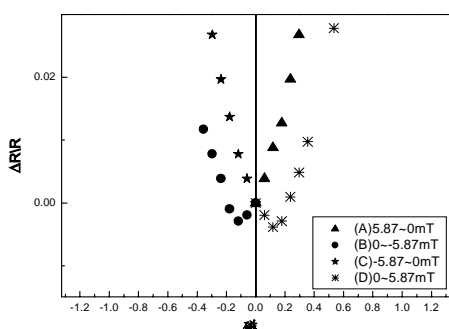


圖 18：雙向電流操作的 MR-外加磁場圖在座標零附近的放大圖

增加，磁化強度開始急遽增加，材料中的磁矩開始轉向，指向外加磁場，之後的磁化過程變為不可逆；最後不管外加磁場如何增加，磁化強度不再明顯增加時，即達飽和磁場，如圖 17 中的實線。

開始將外加磁場減小，由於磁矩指向的回復較困難，具有記憶性，因此我們可以看出圖 14 中，雙向電流操作時，外加磁場由 0 開始增加至飽和磁場，與從飽和磁場減小至 0 時，對應到的 GMR 比值不相同，而有些微差距的原因。

再繼續將磁場降至零時，材料仍存在些微的磁化強度，需要反向增加磁場到某個程度才能抵消剩餘磁矩。因此，我們可以在圖 14 中看見外加磁場由 5.87mT 降至 0 的過程

中，GMR 比值都在持續下降，外加磁場繼續由 0 降至 -0.12mT，直到剩餘磁矩被抵消至零為止，GMR 比值則降至負值 -0.003。為了更清楚圖 14 中接近零磁場的 GMR 比值大小，可參照放大圖 17。同理，當外加磁場由 -5.87mT 增加 0.12mT 的過程中，GMR 比值也會隨外加磁場的增加而持續減少至負值。

柒、結論與展望

巨磁阻教學實驗的設計，可以達到以下幾個目的：從初階的巨磁阻電阻初始值量測，能讓學生熟悉電阻串並聯的計算；進階實驗結果分析可從單向電流操作中，看見巨磁阻效應的發生，與其「負磁阻」特性，接著由磁化強度與磁場的關係式模擬計算中，驗證了實驗結果與理論數值的一致性。最後，高階的學生可由雙向電流操作中，和已學過的磁滯理論做連結，培養學生分析實驗圖表的能力。

我們都知道巨磁阻效應為硬碟容量帶來如此大的變革，其中的應用也很廣泛，因此將此效應設計成實驗，能幫助更多學生去認識這效應的發現。下一步設計出一套簡易的降溫系統，再更深入地去探討巨磁阻效應變溫下的機制，將是我們努力的目標。

參考文獻

1. 陳穗斌 張慶瑞：自旋相關碰撞之電子傳輸描述。物理雙月刊(二十六卷四期)，2004.8
2. CHARLES KITTEL , Introduction to Solid State Physics”, p.326, 8th ed
3. Halliday, Resnick, Walker, ”Fundamentals Of Physics”, P.688~P.690, 7th ed
4. M.J. Thornton and M.Ziese(Eds.) : LNP 569,

- P.71-88,2001. Phenomenological Theory of Giant Magnetoresistance.
5. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2007, The Discovery of Giant Magnetoresistance.

advanced students.

Key words: Giant Magnetoresistance effect · experimental teaching

The experimental teaching of Giant Magnetoresistance effect

Chien-Rong Lu Hung-Hsuan Lu

National Taiwan Normal University

Abstract

The Nobel Prize in Physics 2007 was awarded to Giant Magnetoresistance. The discovery of this effect not only opened the door of the spintronics but also improved the magnetic recording technology. In order to introduce the fundamentals of the new technology and let students know the hard work of the scientists, a Giant Magnetoresistance teaching experiment was designed. From operating the experiment, students can learn the principle of Giant Magnetoresistance. In the experiment, a solenoid was used to provide the magnetic field. Then, a GMR sensor was set in the center of the solenoid. As the magnetic field was changed, the resistance of GMR sensor will also be changed. By way of Recording the data and processing the whole information, teachers can bring in the concept of Giant Magnetoresistance. And a phenomenal model was discussed with resistance combined with series and parallel which can be understandable for the middle school students and the fresh men. Moreover, the hysteresis effect was analyzed numerically for the