

## 第二章

### 2.1 GMR 以及自旋閥系統之演進

自 1971 年，Hunt<sup>1</sup> 首先提出可將 AMR 原理應用於磁記錄讀取頭的概念之後，1991 年 IBM 工作團隊正式將其用來做為硬碟機的讀頭，當時結構為約 100~200Å 的 NiFe 薄膜，其 MR 值僅約 2%，但靈敏度已經是傳統磁頭的 3~4 倍。IBM 推出此種新概念之磁頭，可以說是高密度儲存媒體發展史上的一大躍進。

爾後，BaiBich<sup>2</sup> 與其研究團隊於 1988 年，發現在低溫下的 [Fe/Cr] 交互多層膜結構，其電阻變化率，即  $\Delta R/R$ ，會隨著外加場的變化而可達到 50% 之多。正由於其磁阻直表現遠大於異向性磁阻，故我們稱之為巨磁阻效應 (Giant-Magnetoresistance Effect, GMR)。

此種巨磁阻現在後來經證實普遍存在於 [鐵磁性/非鐵磁性]<sub>n</sub> 的多層膜結構中，具有極佳的 MR 表現，但因其飽和磁場過大，約在數千 Oe 之等級，致使這種多層膜材料在實際的磁記錄媒體應用上不易。

直到 1991 年，由 Diney<sup>3</sup> 等人提出了利用 NiFe 薄膜鍍製成自旋閥系統的想法，這麼一來可以將巨磁阻現象中的高磁阻變化率以及 NiFe 本身低飽和場的特性，兩相結合各取所長，不但 MR 值仍能保持在恰當的大小，而且由此種自旋閥結構所製成的磁頭，其在較低磁場下讀取記錄位元的靈敏度更勝於 AMR 磁頭。正因著引入 GMR 自旋閥這樣的

傑出的想法，為原本因 AMR 的低磁阻值、高交換場表現而停滯不前的磁記錄時代，開啟了另一個嶄新的局面。

## 2.2 自旋閥理論基礎

### A. 差異性自旋散射

自旋閥在外加磁場變化下產生電阻變化，其原因在於不同自旋方向電子在磁化的鐵磁薄膜中行進時，平均自由路徑長短不同所致。在磁化的鐵磁性金屬中，原本對稱的 3d 電子自旋態密度 (Energy state density) 會因為金屬磁化而分離開來。以圖 2.1 為例，原先

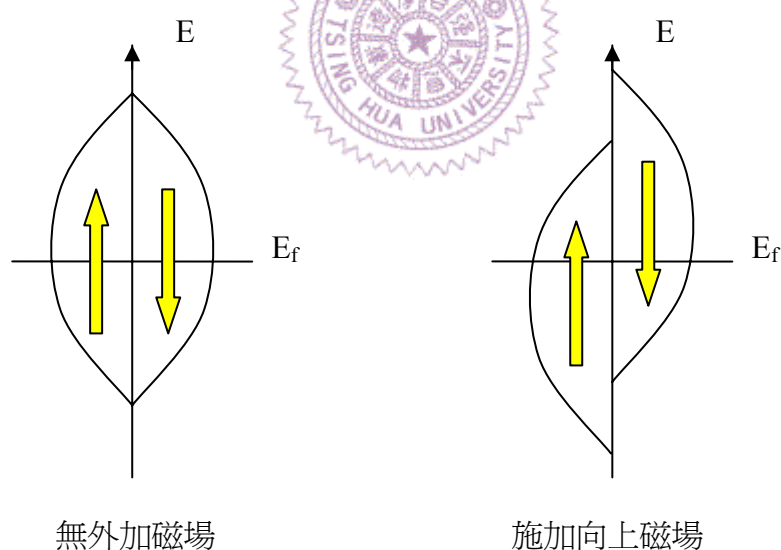


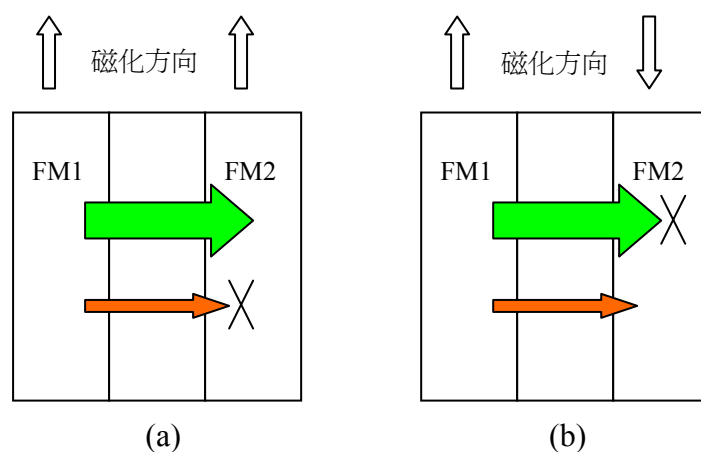
圖 2.1 自旋電子態密度隨外加磁場變化

在費米能量 (Fermi Energy) 以下等量分佈的自旋電子，因為金屬向上磁化造成的自旋電子態密度變化，使上旋電子成為能量較低，數目較多的主要載子 (Majority carrier)，而下旋電子成為能量較高，

數目較少的少數載子 (minority carrier)。這同時也指出，當上旋電子在向上磁化的鐵磁性金屬中傳遞時，較不容易被散射，亦即其行進至下次被散射前的平均自由路徑較長。下旋電子則是較容易被散射，其平均自由路徑較短。這種因為電子自旋能量密度改變，造成自旋電子平均自由路徑長短差異，以及散射容易程度差異的現象，就是差異性自旋散射 (spin-dependent scattering)。

圖 2.2 以差異性自旋散射之原理詳細說明自旋閥運作之機制，當電子由右方入射左方的鐵磁(FM)/非鐵磁(NM)/鐵磁(FM)三層膜時，原先兩種自旋方向並存的電子群，進入第一層向上磁化的鐵磁層後，因為下旋電子在此鐵磁層中的平均自由路徑 ( $\lambda^-$ ) 將相對上旋電子的平均自由路徑 ( $\lambda^+$ ) 來得短。依照 Gurney 的計算<sup>4</sup>，以  $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$  為例， $\lambda^+ \sim 46 \pm 3 \text{ \AA}$ ， $\lambda^- < 6 \text{ \AA}$ 。若此鐵磁層厚度介於  $\lambda^+$  與  $\lambda^-$  之間，則可預期多數下旋電子將遭散射，而多數的上旋電子則通過。

圖 2.2 差異性自旋散射造成電阻變化



當電子穿越非鐵磁層來到第二層磁化的鐵磁層後，若第二層仍為向上磁化（如圖 2.2 (a)），則多數已穿越第一層鐵磁層的上旋電子將因較第二層鐵磁層膜厚長的  $\lambda^+$  再次穿越第二層鐵磁層。但若第二層為向下磁化（如圖 2.2(b)），則因為較第二層鐵磁層膜厚短的  $\lambda^-$  而遭到散射。相較圖(a)與(b)可發現，就整體而言前者所有電子的平均自由路徑較後者長，表現在巨觀的電性量測上就是圖(a)為低電阻，圖(b)為高電阻。

總結而言，自旋閥運作的原理就是固定一層鐵磁層（被固定層，pinned layer）的磁化方向，同時利用外加磁場改變另一層鐵磁層（自由層，free layer）的磁化方向，經由差異性自旋散射的機制而改變自旋閥多層膜的電阻。圖 2.3 顯示了一自旋閥在不同磁場下所呈現出

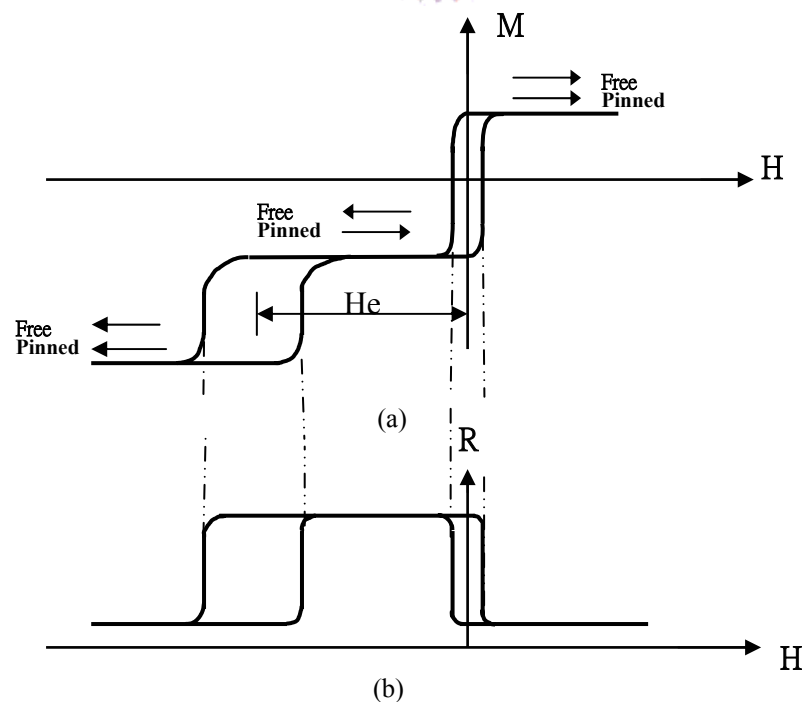


圖 2.3 (a)自旋閥的 M- H loop 與 (b) R- H loop

來的磁化-磁場曲線 (M-H loop) 以及電阻-磁場曲線 (R-H loop)。

## B. 自旋閥之種類

除了最早發展的基本自旋閥結構外，為了提高自旋閥的 MR 值，另外發展了另外發展了幾種不同的自旋閥結構，以下將一一介紹。

(1) 基本自旋閥結構( simple spin valve )：此結構為最早研究之結構，多層膜若由自由層開始成長，則稱為上自旋閥結構( top spin-valve )，如圖 2.4(a)所示。一般用於 Mn 系列為偏壓層的自旋閥。若由偏壓層開始成長，則稱為下自旋閥結構( bottom spin-valve )，如圖 2.4(b)所示。一般用於以氧化物為偏壓層的自旋閥。



(2) 界面夾層自旋閥結構( interface engineered lay-out )：此結構是由 Parkin 首先提出，主要是在上述自旋閥結構之中，於 NiFe / Cu 界面之間，加入一薄層的鈷，厚度約幾個原子層，如圖 2.4(c) 所示。因鈷的差異性自旋散射能力強，可大大的提升磁阻變化率，但由於 Co 與 NiFe 的交互作用，使得自由層的矯頑場(  $H_c$  )增大。

(3) 對稱性自旋閥結構( symmetric spin-valve )：此結構為上自旋閥與下自旋閥結合，如圖 2.4(d)所示。由於上、下被固定層的雙重作用，可使得磁阻變化率大大的被提升，但因自由層會受到上、下的被固定層的影響，使得矯頑場比基本的上、下自旋閥都來的大。使用此對稱性自旋閥結構，MR 值可達 21% 以上。

(4) 合成的自旋閥結構( synthetic spin-valve )：此種自旋閥以鐵磁(CoFe)/非鐵磁(Ru)/鐵磁(CoFe)/反鐵磁(IrMn)結構為偏壓層和被固定層，如圖 2.4(e)所示，利用 RKKY 原理，當 Ru 的厚度約 7Å 時，兩鐵磁層因反鐵磁耦合而呈反平行排列，其優點是有效交換場 ( effective exchange field )高，約為 1 kOe，遠大於一般自旋閥，而且高溫穩定性佳，在磁頭的工作溫度下有效交換場仍然大於 5000e。

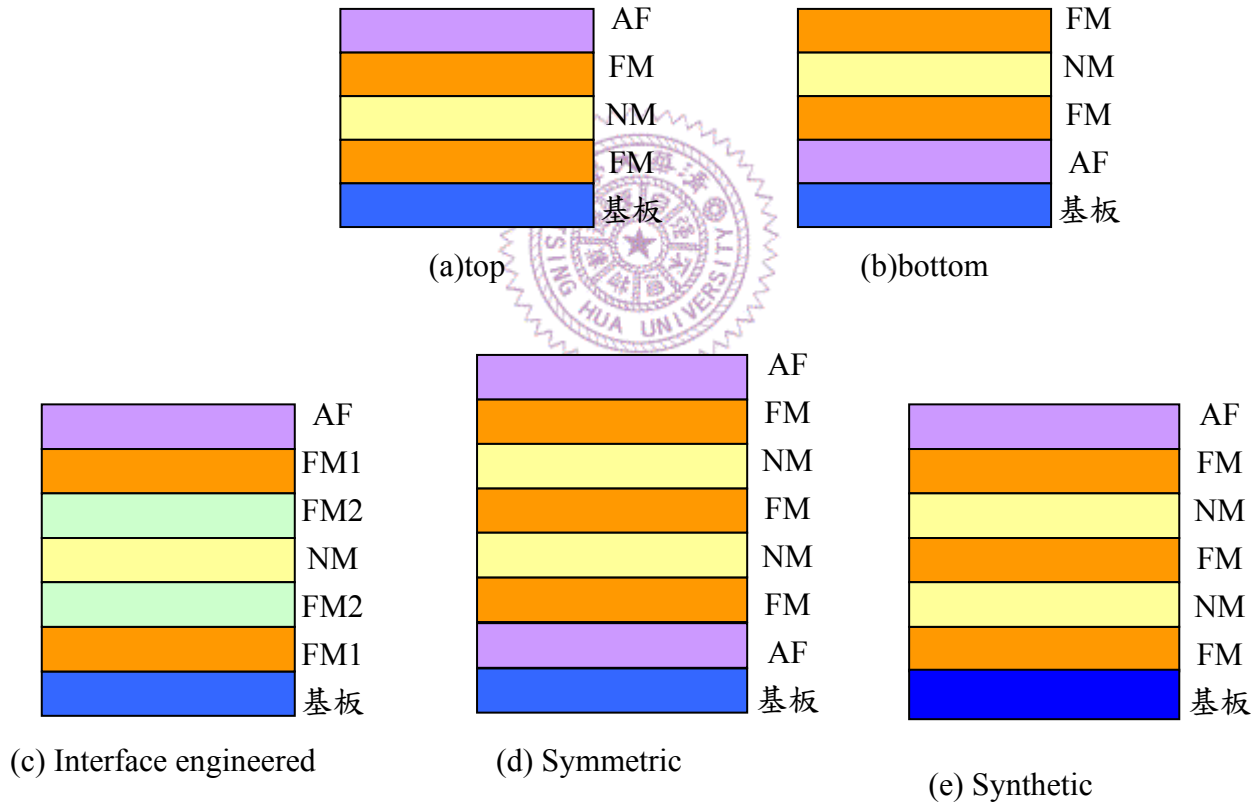


圖 2.4 自旋閥多層膜結構

### C. 自旋閥膜層結構

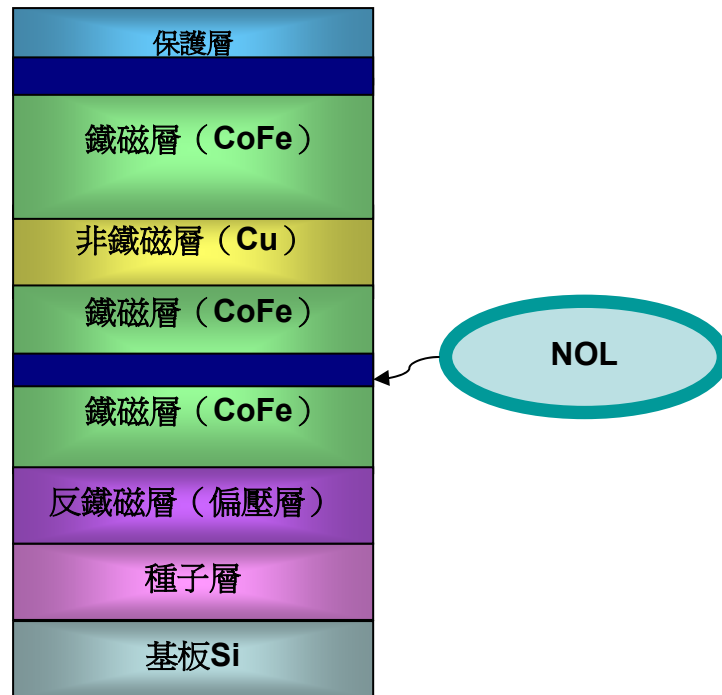


圖.2.5

圖 2.5 顯示了本論文中最常見的下自旋閥 (Bottom spin valve) 結構。由於自旋閥最核心之處即在於鐵磁(FM)/非鐵磁(NM)/鐵磁(FM)三層膜，而為了固定其中一層鐵磁層的磁化方向，使用了如圖中的反鐵磁層 (AF)。一般而言，自旋閥多是由 FM/NM/FM 三層膜與反鐵磁層構成。依照各種目的而將反鐵磁層置於不同位置便衍生了上自旋閥 (top spin valve) 與下自旋閥(Bottom spin valve)，以及雙鐵磁層的對稱性自旋閥結構( symmetric spin-valve )及加強版鐵磁層的合成自旋閥結構( synthetic spin-valve )甚至不用鐵磁層，只靠兩層鐵磁層矯頑磁場大小差別作用的準自旋閥 (Pseudo spin valve)。



以下舉 Bottom spin valve 為例，詳細說明自旋閥中各膜層之作用。

#### a. 種子層 (Seed Layer)

Bottom spin valve 中的種子層一般由兩層金屬構成，一般常為人使用的結構為 Ta/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 雙層膜。濺鍍形成的 Ta 薄膜為非晶態 (amorphous)，形成原子級的平面，使後鍍上的面心立方晶 (f. c. c.) Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 薄膜以最低表面能的最密堆積面 (111) 纖構 (texture) 成長。其中 (111) 纖構程度被視為是反鐵磁層-鐵磁層間交換異向性場大小 \* 與方晶系鐵磁層 (Co, Ni, NiFe, CoFe...) 軟磁特性的指標。

種子層除了人們常用的 Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub> 之外，還有 NiFeCr。另外，Yagami<sup>5</sup> 的研究指出，以 Cu 或 CoFe 作為自旋閥的種子層也可以產生 (111) 纖構，使反鐵磁性層提供足夠工作的交換場。

#### b. 反鐵磁層 (AF)

反鐵磁層的作用，在於與其相鄰的鐵磁性薄膜產生交換異向性，使其 M-H loop 產生單方向性的偏移。這使得鐵磁薄膜在一定範圍大小、方向相反於鐵磁薄膜磁化方向的磁場作用下，仍然能維持其原有的磁化方向與磁化量，如此可以做為自旋閥中的被固定層。

#### c. 鐵磁/非鐵磁/鐵磁 三層膜

自從 GMR 效應被發現之後，各式各樣的 GMR 多層膜 ([鐵磁/非鐵磁]<sub>n</sub>) 系統不斷的被人嘗試著。鐵磁性物種的選擇不外乎 Fe、Co、



Ni 及其合金，非鐵磁的物種則包含 Cr、Cu、Ag、Au 等。類似的物種也延用在自旋閥——鐵磁/非鐵磁/鐵磁三層膜の物種選擇上。

在鐵磁 (Fe、Co、Ni、NiFe、CoFe…) 與非鐵磁 (Cu、Ag、Au…) 的選擇上有兩個基本原則：1. 晶體結構要互相匹配 2. 電子結構要類似<sup>6</sup>。至於其他的考量還有鐵磁層內部差異性自旋散射程度，以及鐵磁/非鐵磁介面特性等等。現今人們最常採用的三層膜結構為  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ ，採用此結構可以獲得最佳的磁阻表現。

### 2.3 奈米氧化層於自旋閥中之發展

1997 年，Egelhoff<sup>7</sup> 與其研究團隊提出，當在鍍製自旋閥結構的過程中通入少量 ( $5 \times 10^{-9}$  Torr.) 的氧氣，居然可以使得原本 [鐵磁/非鐵磁/鐵磁] 如此結構之自旋閥之 MR 表現大幅提昇；在以 Co/Cu/Co

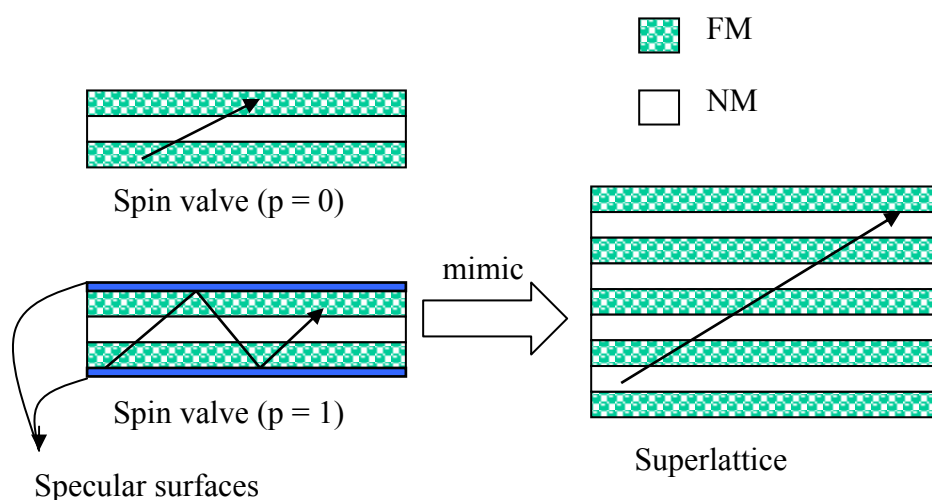


圖 2.6 主要電子在磁化方向平行薄膜中的平均自由路徑示意圖

為三層結構之對稱型自旋閥中，MR 值甚至可以達到 24.8%之多。這種由於通入微量雜質，而使得 GMR 上升的行為表現，可由圖 2.6 來解釋之。

## 2.4 奈米氧化層對自旋閥之性質影響

造成入射自旋閥電子散射、磁阻下降的來源，多半來自於多層膜的外表面，如同晶體內的雜質、缺陷以及介面。但是若能改善外表面的反射係數，使自旋電子在行進至外表面時不被散射而是保留其原先自旋方向反射回來，在最理想的情況下反而能大大提升自旋閥的磁阻至接近 GMR 多層膜的等級。

Egelhoff 認為，雖然一般自旋閥在約  $5 \times 10^{-7}$  Torr. 的背景壓力下成長，這樣方可避免雜質原子影響長成薄膜的性質；但若通入適量的氧氣，在多層膜中扮演表面活化劑(surfactant)這樣的角色，能使得薄膜原子一層層成長，堆疊出所謂原子級的平坦介面；或者是在薄膜成長完畢之後，再通入氧氣將其氧化，取代鍍膜時同時通入氧氣氬壓的較差真空條件。如此一來，氧化由薄膜表面突出處開始，仍能形成原子級平坦表面，如圖 2.7 所示，達到前所述鏡面效應條件，於是乎 MR 值能夠顯著提升。

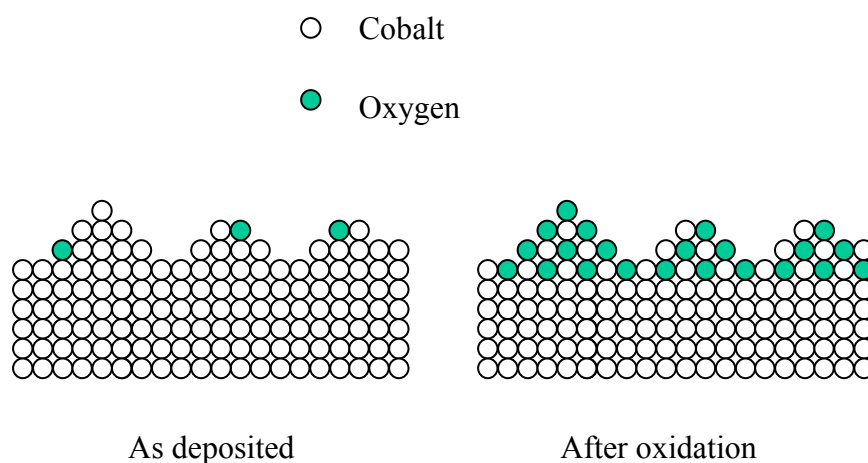


圖 2.7 氧化模型

一般學者普遍相信，當自旋閥結構具有愈佳的鏡面表面，便有更多的機會能使 MR 值大幅提昇。針對此點，有學者依理論進行推算，Swagten 藉由修改 Diney 的半古典理論模型<sup>8</sup>，所得出的最大 MR 值約為 70%，如圖 2.8 所示。

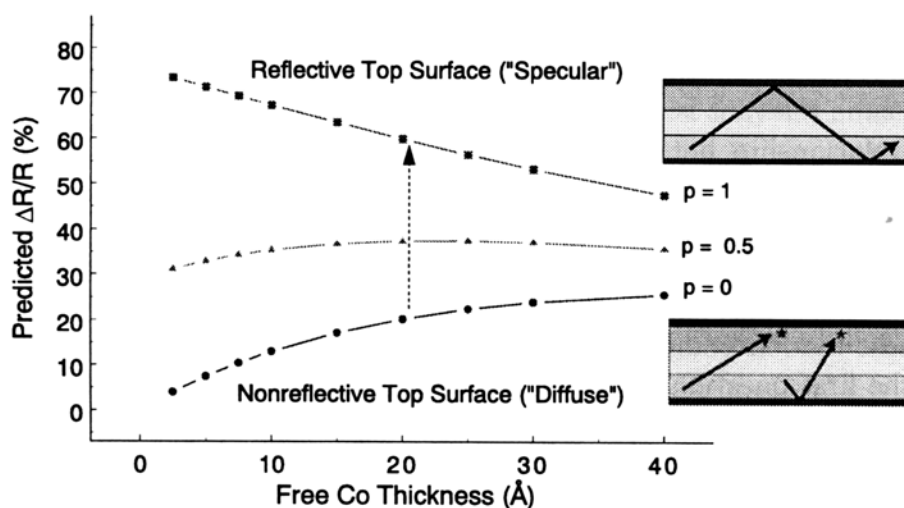


圖 2.8 由半古典理論計算 Co(20) / Cu(20) / Co(20Å) 的鏡面效應，下表面

沿襲了 Egelhoff 的想法，由 Toshiba<sup>9</sup> 集團開始了在自旋閥結構中插入所謂 NOL (Nano-Oxide Layer) 的概念，藉著在自旋閥結構中形成自然氧化層，不僅僅可以提升 MR 值，也因為被固定層被分為上下兩部分，各自的厚度比以往單層被固定層來的薄，被固定層的交換場也於是增加。Sakakima<sup>10</sup> 更進一步地在被固定層以及自由層兩層中均加入了奈米氧化層，如此一來更大大地提昇了自旋閥結構的 MR 表現，由原來基本自旋閥結構的 8.1% 成長到 13.9% 之多。

## 2.5 奈米氧化層於自旋閥中之特性

### a. 不同材料之氧化層對自旋閥之影響

在後來的許多研究中，藉由在自旋閥結構中的自由層或是被固定層中插入奈米氧化層，均能夠使得磁阻值有效地提升。為了觀察不同物種之材料對磁阻值的影響，各式各樣的金屬被應用在作為奈米氧化膜層上。

2002 年，Ming Mao<sup>11</sup> 所發表的研究中，各式各樣的金屬氧化物 (AlOx, TaOx, NbOx, CuOx, CrOx, NiFeCrOx, NiFeOx, CoFeOx, FeOx) 被覆蓋在自由層的外表層或被固定層中，發現對於磁阻值或多或少都有增進的效果。

另外亦有人並非將氧化層鍍製於被固定層或是自由層之中；在

Mizuguch<sup>12</sup>的研究中，就是將 synthetic 自旋閥中的 Ru 氧化成 RuOx，發現同樣也能使磁阻值增加。

#### b. 奈米氧化層於自旋閥不同位置之性質

我們知道藉由在自旋閥結構中的自由層內插入奈米氧化層，使得磁阻值由於鏡面效應的影響而提升。然而，在自旋閥自由層的外緣加入奈米氧化層，其增加了磁阻值以及自由層的矯頑磁場值，其狀況比在自旋閥被固定層內部中加入氧化層來得單純。在被固定層加入氧化層，由於我們需要形成良好的交換場，所以不能直接加在被固定層與反鐵磁性層的介面上，所以必須加在被固定層中。2001年，在Gillies<sup>13</sup>的研究中，其探討了被固定層中氧化層在不同氧化程度下對於磁阻率的影響；其實驗結果顯示被固定層CoFe在純氧氧化之下，約於 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$  Torr 氧分壓下氧化約一分鐘會有最佳的磁阻增加，太少不足，而太多卻又會造成自旋閥中交換場下降而使磁阻率降低。另外，Kools<sup>14</sup>提出了理論模型模擬被固定層中的氧化層在不同氧化程度下，上下被氧化層隔開的被固定層之間透過氧化層所傳遞的交換場強度不同，因而有不同的磁阻行為。

另一方面，在被定層中加入奈米氧化層的許多研究裡，透過氧化層而相互耦合之上、下被故定層均能保持有很高的交換場以及磁阻表現。既然上、下被故定層需藉著透過夾在兩者之間的氧化層來達成相

互耦合的現象，於是氧化層之厚度儼然已成為一個需要精密考量的參數。若是鍍製的氧化層過厚，寬度遠大於上下鐵磁層能傳遞交換耦合力量之距離，則兩層耦合力量減弱，上部被固定層交換場也會因而大幅降低。

另外。由在自由層中插入氧化層的實驗中同時也發現，插入氧化層之自由層本身的矯頑場會比傳統自旋閥的自由層來得大得多，這是來自於自由層與夾在自由層中之奈米氧化層會產生交互作用之緣故。為了能使自旋閥在磁記錄媒體上能夠有良好的應用價值，不希望自由層之矯頑場過高。為了改善這樣的一個現象，2001年，Fukuzawa<sup>15</sup>提出了一個方法，在自旋閥中加入了一層稱之為spin filter的非磁性薄膜，藉以隔開自由層與自由層中之氧化層，如此果然可以使自由層仍然保有很低的矯頑場。並且同樣具備因鏡面反射而磁阻值提升之優勢。

### c. 具奈米氧化層自旋閥之熱穩定表現

除了以上所列出奈米氧化層在自旋閥中所具有的特性之外，各研究團隊最終的目的，便是藉由增加自旋閥讀頭之磁阻率，間接使得磁記錄之記錄密度能夠提升，並且由於磁記錄媒體對於工作環境之要求，自旋閥本身亦必須具有相當之熱穩定性，才能夠在磁碟讀取的過程中，不因為工作溫度的升高而致使讀頭度取資料發生錯誤。



一般而言，目前在商業上應用作為讀取頭之自旋閥結構多以錳系列合金當作反鐵磁層，尤以非序化之 FeMn、IrMn 最為常見。此類非序化之反鐵磁層必須經過高於其序化溫度之退火程序，方能達到反鐵磁相，但熱退火的製程容易導致多層膜之間的擴散、降低磁阻值。Masafumi Takiguchi<sup>16</sup> 等人在 2000 年對此研究提出解釋，他們認為是因為反鐵磁層裡的錳元素非常容易擴散，進而破壞了自旋閥中被固定層、非磁性層以及自由層之間的介面，使得電子折射效果降低，MR 自然無法有效地提升。

而在往後的加入奈米氧化層之自旋閥結構中，研究者發現除了因為氧化層與相鄰膜層形成幾近鏡面之介面之外，其熱穩定性質相較於基本的自旋閥結構來說，亦有顯著之改善。韓國 H. J. Kim<sup>17</sup> 研究團隊在 2002 發表了一份研究報告，他們指出，在以 FeMn 作為反鐵磁層之 bottom 自旋閥結構中，通常必須再經過 250~300°C 的退火程序幫助其序化；但在具有奈米氧化層之自旋閥結構中，其對於熱穩定性之表現相對於基本自旋閥結構更要來得優異（見下圖）。他們認為這是因為此時的氧化層並不僅僅只是扮演著鏡面反射的牆壁角色，還能夠在反鐵磁層中的錳元素受熱而亟欲擴散之時充當一緩衝牆，由於錳元素極易與氧結合成 MnO，因此在經過氧化層時，大多數的錳會以 MnO 之型態停留在氧化層中，於是便阻擋了錳元素繼續往上被固定層以及



自由層等膜層擴散，保護多層膜介面不因擴散而失卻折射電子效果，如此便使得自旋閥之整體熱穩定性大幅提昇。

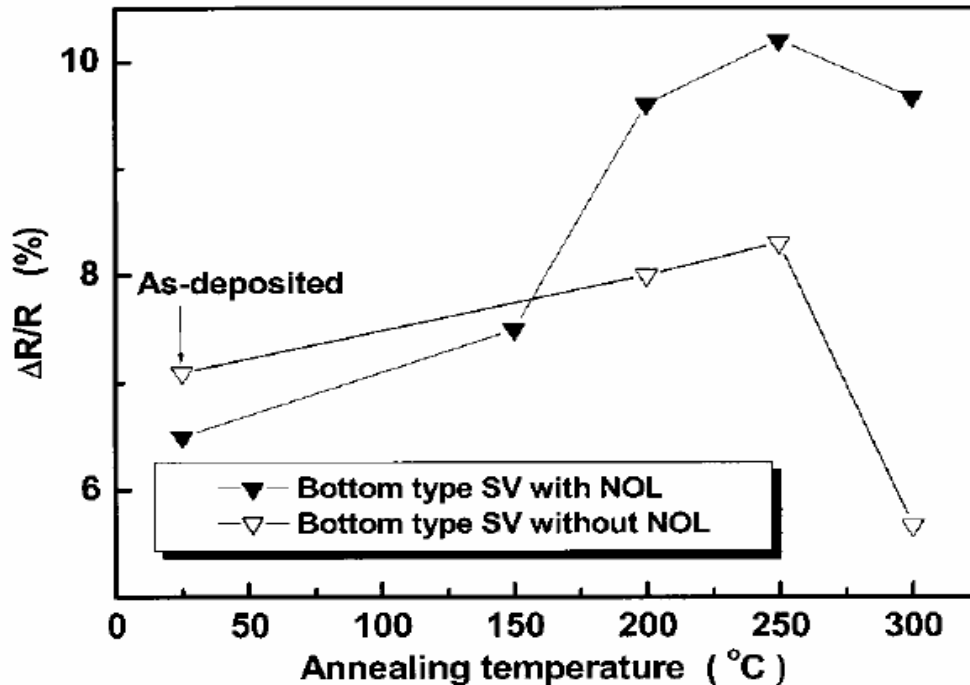


圖2.9 退火溫度對NOL、non-NOL自旋閥磁阻表現之影響

一般而言，需要形成緻密的氧化膜層，方能使得電子反射行為更佳，達到延長平均自由路徑、提升磁阻之目的；在爾後的研究中，多以電漿轟擊出氧離子，使其帶著更大的能量附著於試片上，形成綿密的氧化層，達成欲使奈米氧化層與相鄰膜層介面平整之要求。

## 2.6 奈米氧化層之材料鑑定

一般而言，自旋閥結構中奈米氧化層之厚度只有1~2nm左右。而要鑑定如此薄之膜層其氧化狀態以及厚度是相當不容易的。在厚度鑑定上，Huai<sup>18</sup>使用高解析度穿透式電子顯微鏡(HRTEM)拍攝自旋閥

的橫截面，認為 CoFe 自然氧化的氧化層比較鬆散，厚度約為 1.5nm，而電漿氧化形成之氧化層較緻密，厚度約為 1nm。Gillies<sup>19</sup> 以及 Veloso<sup>20</sup> 使用拉賽福回向散射分析儀 (RBS) 量測，也模擬出類似的氧化層厚度。另外 Gillies<sup>19</sup> 也使用了超導量子干涉儀 (SQUID) 量測因奈米氧化層生成而減少的飽和磁化量，間接去推算出氧化層的厚度應為 0.5nm。

另外在奈米氧化層的氧化狀態判定上，Gillies<sup>19</sup> 使用 X 光電子能譜儀 (XPS) 量測奈米氧化層的鍵結狀況，發現在  $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$  的氧化層中，多數都是 Fe 的氧化物，Co 的氧化比例相對地小很多。Fukuzawa<sup>21</sup> 進一步在其 XPS 鑑定中指出，CoFe 中的 Fe 多是以二價以及三價的氧化方式並存，並且在不同氧化方式下有著不同的二價、三價鐵離子比例。

奈米氧化層對於自旋閥薄膜也有降低介面粗糙度的作用。一般人們經由原子力顯微鏡 (AFM) 以及 X 光反射鑑定 (X-ray Reflectivity) 都可以發現，經由奈米氧化層的加入，薄膜平整度有增加的現象<sup>20</sup>。

## 2.7 NOL 自旋閥結構中之九十度耦合

自旋閥在作為磁阻元件的應用中，目前多用為硬碟機的讀取頭上，後繼的許多研究團對各自在不同的製程方法上下功夫，或改變氧化層的成分，抑或是調變 NOL 在自旋閥中的位置，藉由這些不同的條

件來研究論證所謂的奈米氧化層是如何能提升自旋閥元件於磁記錄媒體中的紀錄密度。

一般來說，在自旋閥結構中，反鐵磁層的磁矩排列方向決定了被固定層的磁矩排列，而這些在我們的實驗中是可以由退火場的方向來控制的；反鐵磁層提供足夠的交換異向性能使得被固定層的磁矩不會輕易地隨著外加場的改變而翻動，於是在反鐵磁(AFM)/被固定層(P1)/奈米氧化層(NOL)/被固定層(P2)/非磁性層(NM)/自由層(F)這樣的結構中，自由層以及上被固定層(P2)之磁矩隨著外加磁場的改變而彼此形成平行或者反平行之現象，使得入射自旋閥之電子亦遭遇到高低之不同電組態。

然而，在 2002 年，Fukuzawa<sup>22</sup> 提出一個有趣的現象，他比較數種不同的 NOL，分別為 CoFe10 以及 FeCo，不同於以往的，在以 FeCo 作為 NOL 材料時，磁阻變化率(MR ratio)最大值發生在外加磁場垂直於反鐵磁層磁矩排列方向，也就是垂直於退火場方向之時（如圖 2.9）；

這結果與以往所熟知的 NOL 自旋閥性質恰恰相反。

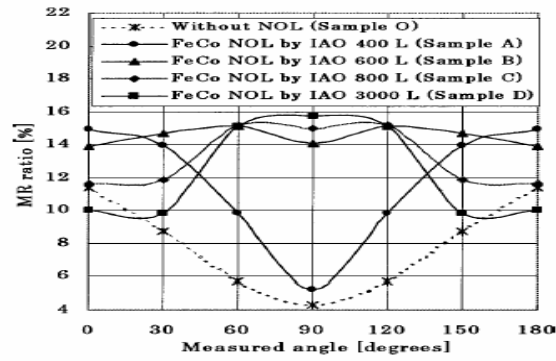


FIG. 8. Dependence of the MR ratio of a spin-valve film with the FeCo NOL by IAO measured at different angles.  $0^\circ$  means the same angle as the annealed direction of PtMn.

圖 2.10 CoFeOx 自旋閥之變角度量測磁阻值

Fukuzawa 等人認為，這是因為改變成分的材料經過氧化步驟之後所形成的氧化層，並非原本所認定的非磁性薄膜，而是具有磁性之膜層，這樣具有磁性的奈米氧化層進而影響了上、下被固定層在變化外加場下的翻轉行為；Fukuzawa 稱其為 Twist Coupling。

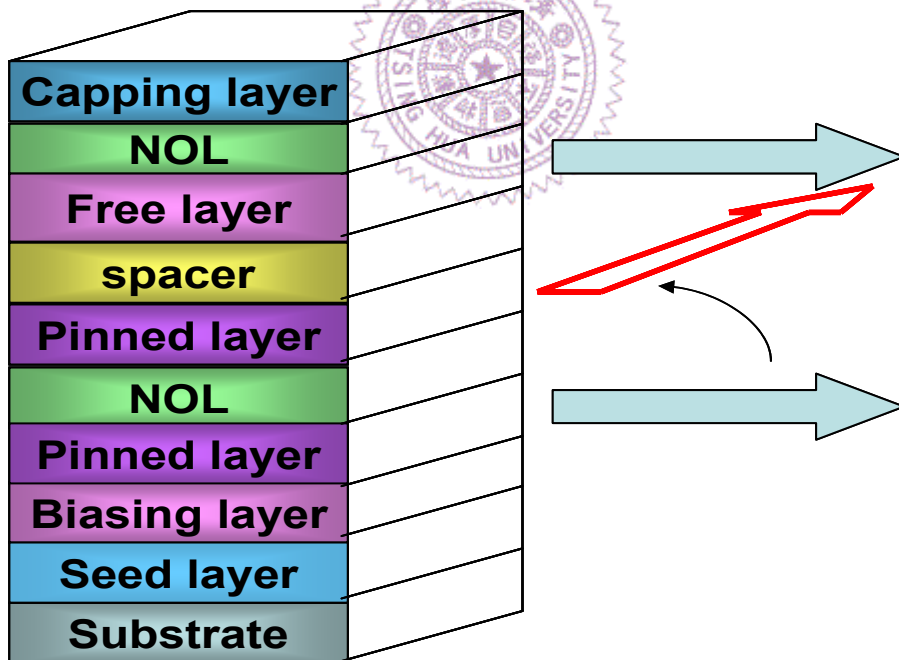


圖 2.10 正交耦合磁矩翻轉示意圖

這奇特的現象，很快地也有其他研究團對陸續發現，且對其投以高度興趣。2003 年，IBM 研究團隊中的 Maat 以及 Gurney 等人，以  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  作為奈米氧化層之材料<sup>23</sup>，藉由觀察 NOL 自旋閥在平行及垂直

退火場的磁滯曲線，認為由於構成奈米氧化層之  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  為 highly-frustrated 的一層薄膜，造成介面上磁矩排列不平整，這樣一來可視為磁性上的介面平整度不佳；這種特性使得奈米氧化層上層之被固定層(P2)透過非磁性層(NM)與自由層達成 90 度的耦合，於是乎當上、下兩層被固定層之磁矩與退火場同方向時，最自由層之磁矩則會停滯在與退火場呈垂直的方向。

更進一步地，本實驗室於據奈米氧化層之自旋閥的不斷研究中，亦觀察到了經由氧化層的介入，使得自旋閥之磁性質表現特出於以往。在改變外加磁場的情形之下，其 MR 以及磁滯行為在在都顯示出這樣的多層膜結構中，有某些特別的因素使得各磁性層中的磁矩不單單只有平行或使反平行排列的關係，在某些特定的條件之下，垂直耦合的現象亦能有再現性地發生，稱之為 biquadratic coupling。經重重實驗與理論驗證，我們將更深一層地剖析其中奧秘。實驗過程與結果將於本論文第四章中有詳盡的說明。

GMR 的磁阻表現並未能如理論計算般地持續大幅成長，1996 年，發展出的穿隧式磁阻效應 (Tunneling-Magnetoresistance Effect, TMR) 因其高阻值的表現而愈有取 GMR 磁頭而代之成為磁記錄媒體寵兒的架勢。但這一兩年來，NOL 自旋閥中 biquadratic coupling 的被發現，不啻為 GMR 的歷史開啟了一個新局面。