

第二章 實驗原理與文獻回顧

2-1 磁記錄原理^[2,3]

2-1.1 寫入機制^[2]

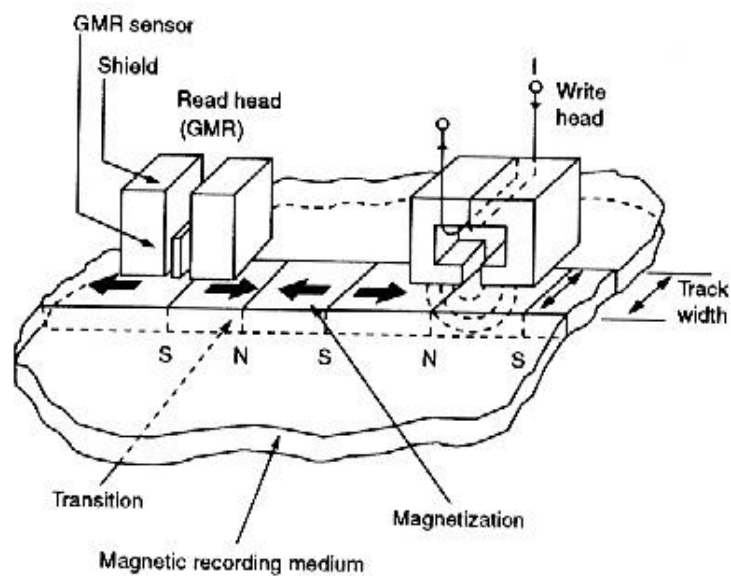


圖 2-1 硬碟構造示意圖

圖 2-1 為硬碟構造之簡圖，磁頭以非常低的高度貼近碟片表面飛行；磁頭為一纏繞感應線圈的軟磁鐵心，當通入電流時，會產生感應磁場，並在鐵心的間隙部分形成外漏磁場(fringe field)。根據 Karlqvist 方程式，外漏之磁場強度與位置的關係為

$$H_x(x, y) = \frac{H_g}{\mathbf{p}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{x + g/2}{y} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x - g/2}{y} \right) \right]$$

$$H_y(x, y) = \frac{H_g}{2\mathbf{p}} \ln \left[\frac{(x + g/2)^2 + y^2}{(x - g/2)^2 + y^2} \right]$$

其中， H_g 為間隙之磁場強度， (x, y) 為以感應磁頭間隙之中心為原點的直角座標，如圖 2-2 所示，其中的圓形曲線代表的是外漏磁場水平分量的等位線。

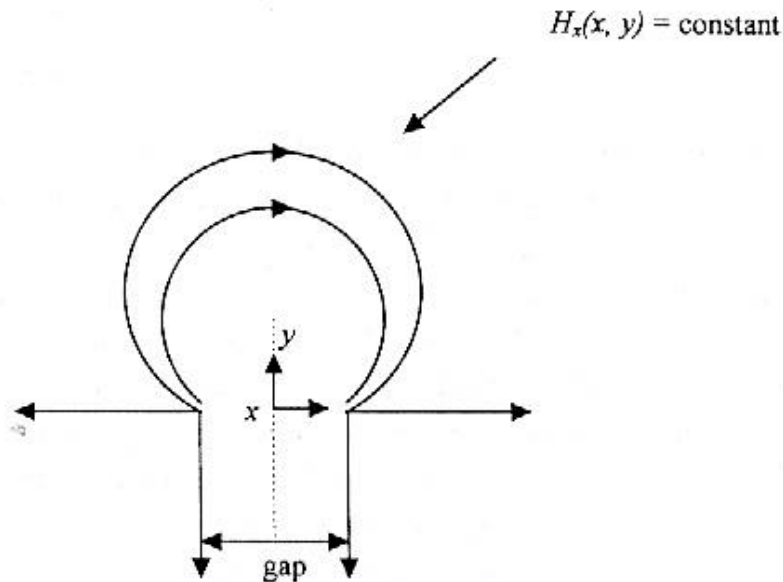


圖 2-2 感應式磁頭外漏磁場水平分量之等位線

Karlgqvist 方程式表示磁場強度在二度間中之分布，在 H_x 超過碟片矯頑場的等位線內的區域稱為寫入泡泡(write bubble)。在此區域內碟片的磁矩方向將由磁場的方向所決定，因此我們可以藉由改變通入電流的方向，控制碟片上的磁矩方向，從而達到記錄的目的。

2-1.2 讀取機制^[1]

碟片上的各個記錄位元會在彼此交接處堆積磁矩，形成一磁矩方向轉換區，其磁矩分布如圖 2-3 所示。當磁頭在碟片表面飛行時，在磁矩轉換區會感測到最大的垂直磁場變化量，因而輸出電壓脈衝，還原出原來的記錄訊號。

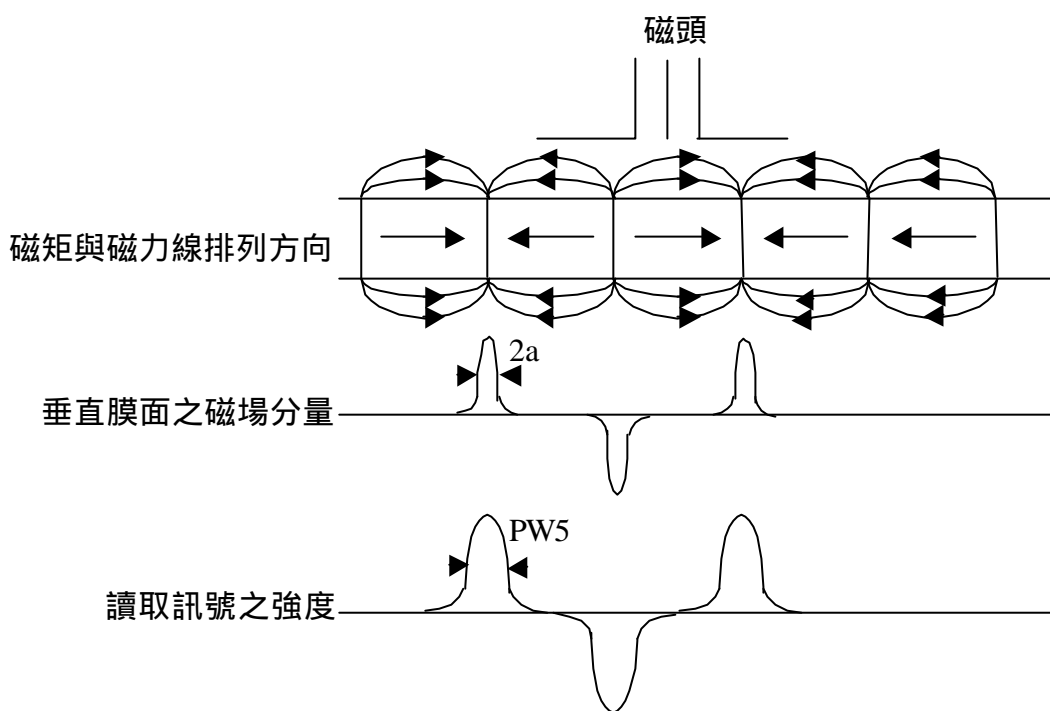


圖 2-3 訊號讀取原理

讀取訊號脈衝的半高寬稱為 $PW50$ ，是決定磁碟片是否能達到高密度的主因之一。轉換區寬度可藉由實驗量測 $PW50$ 求得，以感應式磁頭為例，

$$PW50 = [g^2 + 4(d + a)(d + a + \delta)]^{1/2}$$

其中 g 為磁頭間隙， d 為磁頭與碟片間距， a 為轉換區寬度參數， δ 為磁性膜厚度^[3]。由於讀取的訊號是正負相鄰，由圖 2-4 可見，當 $PW50$ 越窄，其正負相減後的訊號越強，因此欲提昇記錄密度，就要設法窄化磁矩轉換區之寬度。

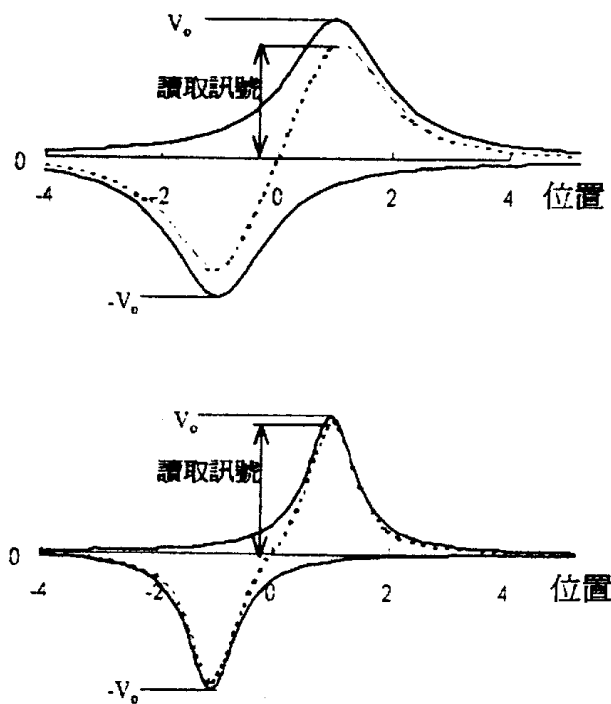


圖 2-4 讀取訊號與轉換區寬度的關係

2-1.3 磁矩轉換區(magnetization transition area)^[5]

磁矩轉換區的形狀可由 Williams-Comstock 模型來表示：

$$\left. \frac{dM}{dx} \right|_{x=x} = \frac{dM}{dH} \left(\frac{dH_{\text{head}}}{dx} + \frac{dH_d}{dx} \right)$$

其中 $\frac{dM}{dx}$ 為磁化量 $M(x)$ 對距離磁矩轉換區中心點 x 處之微分，其值越

高，表示磁矩轉換區越窄。 $\frac{dM}{dH}$ 則代表磁滯曲線之方形比(squareness)，

方形比越高，表示磁矩翻轉越一致，轉換區因而越窄。 $\frac{dH_{\text{head}}}{dx}$ 為磁頭磁

場強度之變化梯度，變化梯度大時，代表磁力線較集中，因此可產生較

窄的磁矩轉換區。 $\frac{dH_d}{dx}$ 代表碟片之去磁場，去磁場越小，磁矩轉換區越

窄。磁矩轉換區的磁化量可以表示如下：

$$M(x) = (2/p)M_r \tan^{-1}(x/a)$$

其中 M_r 為殘留磁矩， a 為轉換區域寬度之參數，如圖 2-5 所示。

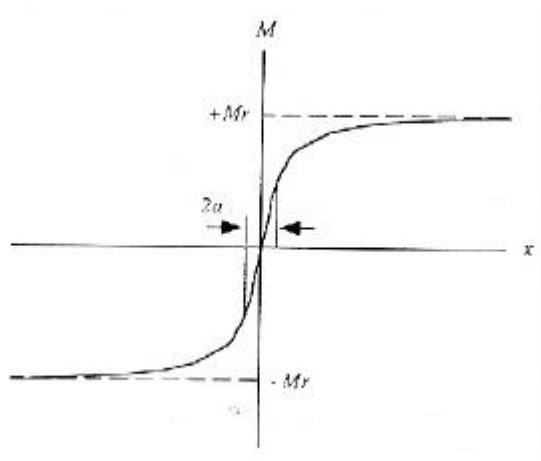


圖 2-5 磁矩轉換區的磁化量對位置作圖

根據 Williams-Comstock 模型，轉換區寬度可表示為

$$a = [M_r \mathbf{d} (d + \mathbf{d}/2) / pQH_c]^{1/2}$$

其中 \mathbf{d} 為磁性層厚度， d 為磁頭與碟片距離， H_c 矯頑場， Q 為磁頭的磁場常數，一般約為 0.76^[3]。

根據上式，提昇矯頑場，或者降低殘磁積 $M_r \mathbf{d}$ ，都可使磁矩轉換區窄化。然而矯頑場過高會造成磁頭無法寫入，而 $M_r \mathbf{d}$ 過低則輸出訊號太弱，因此碟片的設計必須在磁頭可以寫入的範圍內盡力提高矯頑場，並且在訊號不致衰減太多的情形下盡量降低殘磁積。

2-1.4 雜訊的成因^[1]

理想的碟片在磁矩變換區域處的界線為一直線，其線記錄密度只受限於過度區域長度參數 a 。但實際的碟片中，磁矩變換區域不可能為一直線，而是會受限於晶粒或磁團(magnetic cluster)的大小^[6]，形成一鋸齒狀的轉換區(Zig-zag Transition)如圖 2-6。當讀取磁頭遇到大振幅的不規則磁矩轉換處時，所讀取訊號的位置會左右偏離原來記錄的位置，這就是造成雜訊的來源^[1]。

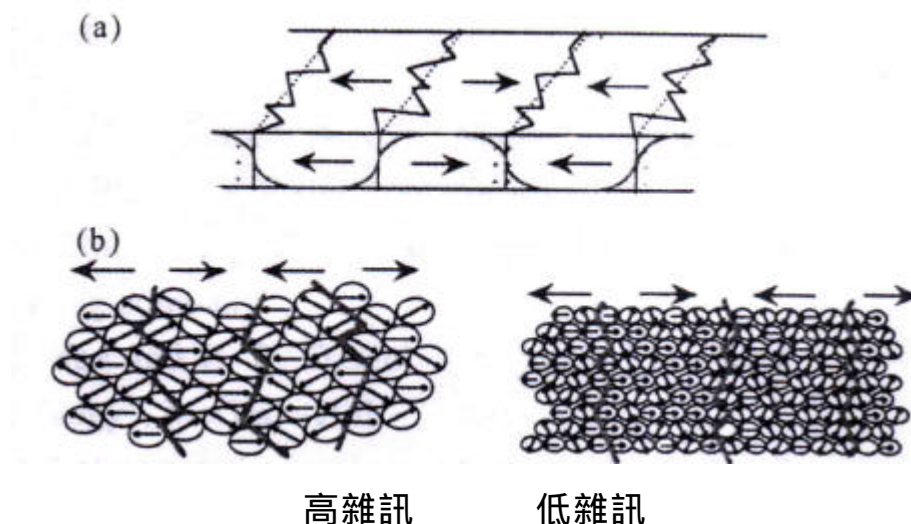


圖 2-6 (a) 磁矩轉換區的鉅齒狀邊緣
(b) 磁團體積與鉅齒狀轉換區的關係

所謂磁團是指數個晶粒之間有交互耦合(exchange coupling)的作用，而形成磁化反轉時的最小單位(switching volume)。越大的晶粒或是越大的磁團，就會造成越不規則的鋸齒狀轉換區，從而增加了碟片讀取時的雜訊。然而，磁團的大小部分取決於晶粒的大小，因此為使雜訊降低，就須盡可能縮小晶粒，並且降低晶粒間交互耦合的現象。

2-1.5 晶粒間的交互耦合作用^[1]

晶粒間的交互作用有兩種，一種是靜磁能交互作用(magnetostatic exchange coupling)，飽和磁化量越高時，晶粒間交互作用力越強，磁矩越傾向同向排列，這是屬於長距離有序的作用力。另一種則是晶粒間的交互耦合作用(intergranular exchange coupling)。這是一種量子力學現象，在鐵、鈷、鎳等磁性材料中，相鄰的電子自旋向量同向排列時，會得到最低的交換能，也就是最穩定的能量態。如圖 2-7 所示，當兩個晶粒相距甚遠時晶粒內的交換能無法傳遞至另一晶粒，所以晶粒內的磁矩維持在各自的 c 軸方向；當晶粒間距小於 10\AA 時，兩晶粒內的電子可藉由隧道效應(tunneling effect)而互相傳遞晶粒內的交換能。此時若兩晶粒的磁矩因同向排列而降低的交換能足以克服磁矩偏離 c 軸所增加的磁晶異向性能量，則這兩個晶粒就會耦合在同一方向。

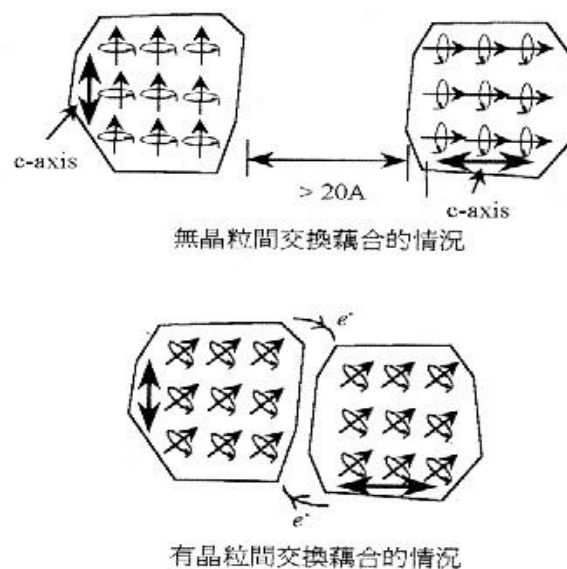
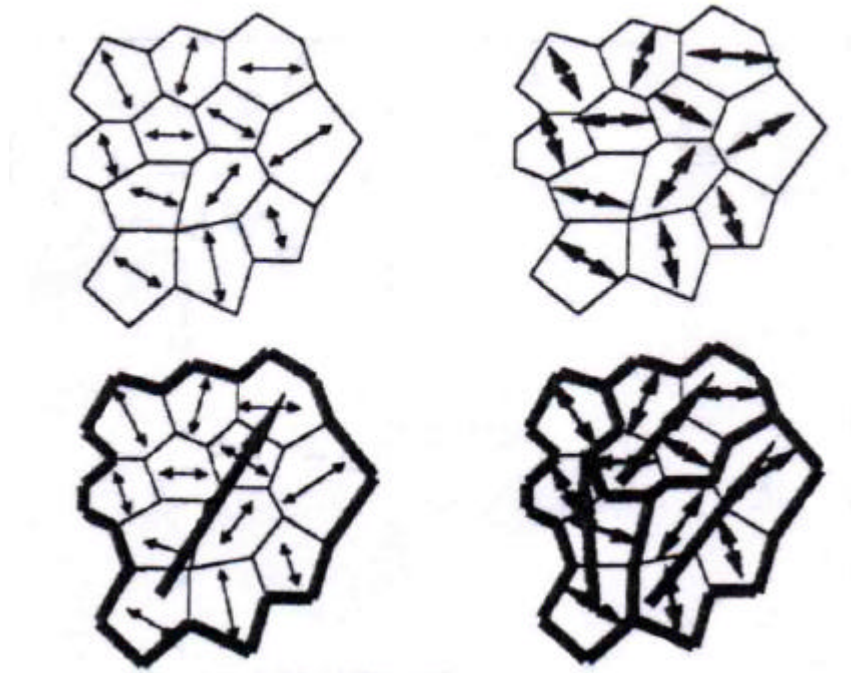


圖 2-7 晶粒間磁矩交互耦合作用示意圖

如圖 2-8，若晶粒間的交換耦合作用較強，磁晶異向性較弱，則晶

粒間容易交互耦合形成大磁團；而若晶粒間的磁晶異向性較強，而交換耦合作用較弱，則晶粒傾向維持在各自的 c 軸，將擁有較小的反轉體積。



(a) 強交互耦合，弱磁晶異向性 (b) 弱交互耦合，強磁晶異向性

圖 2-8 磁晶異向性與交換能競爭示意圖

晶粒間的交互作用強時，代表磁矩轉換的動作越一致，磁矩轉換區會較窄，然而交互耦合形成的大磁團又會造成雜訊的來源。在實驗上，晶粒間交互作用的強度，可透過矯頑方形比 S^* 來表示，

$$S^* = 1 - \frac{M_r}{\left. \frac{dH}{dM} \right|_{H=H_c} \cdot H_c}$$

S^* 越接近 1，代表晶粒間的交互耦合作用越強，晶粒間的動作越一致，因此轉換區寬度參數越小，換言之紀錄密度可以更高；然而由於交互耦合造成大磁團，形成嚴重的鋸齒狀轉換介面，雜訊也會升高。因此硬碟

片的矯頑方形比太大會造成雜訊，太小則會使紀錄密度降低。一般商業化的硬碟片， S^* 大約維持在 0.7~0.9 之間。

2-2 水平式硬碟片的物理極限^[7-9]

將磁團縮小，可達到降低雜訊的目的。然而當磁團小到某一程度時，將會發生所謂的超順磁現象 (super-paramagnetism)，此時晶粒本身的晶體異向性能已不足以克服溫度所造成磁矩的熱擾動，因而發生不穩定的現象，此一現象限制了磁團繼續縮小的可能性，也成為繼續提昇記錄密度的障礙。因此在不斷縮小晶粒與磁團體積的同時，如何提昇磁矩的穩定度也是一重要課題。

考慮無溫度效應作用下，單一磁團的磁能僅包含磁晶異向性能及環境去磁場 H_d (包含其他晶粒提供的磁場以及磁團本身的去磁場之總和) 造成的靜磁能：

$$E(\mathbf{q}) = Ku \cdot V \cdot \sin^2 \mathbf{q} + MVH_d \cos \mathbf{q} \dots (1)$$

其中 K_u 為晶體異向性常數， M 為磁團之飽和磁化量， V 為磁團體積， \mathbf{q} 為磁矩與晶軸之夾角，並假設去磁場與晶軸平行。

將(1)式經過整理，可得

$$\Delta E(H) = KuV \left(1 - \frac{H}{H_K}\right)^2 \dots (2)$$

其中 $H_K = 2K_u/M$

可見當 K_uV 越大時，有越高的能障，磁矩的穩定性越高。

根據 Néel 與 Brown 的理論，在一有限溫度之下，由於溫度效應所提供的熱能造成聲子與磁子的震動，可能克服部分磁矩翻轉所需跨越的能障，使得磁矩僅受一小場的作用便即翻轉，而此翻轉所需的磁場與溫度及溫度作用的時間有關：

$$\tau = f_0^{-1} \exp(E_B / KT)$$

因為能障會隨磁團體積 V 的縮小而降低，當能障降低到靠室溫所產生的熱能 KT 就能翻轉時，磁碟就無法保存資料，這就是所謂超順磁現象。因此必須提高磁性層的磁晶異向性，才能使硬碟在密度提高的情況下，仍能保存資料的穩定性。

2-3 材料與製程

近年來在水平式硬碟片上的研究主要集中在磁性層晶粒細化及矯頑場之提升兩方面，晶粒細化可緩和鋸齒狀轉換區的情形，提升訊噪比 (signal to noise ratio, SNR)；而提升矯頑場則可以縮小轉換區寬度，提升記錄密度。本節將分別針對這兩個主題，就前人的研究結果作簡單介紹。

2-3.1 提升矯頑場

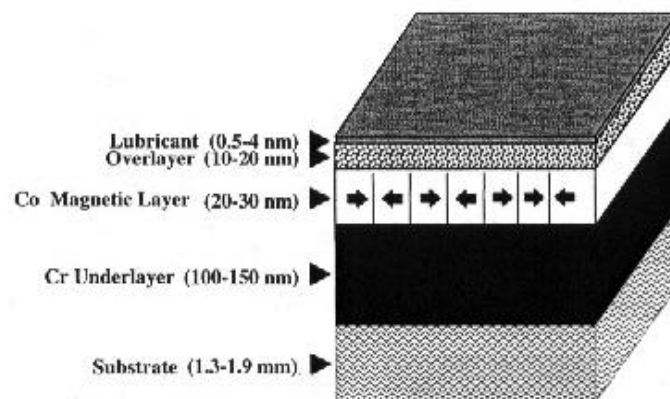


圖 2-9 硬碟片的膜層結構

圖 2-9 為標準的硬碟片膜層結構，其中覆蓋層(overlayer)的作用在於保護磁性紀錄層不被氧化，並且避免碟片因為磁頭撞擊損傷而造成壞軌；而潤滑層(lubricant)則是用以保持碟片與磁頭間的潤滑，避免摩擦造成的耗損^[3]。

(1) 磁性層的內秉 (intrinsic) 特性

由於鈷是鐵鈷鎳三種磁性元素中，唯一具有單軸異向性 (uniaxial anisotropy) 的元素，因此最適合用作數位記錄的材料。目前市面上的硬碟多採用以鈷為主的三元(甚至以上) 合金材料，最常見的有 CoCrPt、CoCrTa 及 CoCrPtTa 系列，表 2-1^[3] 為常見的各元素添加比例及功用。

元素名稱	添加比例	用途
Co	70-85	高晶體異向性
Cr	12-20	抗氧化、降低留磁積、提升矯頑場、降低訊噪比
Pt	12-24	提升磁晶異向性、矯頑場
Ta	2-4	提升矯頑場、降低訊噪比

表 2-1 磁性層添加元素之特性

其中 Cr 因為與 Co 的互溶度並不好，因此會產生在晶界偏析的現象，使得晶粒之間彼此獨立，減弱晶粒交互耦合的現象^[10,11]，此舉不但能使磁團縮小，減輕鋸齒狀轉換區的問題，同時矯頑場也會上升。研究顯示添加 Pt 可以提升磁性層的晶體異向性，使磁性層的矯頑場大幅增加^[16,17]，至於其原因則尚待研究證實。而 Ta 的作用則在促進 Cr 偏析至晶界，進一步將晶粒交互耦合作用降至最低，然而其本身則沒有明顯的偏析現象^[16,18-19]。其他的添加物還有 Nb、B^[10,12]、Mn^[28-31] 等等，根據 TEM 研究顯示均有使促進 Cr 在晶界析出，使晶粒獨立 (grain isolation) 的作用。

(2) 磁性層的組織

鈷元素的磁矩易軸平行於晶格的 c 軸方向。在水平記錄中，磁矩的方向平行於膜面方向，因此鍍膜時應使 c 軸儘可能平行於膜面。然而對 hcp 結構的鈷合金而言，為降低成膜時的表面能，晶體往往成長成 c 軸垂直膜面的組織，因此必須利用底層 (under layer) 來控制其上的磁性層之晶體微結構，因此底層之特性選擇非常重要。

早在 1967 年 Lazzari 就提出以 Cr 為底層的想法^[19]。根據研究顯示，在常溫鍍 Cr 時，容易形成 Cr(110) 的組織，然而在 250°C 高溫下鍍膜，則容易長成 Cr(200) 的組織。如圖 2-10，由於 Cr(200) 面與 Co(11 $\bar{2}$ 0) 面的晶格匹配度良好，因此我們在高溫製程下鍍出 Cr(200) 的組織後，便可以利用晶格匹配的原理，使得 Co 合金薄膜產生 (11 $\bar{2}$ 0) 的組織。

當底層與記錄層的晶格越匹配，Co(11 $\bar{2}$ 0) 組織越強，磁矩就越容易平躺於膜面，矯頑場也越大，因此利用元素摻雜調整底層的晶格常數不失為一個好方法。常見的添加元素有 V^[21,22]、Ti^[23-26]、Mo^[26] 等，利用調變摻雜的比例，可以改變晶格常數，達到晶格匹配的目的。

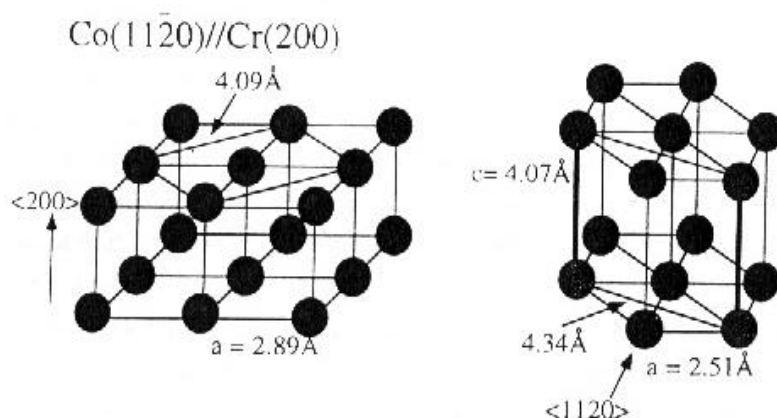


圖 2-10 Co、Cr 的晶格常數比較及磊晶關係示意圖

2-3.2 晶粒細化

在傳統的 Cr 合金底層之研究中，利用元素添加，如 CrTi^[23]、CrV^[27]等，也能達到晶粒細化的目的。

適當的底層選擇也能使晶粒細化。Nakamura 等人^[32,33]的研究顯示，B1 結構的 MgO 在室溫成長時會產生(200)的纖構，晶格常數為 4.21 Å，與鈷的 c 軸長度相近，能夠引發 Co(11 $\bar{2}$ 0)的纖構。

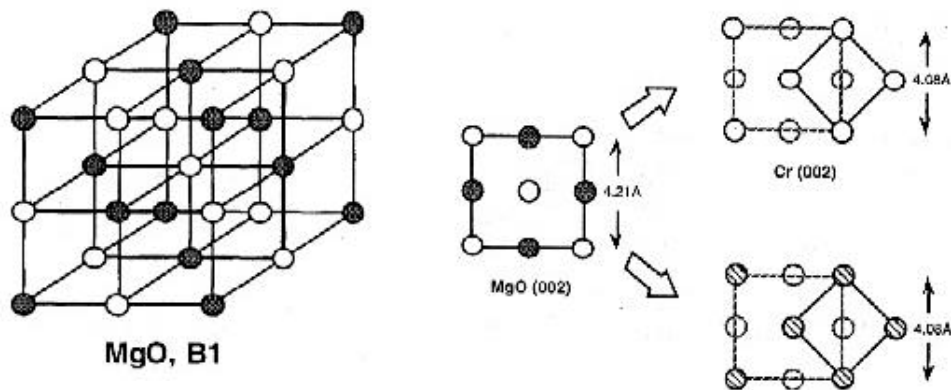


圖 2-11 MgO 晶格與 Cr 及 NiAl 的比較

90 年代 Li-Lien Lee^[34-36]提出以 B2 結構的 NiAl 或 FeAl 作為底層，在不升溫的環境下可自然形成(112)面的纖構，引發磁性層 Co(10 $\bar{1}$ 0)的纖構，如圖 2-12。其晶粒大小僅約 15nm，且大小分布更為集中，可以有效使磁性層的晶粒細化且更均勻，是良好的底層材料。

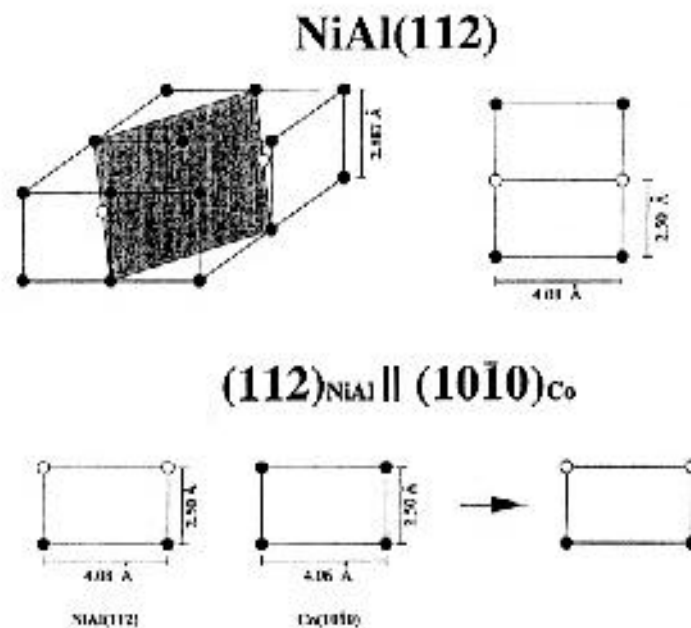


圖 2-12 NiAl 的晶體結構及與 Co 的磊晶成長關係

2-3.3 中間層的添加

為了使晶格匹配度更佳，可在已選定的底層及磁性層中間，再添加一層以鈷鉻合金為主的六方最密(h.c.p.)結構之中間層，如 CoCr、CoCrTa、CoCrMn 等，其一是利用調變成份比及厚度，使上下膜層間磊晶成長的關係增強，從而得到最佳的 Co(11 $\bar{2}$ 0)纖構；其二是利用中間層的 Ta 或 Mn 擴散到磁性層，促進 Cr 發生偏析，藉以提升矯頑場^[31,37-39]。值得特別一提的是，在 H. Song 等人的研究^[31]中觀察到，選用 Co₆₅Cr₃₁Mn₄ 作為中間層，不但是 hcp 結構，同時在鍍膜過程中會自發性的形成 Co(10 $\bar{1}$ 0)及 Co(11 $\bar{2}$ 0)的纖構，因此有可能可以捨去傳統的 Cr 合金底層，以 CoCrMn 來取代而仍得到相近甚或更高的磁性質。