

第一章 簡介

1.1 前言：

因為現在資訊科技的不斷推陳出新，為了容納更精細的作業處理、更龐大的資料流量，可以想見的，密度更高、體積更小的儲存需求於是日漸殷切。就磁記錄媒體而言，為了追求更高密度的資料儲存方式，最直接的目標就是要開發出更靈敏的磁阻元件，以因應未來之應用發展。

舉例來說，自 90 年代以來，人們廣泛用來儲存數位資料的硬碟機，碟片密度每年皆以高於 60% 的速度成長，這進步速度已超越了半導體產業中著名的摩爾定律。可以想見的，如果人們希望提升硬碟機儲存密度，勢必要從縮小碟片上的位元密度 (bpi=bit per inch) 以及軌跡密度 (tpi=track per inch) 來著手；但這麼一來由於位元以及軌跡寬度減小，磁碟片所能提供給磁讀取頭（由磁阻元件構成）的磁通量也隨之下降。若磁讀取頭的靈敏度不足以辨別碟片的微小磁通量變化，則將會發生輸出訊號電壓不足，無法讀取碟片記錄資料的情形。因此，在人類科技欲邁向更高密度、容量的記錄新世代，具有高靈敏度的磁阻元件，著實扮演著不可或缺的重要角色。

1.2 磁阻元件之演進：

所謂磁阻元件，即是在外加不同方向磁場下，電阻會隨之產生大小變化的元件。磁阻元件目前最常見的應用就是做為硬碟機的磁讀取頭。在 90 年代初期，磁阻元件尚未應用在硬碟機之前，硬碟機磁讀取頭與寫入頭兩者仍是同一個元件，即感應式薄膜磁頭(inductive thin film head)，如圖 1.1 所示。其讀取碟片資料的機制為：當磁頭高速掠過磁片上不同記錄位元上方時，因記錄位元之磁矩散發出來的磁力線，造成磁頭鐵心內部有一磁通量時間變化率，如此感應出一正向或負向的輸出電壓（即法拉第定律： $V = -d\phi_b / dt$ ），從中轉換記錄位元為 1 或 0 的數位訊號。其寫入碟片資料的機制則為寫入的逆向機制，即施加正向或負向的輸入電壓，感應出正向或負向的磁場寫入碟片。一般來說，感應式薄膜磁頭最大可讀取 1 Gbit / in² 記錄密度之硬碟片。但是隨著紀錄密度的提升，硬碟片上的位元與軌跡寬度變小，每個記錄位元所產生的磁通量時間變化率下降，導致無法輸出足夠的工作電壓，致使磁頭辨別訊號的能力無法提升。

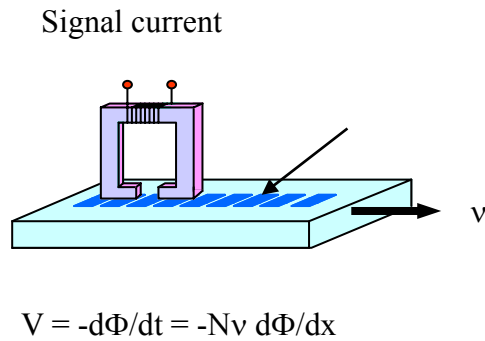


圖1.1 感應式讀寫頭

1971 年，Hunt 提出以異向性磁阻磁頭(anisotropic magneto resistance head，簡稱為 AMR head)為讀頭、以傳統感應式薄膜磁頭為寫入頭的雙磁頭機制，如圖 1.2 所示。IBM 在 1991 年 9 月將之實際應用在硬碟機的讀取頭上。

AMR 是利用在磁性材料中，當其磁化方向與電流方向夾角改變時，此材料之電阻會隨之變化。當一 AMR 讀取頭掠過碟片上方時，因

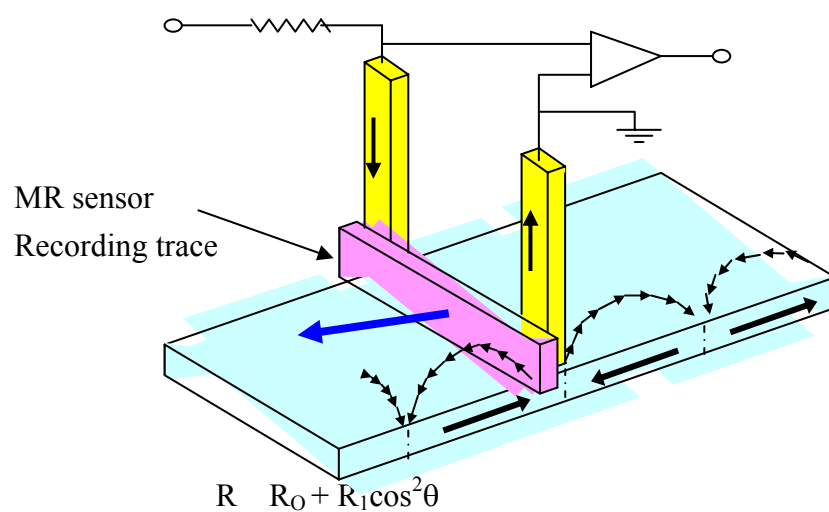


圖1.2 異向性磁阻磁頭

為受碟片中記錄位元所散發出來向上或向下的磁場影響，使得 AMR 讀取頭中原先向下 45° 磁化的薄膜（由圖中公式可知 45° 時 $dR / d\theta$ 最大），磁化方向稍微向上或向下偏轉，造成電阻變化。若如圖中所示施加一定電流於此薄膜，即可讀出一電壓之突升或突降的脈衝，從中轉換記錄位元為 1 或 0 的數位訊號。除了讀取機制與以前的感應式磁頭完全不同之外，另一個不同處在於 AMR 輸出的電壓訊號，與磁片的磁通量變化率有關，而與磁通量的時間變化率無關，因此提升了訊號雜訊比(SNR)。AMR 磁頭的電阻變化率 ($\Delta R / R$ ，即 MR ratio) 約為 2%，在硬碟機的應用最大可讀取 $5 \text{ Gbit} / \text{in}^2$ 記錄密度之硬碟片。

觀察現今的儲存媒體發展，市場上的磁碟機已經進步至單一碟片 40GB 的容量，相當於 $18 \text{ Gbit} / \text{in}^2$ 的記錄密度，AMR 磁讀取頭早已不敷使用。於是利用巨磁阻效應 (Giant Magneto-resistance (GMR) effect) 所設計出之多層膜系統——自旋閥 (spin valve) 磁阻元件便被廣泛地應用在硬碟機讀取頭中；有關自旋閥之相關原理及應用將在下節中有詳細的描述。

另外，1996 年由 MIT 研究團隊開發出的磁阻元件——自旋穿透式磁阻元件 (spin-dependent tunneling magneto-resistance device，簡稱 TMR)，也正吸引著大批研究團隊積極參與開發中。TMR 元件組成結構類似於自旋閥，不同處在於自旋閥中的 Cu 金屬層由其

他的氧化層（如 Al_2O_3 、 Ta_2O_5 等）所取代，電子以穿隧方式傳輸，並且電路的設計由 CIP (current in plane) 改為 CPP (current perpendicular to plane) 模式。TMR 元件不僅僅 MR ratio 可達到 50%，更因為電阻比自旋閥來得大，輸出訊號增強許多。因此 TMR 元件被認為是應用在高密度磁頭的新一代磁阻式元件，更可利用做為新興之磁性隨機存取記憶體 (magnetic random access memory，簡稱 MRAM) 之記憶胞元件。關於 TMR 元件之原理將不在此詳細說明。

1.3 巨磁阻效應

在 1988 年，Baibich 在低溫下首先發現 Fe 和 Cr 交替成長的多層膜系統，MR ratio 隨外加磁場增加可達 50%。由於電阻變化遠大於磁性材料的異向性磁阻，因此稱之為巨磁阻 (giant magneto-resistance，簡稱 GMR) 現象。這種現象普遍存在於 [鐵磁性/非鐵磁性] 的多層膜系統中，每層厚度約 $10 \sim 30\text{\AA}$ ，其中 $[\text{Co} / \text{Cu}]_N$ 系統的電阻變化在室溫下可高達 110%。

我們以下圖（圖 1.3）表示一個 [鐵磁性/非鐵磁性] 多層膜系統中的三層，兩層鐵磁性薄膜 (FM) 隔以一層非鐵磁性薄膜 (NM)，當不施加外加場，中間非鐵磁性薄膜在某些特定厚度時，上下兩層鐵磁性層會因為 RKKY 效應而以相反磁化方向互相耦合。若外加足夠大的磁場，使淨磁能足夠大到破壞此 RKKY 之反鐵磁交互作用力時，所有的鐵磁性層才會沿著磁場方向同向排列。

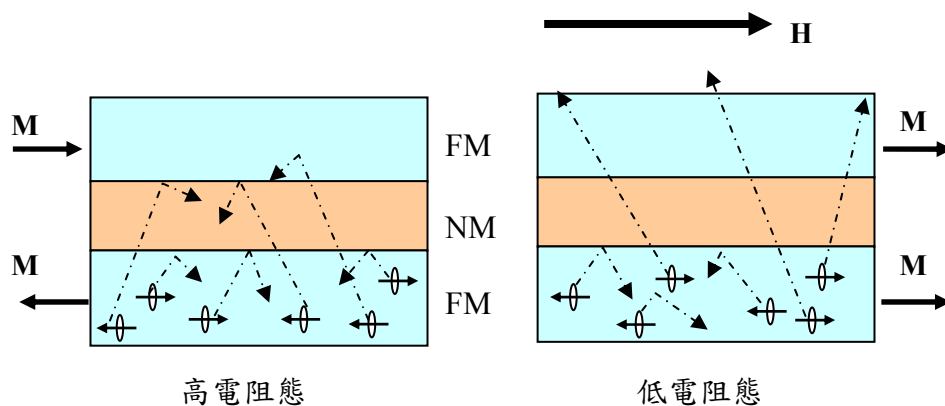


圖1.3 差異性自旋散射效應

當電子進入鐵磁性層時，其散射的機率與磁化方向有關—稱為差異性自旋散射 (differential spin scattering)，因此若膜層磁化方向與電子自旋方向相同則散射機率較小，亦即電阻低；反之若磁化方向與電子自旋方向相反則散射機率較大，亦即電阻高。所以當無外加磁場時，彼此反平行磁化的鐵磁性薄膜使大部分的電子通過多層膜皆受到散射，因此呈現高電阻態；而當外加磁場高於飽和磁場之後，鐵磁性薄膜彼此平行同向磁化，有部份的電子其自旋方向與磁化方向一致，因此可通過多層膜而不被散射，呈現低電阻態。就因如此，藉著控制外加磁場的大小，我們便能夠改變多層膜電阻的高低。此即為 GMR 效應。

雖然[鐵磁性/非鐵磁性]多層膜系統有很好的磁阻變化率，但其動輒數百~數千 Oe 之飽和磁場太大，使其在應用上不具實用性。雖然如此，人們仍在發現 GMR 效應不久的將來，就想到利用 GMR 的概念，設計出自旋閥的結構，使 GMR 效應能廣泛地應用到磁碟讀取上。

1.4 自旋閥簡介及應用

1.4.1 自旋閥之簡介

在 1991 年，Dieny 提出運用 NiFe 薄膜製成自旋閥系統(spin valve)的想法，將巨磁阻現象的高電阻值變化配合 NiFe 合金的低飽和磁場，使其在低磁場下的靈敏度遠比 AMR 磁頭更佳。

自旋閥的基本結構如圖 1.4 所示，由鐵磁性膜(NiFe、CoFe、Co) / 非鐵磁性膜(Cu) / 鐵磁性膜(NiFe、CoFe、Co) / 反鐵磁性膜所組成。其中的一層鐵磁性膜(稱做“被固定層”(pinned layer))與反鐵磁性膜(稱做“偏壓層”(biasing layer))有磁性交換偏壓作用，因此“被固定層”的磁化方向被固定在單一方向上。另外的一層鐵磁性膜(稱做“自由層”(free layer))，由於非鐵磁性間隔層(spacer)的分離而不受到偏壓層的影響，因此可隨著外加磁場自由改變磁化方向。當磁場改變時，兩層鐵磁性膜的磁化方向夾角也跟著改變，此時自旋閥可展現不同的電阻值，其原理同於上述巨磁阻多層膜中所提到的差異性自旋散射。

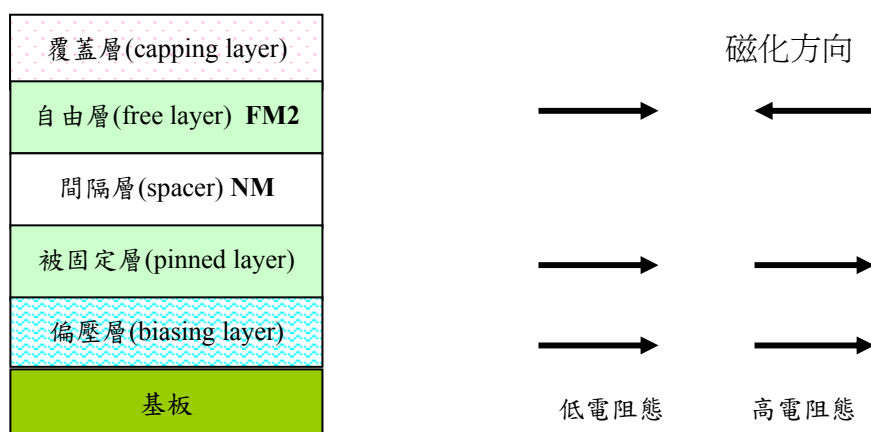


圖 1.4 自旋閥的一般結構

由於自旋閥中間隔層夠大(約 20~30Å)，避免了兩層鐵磁性層之間 RKKY 效應的作用，使其之間只有很小的鐵磁性交互作用力，因此

使被固定層與自由層互相平行或反平行磁化所需要的飽和磁場只需要幾個 Oe，這使得自旋閥得以用來感測高密度硬碟片所外漏出的微弱磁場，藉此讀取碟片資訊。一般而言，自旋閥所達到的 MR ratio 約為 5%~20%。

1.4.2 自旋閥之應用

自旋閥的實際應用，除了現今廣泛被拿來做硬碟機的讀取頭之外，特別值得一提的應用是做為 MRAM 的記憶元件。如圖 1.5 所示，在 word line 與 bit line 之間的即是做為 MRAM 的記憶元件的自旋閥。當 word line、bit line 同時通入一電流，即可在兩條 line 交會處之自旋閥處產生足夠之磁場，使自旋閥中的自由層相對被固定層正向或反向磁化，而定義出 0 或 1 的非揮發性數位資訊。當需要讀取某特定自旋閥所儲存之資訊時，則於該 word line 中通入一電流，使自旋閥中原先平行（反平行）磁化的兩層鐵磁性層稍微反平行（平行）磁化，造成自旋閥的電阻在此瞬間增大（減少），若在此同時於該 bit line 通入一定電流，則 bit line 會因此自旋閥電阻變化而讀出一電壓突升（突降）之脈衝訊號，藉此判讀 0 或 1 的數位資訊。

除此之外，自旋閥仍有其他許多應用之處，諸如轉速感應器（感應鐵磁性的齒輪與永久磁鐵之間相對運動造成之磁力線密度變化次數，推算齒輪轉速），以及機械定位感應器（在定位處放置微小之永久磁鐵，當自旋閥移至該處時即可感應磁場而輸出電流訊號）。．．等

等。自旋閥應用之處將隨著人們的想像力不斷增加，並隨著跨領域科技推廣至各處。

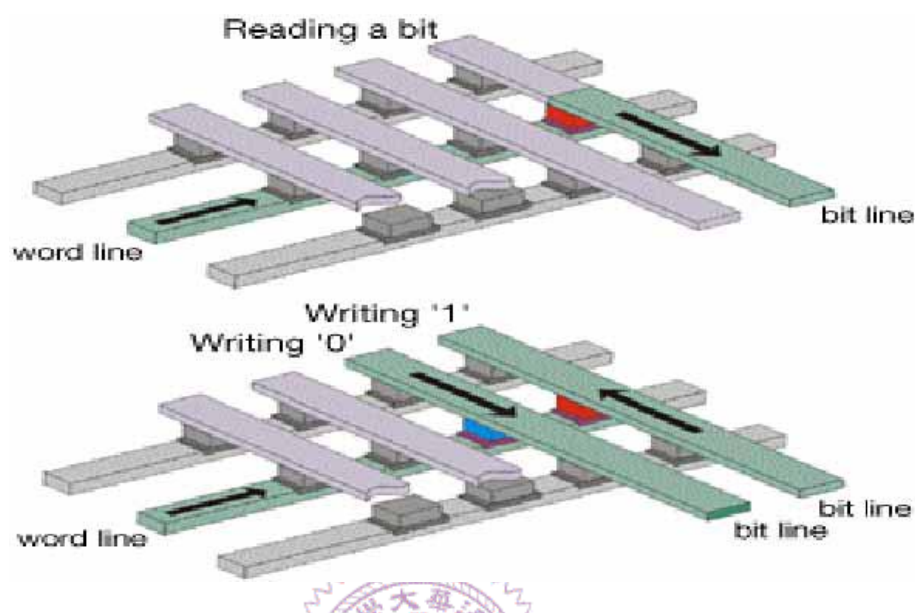


圖 1.5 MRAM 中自旋閥元件配置圖

1.5 奈米氧化層在自旋閥中的表現

所謂的奈米氧化層(nano-oxide layer, NOL)指的是添加在自旋閥結構中鐵磁性膜/非鐵磁性膜介面附近的金屬氧化層，如圖 1.6 所示。NOL 厚度約為 2nm 左右，我們在自旋閥製作過程中，鍍製非鐵磁性膜/ 鐵磁性膜附近時通入氧氣或是氧電漿，將薄膜表面氧化成奈米氧化層，再繼續鍍其他膜於其上。奈米氧化層的用處在於造成電子的鏡面反射效應，使電子在自旋閥多層膜結構中增加穿越鐵磁/非鐵磁薄膜介面的次數，使得自旋閥的磁阻效應大幅增加。

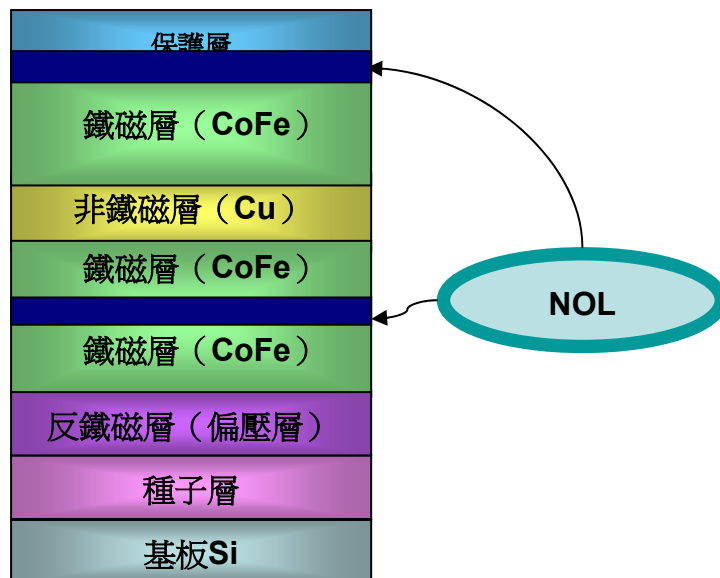


圖 1.6 自旋閥元件中 NOL 所在位置

鏡面反射是指電子在薄膜表面受到反射後仍然保持入射前的自旋方向，使電子的平均自由路徑(mean free path，MFP)不會受到薄膜厚度的影響，如圖 1.7。當自旋閥藉由奈米氧化層的插入而使得入射電子產生鏡面反射現象，可增加電子經過鐵磁/非鐵磁界面的機率，也就說可以增加電子在界面的差異性自旋散射，將可提升 MR 值。

一般未添加奈米氧化層，以使用 Mn 合金做為反鐵磁層的自旋閥為例，其磁阻值大多無法超越 10%。但是添加奈米氧化層之後可以使磁阻值增加至 15%^{1.8} 左右。因為奈米氧化層成長方式簡單而且效果顯著，因此在 2002 年正式被引入商業化磁碟讀取頭的製程中。

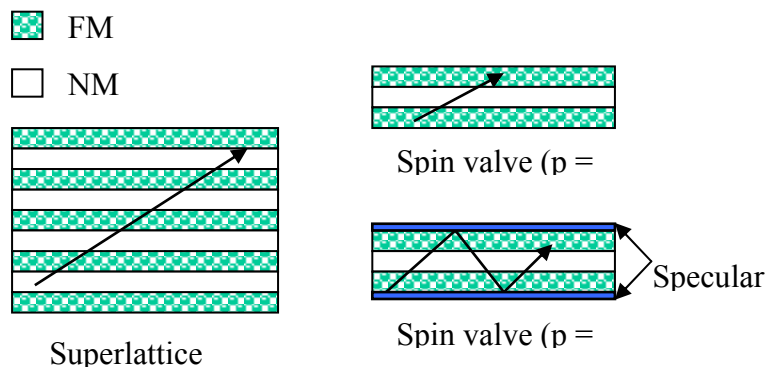


圖 1.8 鏡面反射示意圖