

## 淺談巨磁阻

部落格上撰寫文章或是瀏覽分享照片，幾乎成了全台世界半數以上年輕人每天必做的事情。在使用如此便利的資訊交流管道同時，你是否想過這背後最強力的推手是什麼嗎？答案是便宜且大容量儲存系統的誕生。若沒有便宜且足夠的記憶空間做後盾，部落格應該還只是個構想。可儲存上千首歌的 iPod shuffle 僅僅十克重且長度才五公分！電腦中的 MRAM 讀取和寫入速度能比先前的快！你或許不知道現今的科技產品，儲存容量大、體積輕薄短小、速度快，這一切都根源於巨磁阻現象的發現。

大家都知道，電腦所了解的語言就是二元訊號的組合。有訊號就是 1，沒訊號就是 0。這裡的訊號可以是電阻、電流或是其他物理量。藉由大量 0 和 1 的組合和邏輯運算，電腦便可以處理資訊。其中 0 和 1 的分辨率是一項影響電腦效能的重大因素。若是電腦讀到的訊號太弱，似有若無，電腦就容易判讀錯誤以至於資訊處理錯誤而造成速度遲緩。因此，利用適當的材料和物理現象產生明顯的訊號差，就成為一項發展資訊科技重要的課題。

在現存一百多種基本元素中，鐵、鈷、鎳三種元素因其軌域的特殊性，而存在著較強的磁矩，我們稱其為鐵磁性元素[1]。鐵、鈷、鎳等鐵磁性物質及其合金對於磁場反應較其它元素靈敏且強烈，而最直接能反映其影響的物理量就是電阻。我們稱受到外加磁場而產生的電阻變化為磁阻。產業上常常利用鐵磁材料的特殊磁阻性質作為資料儲存讀取的技術，藉由磁阻的大小來定義資訊處理中的 0 和 1。

80 年代，人們利用於儲存資料的讀寫頭，磁阻變化約為百分之一。礙於讀寫頭的靈敏度不高，儲存的能力一直沒有強大的發展。直到巨磁阻現象的發現，這方面才有革命性的突破。

### 巨磁阻現象的發現

1988 年德國尤李西研究中心的科學家彼得·葛倫貝格和巴黎第十一大學的科學家亞伯·費爾分別獨立研究了磁性材料（鐵）和非磁性材料（鉻）相間薄膜層結構的磁阻。實驗結果顯示兩個特性：第一，當磁場由零增加，電阻隨著磁場增加而減小。當磁場大於某個臨界值，不論磁場如何地增加，磁阻維持定值。第二，磁阻的變化非常的巨大。

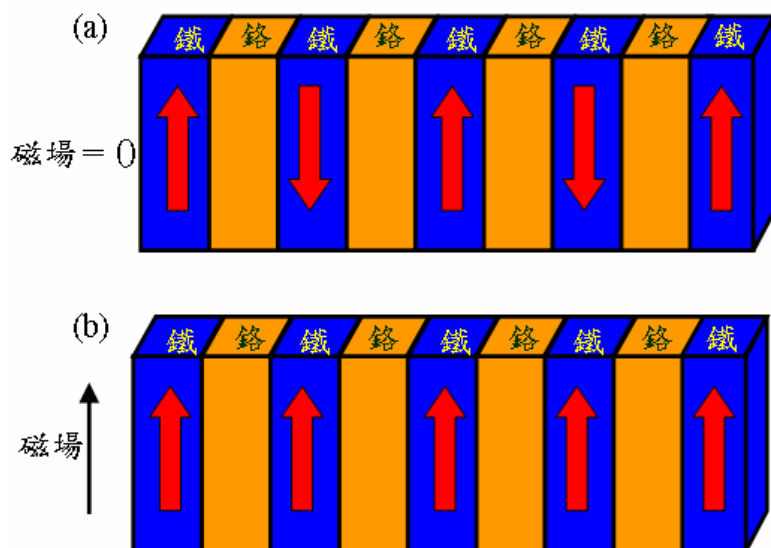
葛倫貝格最初的研究是鐵、鉻、鐵三層薄膜組成的結構物質，磁阻下降了 1.5%[2]、接著葛倫貝格研究鐵、鉻、鐵、鉻、鐵五層薄膜組成的結構物質，實驗結果顯示磁阻下降了 10%。而費爾團隊研究了鐵、鉻組成的多層結構[3]，實驗結果顯示，在 4.2K（攝氏零下 269 度）的環境下進行，最大的磁阻下降率約

為 80%，若是實驗溫度為室溫，磁阻下降率約為 20%。與傳統材料磁阻下降約為百分之二的情況相比，這個巨大磁阻變化的現象無不振奮人心，科學家也對這類多層結構材料成為新一代資料儲存技術寄予厚望。

### 巨磁阻物理原理

為什麼外加磁場可以讓這類的薄膜有如此巨大的磁阻變化呢？關鍵就在於鐵薄膜層磁矩方向的控制。

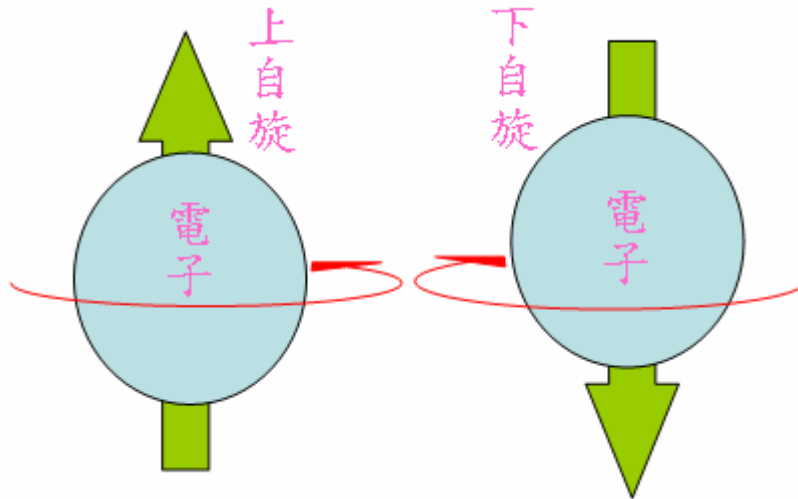
在上訴鐵、鉻相間的多層膜結構中，兩相鄰鐵薄膜層中的磁矩會交互作用改變彼此磁矩的方向，而中間鉻薄膜層的厚度則扮演了重要的調節角色。如圖一(a)所示，當鉻薄膜層厚度恰當時，兩相鄰鐵薄膜層的磁矩會呈現反平行排列。由於外加磁場可以扭轉鐵薄膜層磁矩的方向。當磁場由零慢慢增加，鐵薄膜層中的磁矩漸漸地轉成與磁場同向。當磁場大於某個臨界值，所有的磁矩將與磁場同方向而呈平行排列（如圖二(b)所示）。



圖一：巨磁阻多層膜結構。藍色為磁性薄膜層，材料為鐵。橘色為非磁性薄膜層，材料為鉻。紅色箭頭代表磁矩方向。結構(a)中磁性薄膜層的磁矩呈現反平行排列。結構(b)磁性薄膜層呈現平行排列。

磁場可以改變磁矩方向，但為什麼磁矩的平行或反平行排列會形成如此大的磁阻變化呢？想了解這個現象，就要把電子的自旋加進來討論了。

電子除了本身帶電特質之外，尚有一個有趣的物理量——自旋。電磁學課本告訴我們，電荷旋轉會產生磁場。如圖二所示，電子的自旋就是電子本身類似地球自轉產生的磁矩。電子的自轉可分為順時針方向和逆時針兩個方向，而形成方向相反的兩個自旋，通常稱為上自旋或是下自旋。然而自旋並不單純與電場交互作用，所以在一般導體中，不論是上自旋電子或是下自旋電子，兩者所呈現的電阻並無差異。



圖二：電子自旋示意圖。左右兩電子的自旋方向相反。圖左為上自旋、圖右為下自旋。

電子通過磁性層時，由於自旋與磁矩的交互作用影響，上自旋和下自旋的電子會感受到不同程度的散射。換句話說，帶著不同自旋方向的電子會感受到不同大小的電阻。如圖三(a)的結構，磁性層中的磁矩呈現平行排列（為簡便說明，我們定義其磁矩為向上）。當一束上自旋電子通過時，因電子自旋與磁性材料的磁矩同向而不易產生散射，電子較容易通過磁性薄膜，而其產生較小電阻。相反地，下自旋電子因其自旋方向與磁性材料的磁矩反向，在通過磁性薄膜時容易產生散射，單位時間內通過薄膜層的電子數減少，從而使得電流減少，呈現較大電阻。

這樣的結果並不會很難理解，人類行為上也有類似的行為。當你所提的建議（電子自旋）與上司的理念（磁矩）相同時，這個建議就很容易被採納，阻力（電阻）也會較小。相反地，若是你與上司的理念相左，計畫實行上就有較大的阻力（電阻）。

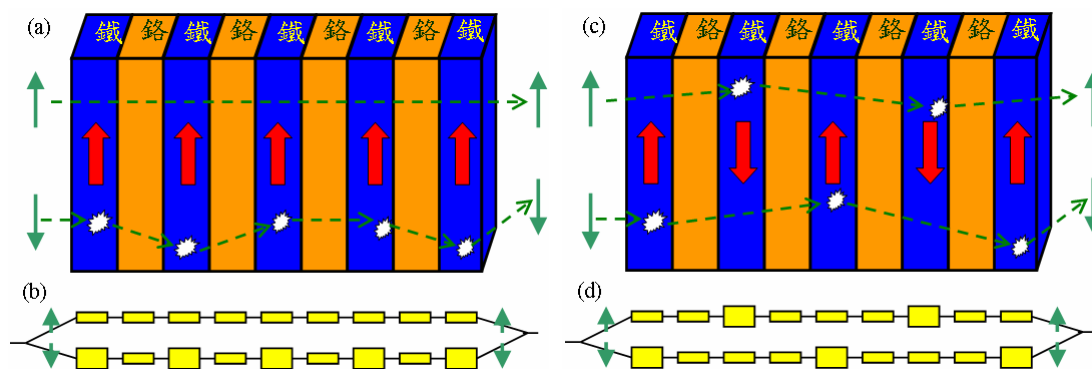
實行計畫的同時，你和你的合作夥伴概念不一定全相同（具有兩個不同方向的自旋）。因此，實際實行所產生的阻力應該是整個合作群（上下自旋）的總合。巨磁阻也是類似的行為。

電子通過磁性材料所呈現的整體電阻等同於**並聯**上下自旋電子個別呈現的電阻[4]。利用這方法，圖三(a)結構所呈現的整體電阻將會等同於圖三(b)中電阻串接後的等效電阻。利用相同的思考模式，我們可以繪出上下自旋電子通過反平行磁矩結構的散射情況（如圖三(c)所示）。而其呈現的電阻值會等同於圖三(d)所繪的等效電阻。

經過簡單的電路運算，可以得到下列的結論：磁矩平行排列結構的電阻是屬於相對低電阻的結構。而磁矩反平行排列結構的電阻將是屬於相對高電阻的結構。隨著磁場增加，磁矩由反平行排列慢慢呈現平行排列，電阻跟隨著下降。當磁場大於某個臨界值（所有的磁矩已呈現同方向），不論磁場如何升高，電阻不會再

改變。這兩樣的推論跟上訴的實驗結果相吻合。

這樣的結果其實也不難體會，計畫實行順利與否主要還是取決於上司們的理念是否相同（不同磁矩的方向）。假若各級上司理念不同（磁矩方向不同），計畫實行自然不容易，整體阻力（電阻）自然大。相反的，若是各級上司理念相同（磁矩方向相同），計畫實行上自然順遂許多（阻力小）。



圖三：巨磁阻效應示意圖。藍色和橘色薄膜分別為鐵和鉻。紅色和綠色箭頭分別代表鐵薄膜層磁矩和電子自旋方向、綠色虛線代表電子行經路徑。白色小點代表電子自旋與磁矩發生散射，電子經散射後，行經方向會改變。黃色方塊代表電子在各薄膜層中產生的電阻值，小方塊代表小電阻，大方塊代表大電阻。

## 應用與結論

巨磁阻的因其系統簡單卻又效應明顯，1994 年，IBM 便成功地將巨磁阻效應運用在硬碟讀寫磁頭，將磁碟容量提高了近 20 倍，也成功地在硬碟市場上奪得領先的地位。巨磁阻效應更開啟了自旋電子學的發展，磁性效應和半導體的結合，使得現今的電子元件既小又快速。現在，我們所使用的電腦不論硬碟或是 RAM 都和巨磁阻有關聯。而你日常使用的數位相機、PDA 也都有巨磁阻的影子。近年，科學家更構想裡用巨磁阻所衍生的自旋閥作為量子電腦中的元件[5]。你或許感覺不到巨磁阻的存在，但你我的日常生活中早已一天不能沒有它！

費爾和葛倫貝爾的成就獲得了國際的肯定，更在 2007 獲頒諾貝爾物理獎以表彰他們在近代科技發展的貢獻，而這更凸顯了巨磁阻在近代科技發展中的地位。

## 延伸閱讀：

經過一長串的介绍，不知你是否對於你身邊的記憶體有初步的了解。科學人雜誌多次介紹了 MRAM 和鑽石電腦等巨磁阻的延伸應用，有興趣的讀者可以參考閱讀[6]。物理雙月刊也曾刊出自旋電子學專輯[7]，內容包含許多國內學者的最新研究成果，對於最新自旋電子學發展有興趣的讀者可參考閱讀。若是對於冗長文字厭煩的讀者，IBM 在它們的網頁用動畫展示了磁碟的運作。有興趣的讀者可以

上網去瀏覽操作[8]。

**附註與參考文獻：**

- [1] 鐵、鈷、鎳三種元素因其 d 層軌道上的某方向自旋電子較多，而使得其淨磁矩不為零。詳情可參考罕德規則 (Hund's rule)。
- [2] G. Binasch *et. al.*, *Phys. Rev. B* **39**, 4828 (1989).
- [3] M. N. Baibich, *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
- [4] A. Fert and I. A. Campbell, *Phys. Rev. Lett.* **21**, 1190 (1968).
- [5] 科學家構想利用巨磁阻效應所衍生的自旋閥來選取量子電腦中的起始狀態。詳情請參考：D. Loss and D. P. DiVincenzo, *Phys. Rev. A* **57**, 120 (1998).
- [6] 科學人 2002 年 9 月號、2004 年 8 月號、2007 年 11 月號、2009 年 5 月號。
- [7] 物理雙月刊第 26 卷第 4 期及第 30 卷第 2 期。
- [8] <http://www.research.ibm.com/research/demos/gmr/index.html>