

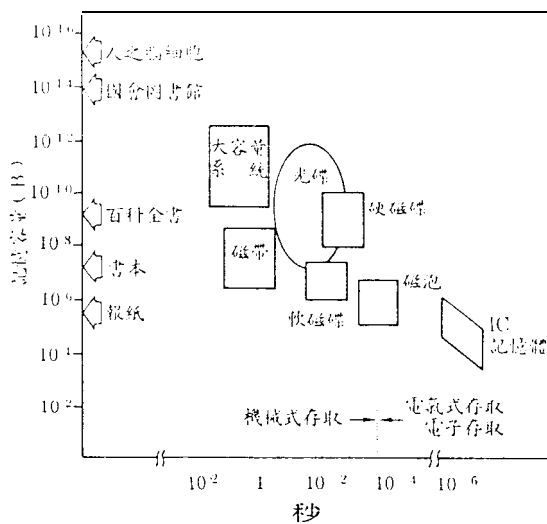
# 磁性物理在 資訊儲存的應用

張慶瑞

## 壹、簡介：

作為資訊儲存的記憶媒體，最基本但複雜而且容量大的當屬人類的腦細胞。其它傳統的如大型圖書館或紙張書本等，在極大體積下雖也可容納大量資訊，但是這些資訊的存取速度却極慢。直到電腦發明以後，記憶的媒體才起了巨大革命。如圖一為記錄容量對存取時間的關係圖。近年來由於通信及資訊工業的急速發展因而導致需要快速處理和高容量儲存的裝置，而大量的資訊更迫切的需要快速而輕便的裝置來儲存及處理資料。利用磁性原理記錄資訊的方法除了能夠提供滿足輕薄短小需求外，尚有高度的穩定性。但是為減小記錄裝置體積，增加儲存資料的密度，必須在磁性現象及空氣動力學上做深入的基礎物理研究。而在磁矩的翻轉機制的物理現象直到今天仍是尚待詳細瞭解的問題。本文目的主要在介紹記錄工業上的磁性物理現象，以引起物理研究者的興趣。

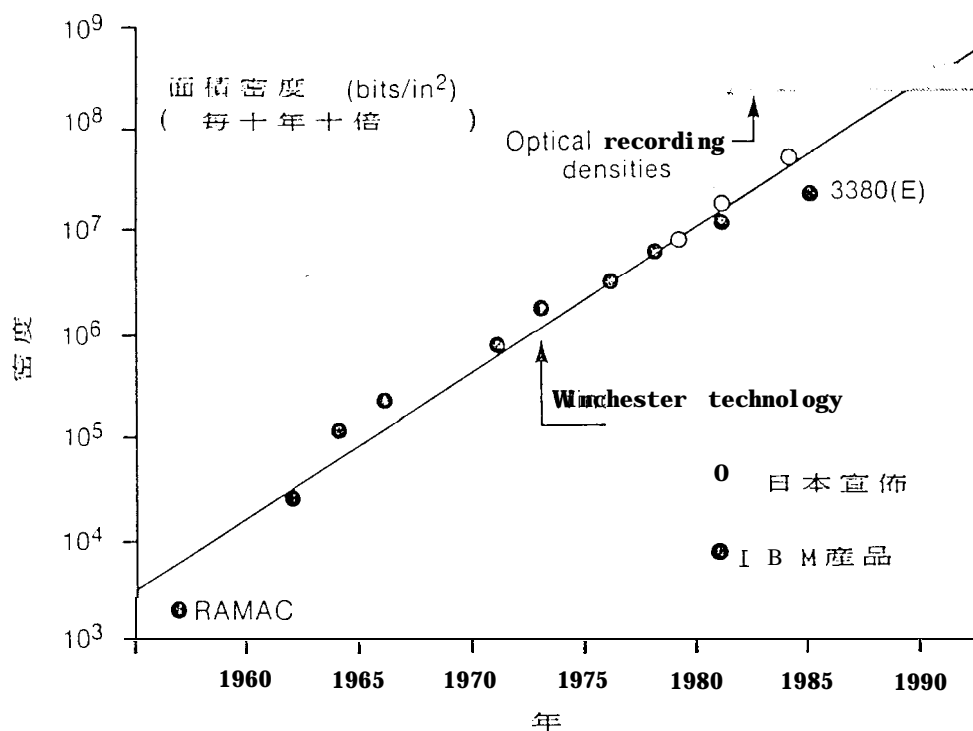
磁性材料利用於記錄資料是在西元 1898 年由 Valemer Poulsen 發現的。從 Poulsen 在西元 1900 年的巴黎博覽會中展示了利用磁線及電磁鐵來記錄及重現聲音的儀器後，磁記錄工業不斷的進展。今天，磁性材料不但被廣泛利用在各種聲音影像的記錄，同時在數位化記錄上也大量使用磁帶與磁碟



圖一

。由於 IBM 在這方面持續的努力研究大幅提昇了記錄密度 [1]，如圖二。現行傳統磁記錄發展的成長速度大約每十年十倍。現在 IBM 3080E 的記錄密度已可達到  $45.7 \text{ MB/in}^2$ ，預計近期內可達到  $300 \text{ MB/in}^2$  [2]。現在磁記錄裝置在美國的市場大約是每年 300 億美元，而且尚以每年 20% 的成長率在成長 [3]。據在美國 Santa Clara Valley 的廠商指出，每年因為磁性記錄材料所獲得到的利潤不但遠超過其他磁性工業的總和（如馬達、發電機等），而且

### Magnetic Disk Storage Density



圖二

比半導體工業從矽 (Silica) 上得到的利潤要大 [4]。這些廠商開玩笑的指出矽谷應正名為三氧化鐵谷。儘管磁記錄工業的利潤如此優厚，在這方面的基礎研究却一直未受到重視。美國國家科學基金會 (National Science Foundation) 懇切的指出這種令人迷惑的問題，並強調再不重視這問題將會引起嚴重的工業問題。美國國家基金會做出下面的結論『磁記錄工業的能力在近期內無法成長，其原因不在工業製造的能力，而是由於在磁記錄方面的基礎及應用研究的不足。甚而言之，我們缺乏良好的科學家、工程師及教師因而導致磁記錄工業的遲滯不前 [5]。』美國國家基金會有鑑於日本在磁記錄發展過程中採取與學校密切配合的方式進行，在各大學成立大型的磁學應用中心，而使得研究人員缺乏的問題能獲得

合理的解決。近年來美國為了解決人力的不足，也仿效日本在各重點學校成立磁學中心以加強這方面的研究 [3]。台灣在磁記錄的技術與研究尚屬開發中階段，因此也就比美國或日本更須要研究人員的投入了。本篇文章的目的乃在介紹磁記錄工業所牽涉到的物理現象與問題，而不企圖解決研究人員缺乏的問題。然而，研究人員缺乏大多也是由於研究人員對磁記錄的不瞭解。所以，本文亦希望能吸引一些研究者及學生在磁記錄上的注意。讓研究者知道磁記錄上的問題不僅是工業的興趣，同時在科學的角度上也是有趣而刺激的。

基本上資訊儲存的目的在利用特殊媒體將資料寫入，而在稍後時間讀取儲存資料。希望讀取的資料與輸入的資料相同，並且在儲存時，可以保存長時間而

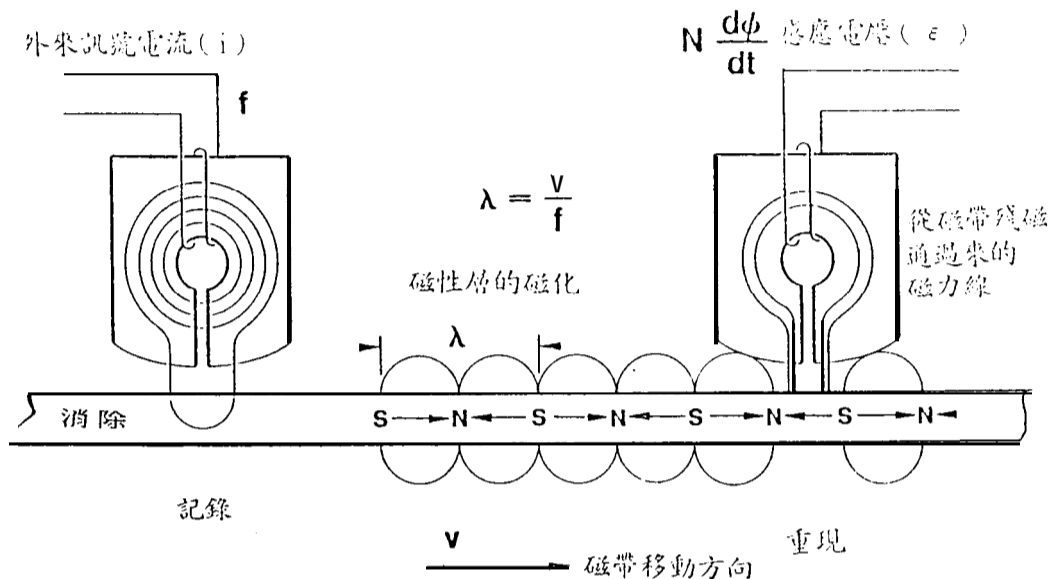
無變化。利用磁性材料的資料儲存方式直到現在還是最穩定而便宜的方法。然而這方面所牽涉到的物理問題却是相當複雜。舉例來說，如何將細小的磁性針狀體在聚合物的流體中均勻分佈的磁流體現象，牽涉到磁性現象及複雜的流動學 (reology)。而磁頭在離記憶媒體表面上只有空氣分子的自由平均路徑飛行時所牽涉到的空氣動力學更是複雜。試想要控制一個巨型客機 (如波音 747) 在離地表面 0.2 公分上穩定的以超過 100 mi/hr 的速度飛行是需要多麼精密的控制，此外，複雜的數學和物理現象使得電腦模擬也格外

吸引。

磁記錄工業基本上分成三個主要的方向：傳統磁記錄 (magnetic recording)，磁光記錄 (magneto-optic recording) 及磁泡記錄 (magnetic bubbles)。本文將從物理學感興趣的研究角度來做概括性的介紹。

### 貳、傳統磁記錄：

磁記錄基本上是將時間上的資訊轉化成空間儲存的資訊。圖三表示讀取資料及將時間的輸入資料轉換



圖三

成磁化樣型 (magnetization patterns) 的基本原理。訊號電流通入繞在磁頭上的線圈而將磁頭磁化。磁頭產生的磁場沿著磁路經由磁頭間隙漏出。由於磁頭間隙非常接近記憶媒體，以致磁漏可將磁記憶媒體磁化。如果輸入訊號的頻率是  $f$  而磁頭與磁記憶媒體的相對運動速度是  $v$ ，則磁化樣型的波長為

$$\lambda = v / f \quad (1)$$

通常，時間資訊轉化成空間資訊如下式

$$x = v t \quad (2)$$

$x$  代表磁化樣型的座標， $t$  是輸入訊號的時間。而空間上的磁化樣型不會準確的與輸入訊號一致。因為磁記錄本身是非線性的現象。

如圖三所示，空間中變化的磁化樣型會產生一磁場 ( $H$ )。當利用磁頭讀取資料時，這些磁場會進入高導磁率的磁頭內。由空間的磁化樣型變化導致進入磁頭內的磁場變化，因而產生一重現的電壓變化  $V$ ，

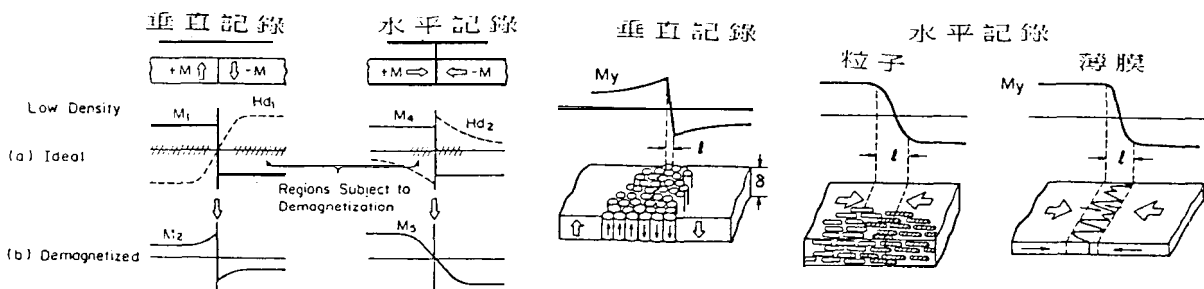
$$V = -d\phi / dt$$

$$= -Nv \quad d\phi / dx \quad (3)$$

N是讀取磁頭上的線圈數目，而輸出電壓與讀取速度成正比。

記錄的方式以磁化狀態的不同可分為水平記錄和垂直記錄。水平記錄的磁化方向平行於磁頭移動方向及記憶媒體平面。在這種方式中磁位元 ( bit ) 與過渡區 ( transition area ) 承受到的去磁場 (

demagnetizing field ) 大，不易達成高的線密度 ( linear density )。垂直記錄因為磁化方向垂直於磁頭移動方向及記憶媒體表面，去磁場小，因而可得到較高的線密度。圖四表水平記錄與垂直記錄的磁化過渡區。假設一理想記錄過程， $M_1$ ， $M_4$  分別會產生去磁場  $H_{d1}$ ， $H_{d2}$ 。對垂直記錄而言，過渡區較不受影響所以仍有狹窄的過渡區。而水平記錄的過渡區受到較強的去磁場因而產生較寬的過渡區。然而在高密度資料儲存時，理論分析的結果顯示，雖然



圖四

在記憶媒體的內部垂直記錄有極小的去磁場。但是在媒體的表面，水平記錄與垂直記錄趨近於相同大小的去磁場 [ 6 ]。而輸出訊號的大都來自記憶媒體的表面磁化，因此在高密度資料儲存下，垂直記錄是否優於水平記錄尚有許多紛爭。而且垂直記錄需要較低的磁頭飛行高度以達成足夠的輸出強度。這在現存的機械控制上仍是尚待克服的難題。

爲了提高傳統磁記錄的面積密度 ( areal density )，除了機械控制上有極大的進展 ( 如降低飛行高度 ) 和記錄方式的改變外，在記錄媒體及讀寫磁頭的努力也是不可抹滅的。記憶媒體的急速進展涵括了材料及製程方面。除傳統的粒子材料不斷的進步外，各種薄膜材料也紛紛出現。金屬薄膜記錄材料近年內引起極大的興趣，或許可以解決過去記錄材料的耐用與腐蝕的問題。磁頭的技術上引入了半導體工業的技術來達成輕、薄、短小的目標。薄膜磁頭的技術及

應用近年內應可再有更大的進步。最近比較顯著的應用當屬MIG ( metal in gap 磁頭 [ 7 ] 與磁阻式磁頭 [ 8 ])。MIG磁頭可在間隙產生較大的磁場而且具有較好的抗磨損性。磁阻磁頭與傳統重現磁頭最大不同處在傳統方法利用楞次定律 ( lenz's law ) 偵測磁通量變化，而磁阻磁頭利用磁阻效應 ( Magnetoresist effect ) 來直接偵測磁通量。這種高敏感度的重現磁頭 ( reproduce head ) 可使得在軌密度 ( track density ) 加大時仍可在低頻下偵測出良好的輸出訊號。圖五表現在商業化產品 媒體與磁頭的常用材料。

傳統磁記憶媒體通常是由細小的三氧化二鐵的粒子分佈在聚合物的底層上構成。雖然體積和形狀都可能不同，這些細小的粒子通常都是針狀體。記憶媒體的品質和粒子的大小，在底層上分佈的均勻性，表面的平滑，粒子的異向性 ( anisotropy )，磁材料的磁

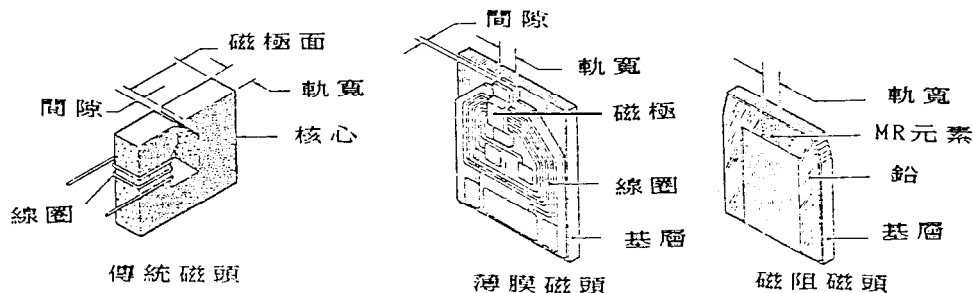
(甲) 塗佈型媒體

材料	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CrO}_2$	Fe	Ba-ferrite
形狀					
$H_c$ (Oe)	200 ~ 420	600 ~ 800	400 ~ 700	900 ~ 2000	600 ~ 1000
$\delta_s$ (emu/g)	70 ~ 75	70 ~ 75	75 ~ 80	130 ~ 150	55 ~ 70
粒長 ( $\mu\text{m}$ )	0.3 ~ 0.5	0.3 ~ 0.6	0.2 ~ 0.7	0.1 ~ 0.5	0.08 ~ 0.03

(乙) 薄膜型媒體

種類	連續	鍍	蒸
	式磁 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	plated Co-Ni-P	鍍純金屬
結構			
磁性膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	0.15	0.08	0.05
抗磁力 (Oe)	700	600	900
殘留磁密度 (G)	2,500	6,000	8,000

(丙) 磁頭



□ \*

化強度 (magnetization) 以及磁滯力 (coercivity) 都有很大的關係。其他如磁性針狀體的排列問題，是單磁區 (single-domain) 或多磁區 (multi-domain) 粒子，以及形狀和體積的分布都會影響到記憶媒體的品質。高密度記憶尚牽涉嚴重的相互作用力的問題 [9]，其中包括磁頭與記憶媒體。因為無法將磁場聚焦，利用傳統的磁頭達成高記錄密度的唯一方法是減小磁頭間隙與降低磁頭與記憶媒體

間的飛行距離，但通常却會導致嚴重的磨損現象。這磨損現象在磁帶及軟碟中尤其顯著，因為磁頭與記憶媒體在磁帶與軟碟中實際上是接觸著。硬碟中，磁頭與記憶媒體雖未接觸，但却以相對速度每小時幾百哩的速度在記憶媒體的表面  $2000 \text{ \AA}$  的高度飛行，而且在變換磁軌時需承受高達幾個重力加速度。在這種狀況下，媒體表面的粗糙程度便非常重要。稍微大的突出都會導致磁頭損壞，摧毀硬碟上的部分區域而使得儲

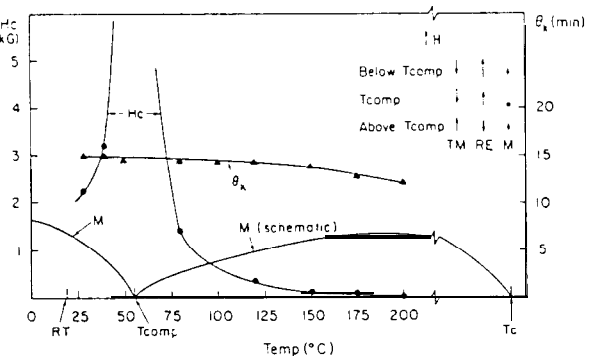
存資料的遺失。

### 叁、磁光記錄：

磁光記錄與傳統磁記錄最大的不同處在磁光記錄採用雷射光代替磁場作記錄與讀取資料的方法。儲存資料的密度受到了雷射光波長的限制，但是却可以在離開記錄媒體表面較遠處記錄與讀取資料。一般認為磁光記錄提供了光記錄的密度但又保存了磁記錄可改寫的便利。而光的可聚焦性又去除了磁頭撞毀的可能性，因而導致可取式硬式磁碟機理想的成熟。現存的一般磁光材料的缺點是科爾角度 (Kerr magneto-optic angle) 或法拉第角度 (Faraday magneto-optic angle) 太小，以至輸出訊號與噪音的比值 (S/N ratio) 不高 [10]。最近在實驗室內發現科爾角度甚大的磁光材料 [11]，可是異向性是平行於薄膜平面，或是在低溫下才存在，本質上並不適合於磁光記錄的所需特性。如要在室溫環境下增大科爾角度尚須進一步的研究與應用 [12]。

熱磁記錄是磁光記錄中必須使用的方法 [13]。利用磁性材料的磁化強度和磁滯力與溫度的特性關係，由雷射將磁性材料加熱至某一臨界溫度以上，而後在外加磁場下降溫。此臨界溫度可以是居里溫度 (Curie temperature) 或是補償溫度 (compensation temperature)。科爾角度在居里溫度附近時掉落甚多，以至在讀取資料時會影響 SNR [10]。從這角度而言，利用補償溫度較居里溫度為佳。但是從製造材料的角度看，材料的組成的些微不同會影響補償溫度甚多。從圖六中知道補償溫度的變化會嚴重的影響室溫下的磁滯力，然而利用居里溫度的材料却沒有這種缺點。

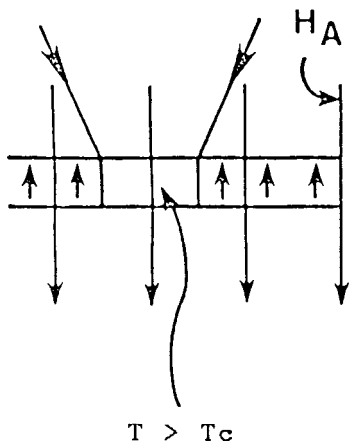
利用補償溫度的材料主要以稀土族——過渡金屬 (RE-TM) 合成。這種磁性材料是非晶系的陶鐵磁鐵 (amorphous ferrimagnets)。在補償溫度時，兩組成部份的磁化強度相等而排列方向相反。圖六中的補償溫度大約是 60°C，居里溫度則大約在 250°C。這也是一般商業產品的規格。由於在補償溫度以下，RE 的磁化強度較強，而高於補償溫度時，TM 的磁化強度較強，外加磁場排列較強磁化強度的部份，由於 RE，TM 間負的交互作用力，較弱的部份會排列在相反的方向，在補償溫度時，磁滯力會趨進於無窮大，這是由於磁滯力與磁化強度成反比的關係。物理上簡單的解釋，在磁化強度趨近零時，必須外加趨近於無窮大的磁場才能產生磁力矩轉動磁矩。在使用居里溫度的原現時，當磁性材料從居里溫度以上的順磁性 (paramagnetic) 狀態冷卻到低於居里溫度的鐵磁性狀態 (ferromagnetic) 時，磁化方向會沿著冷卻時外加磁場方向。



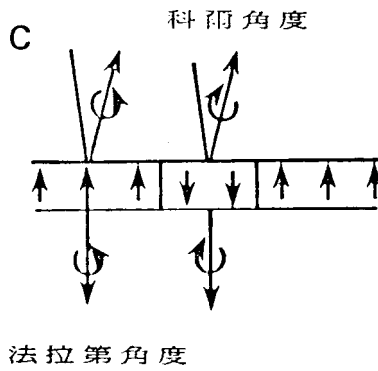
圖六

磁光記錄讀寫過程的簡單示意如圖七。雷射提供記錄的熱源。利用補償溫度或居里溫度的特性在記憶媒體寫入上下不同的磁化樣型。假設往下的磁化樣型為“1”而往上的磁化樣型為“0”。利用科爾磁光效應可讀出磁化方向而獲得資料。科爾磁光效應是當一線性極化的光從磁化的磁性材料上反射時，極化的方向會因磁性材料的磁化方向不同而產生不同旋轉方向。在讀取資料時，入射的雷射光強度通常甚為微弱，導致輸出訊號甚低。因此如何增進 SNR 是磁光記錄上的重要課題。如果單從記錄的線密度 (linear density) 而言，傳統磁記錄比磁光記錄領先 [14]。甚而言之，磁光記錄由於受到光波長的限制，如果

(A) 記錄



(B) 讀取



(C) 消除

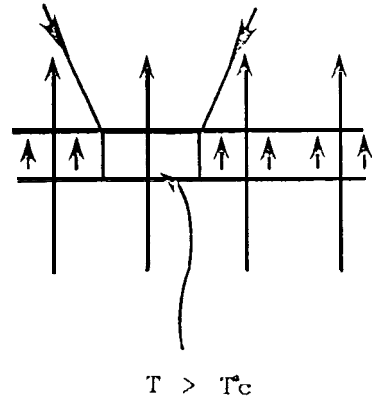


圖 七

無法發展出較短波長的雷射或技術，如利用兩倍頻率法 (frequency doubling)，磁記錄在線密度上的領先會更加增大。但在軌密度 (track density) 上，則磁光記錄遠較磁記錄為高。理由是雷射可被控制到較窄的軌寬內。

非晶系材料特性本身就是值得深入探討的，而在非晶系材料上的磁性或磁光現象更是從未被完全瞭解。物理學家和材料學家除了尋找室溫下有較大科爾磁光效應的新材料外，在基礎物理分析上也有許多良好的研究機會。

#### 肆、磁泡記錄：

磁泡可想成一可移動的小磁區，而其磁化方向與周圍相反。磁泡的存在與否可視為二進位的“1”或“0”。今天磁泡記錄是利用鎳鐵合金 (Permalloy) 的精密製造結構在石榴石 (garnet) 的薄膜上照相製版 (lithographic) 而成，如圖八。外加一旋轉的磁場在薄膜上可在鎳鐵合金的非對稱的 Y 形上產生磁極 (magnetic pole) 而導致磁泡移動。因為磁泡是一對稱封閉結構，所以均勻的磁場無法在磁泡上產生淨力 (net force)。但如有一變化的磁場

，則可在磁泡上產生一淨力。另一種產生淨力的方法是變化薄膜高度，磁矩和磁牆的能量 (wall energy)。這些可利用溫度來造成局部區域的差異導致磁牆受力的不同而移動磁泡。但通常在應用上仍以利用磁場梯度 (field gradient) 來移動磁泡。磁泡的產生裝置通常是利用碟狀的鎳鐵合金在旋轉的磁場下，產生適當的磁極而在石榴石上製造出磁泡 (如圖九甲) 傳播至不對稱的“Y”形或對稱的“T”形鎳鐵合金上。磁泡的消滅機制可利用反向旋轉的磁場消滅由“T”形或“Y”形傳播器傳來的磁泡 [15]。利用“T”形或“Y”形的傳播器傳遞磁泡的方法可分為“磁場取得”或“電流取得” (field access or current access) 兩種方法。磁場取得的方法以外加在石榴石平面的磁場導引磁泡，而電流取得的方法則利用通過石榴石平面的電流產生磁場而導引磁泡。電流取得的方法通常可儲存較密的資料及有較高的傳播速度。因為磁場取得的導引速度受到線圈的電感 (inductance) 限制，而電流取得的方法有較低的電感值故可在較高頻率下得到較好的結果。圖九乙表一般磁場導引的機制，而圖九丙則表  $50 \mu\text{m}$  的磁泡運動照片。

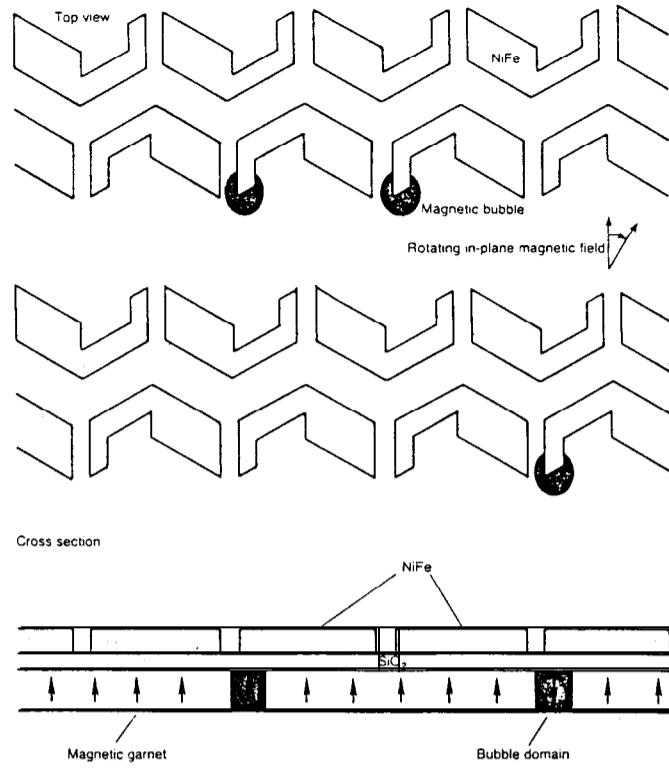


圖 八

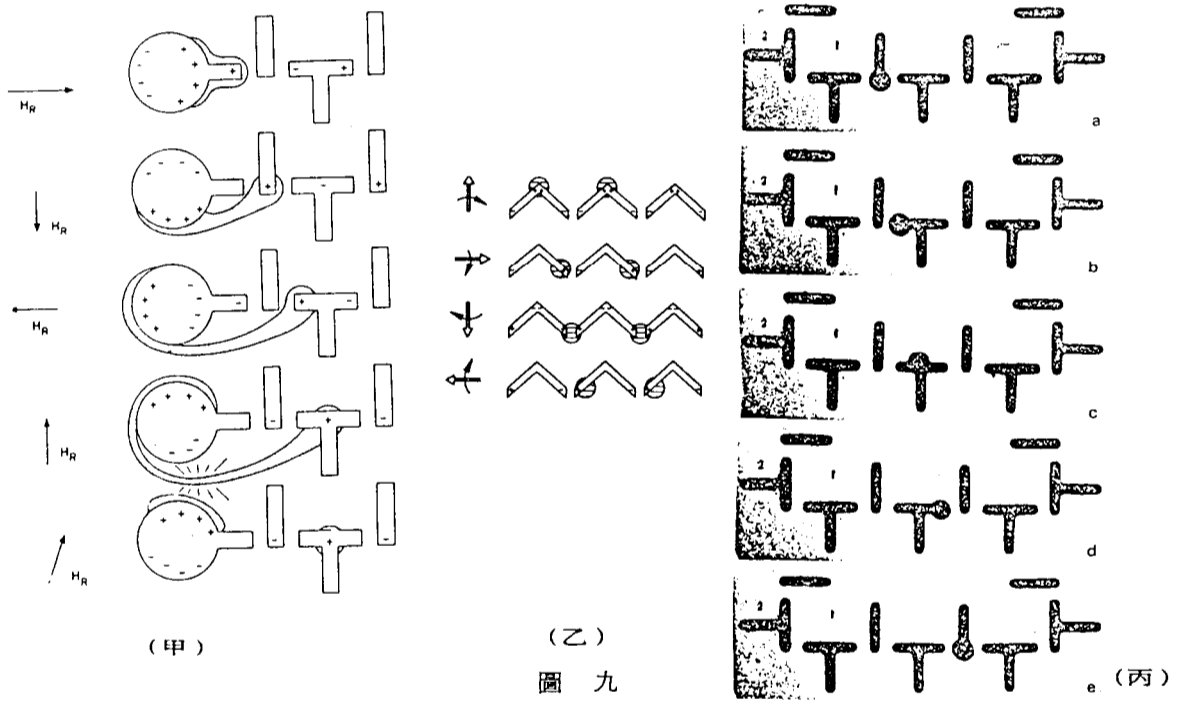


圖 九



日本最近有學者建議一超高密度的記錄方式〔16〕。這種記憶裝置是使用垂直的布洛赫線，VBL (Vertical Bloch Line)，來儲存資訊。基本上是利用磁泡材料上的帶狀磁區 (stripe domain) 間的磁牆的扭曲 (twist) 來儲存資料。VBL 記憶的概念是由磁牆的動態行為而來的。因此要使 VBL 的技術趨於成熟，需要物理學家對 VBL 的穩定性及動態分析上作更深入的研究才可達到。材料上如何找到非常均勻的製造方法亦是使得 VBL 能夠實現的重要因素。而這種利用固態 (solid state) 技術的記憶裝置可提供每平方公分近十億位元的密度更使得這方面的研究是值得的。

伍、預期發展方法：

固態技術的記錄裝置雖可提供每平方公分高達十億位元以上的密度，但是要求材料的高度均勻性 (homogeneity) 却是非常難達到的。薄膜上的缺陷 (imperfection) 與微結構 (microstructure) 都會導致資料傳遞與遺失的問題，這現象在 VBL 時尤其顯著。如何將實驗室的小規模技術轉為大規模的量產將是材料的重要問題。磁光記錄目前雖可提供較傳統磁記錄高的密度，但由於傳統磁記錄的不斷進步，這密度差距極有可能不是重大問題。磁光記錄需要在重寫 (overwrite)，兩倍頻律的技術上和增

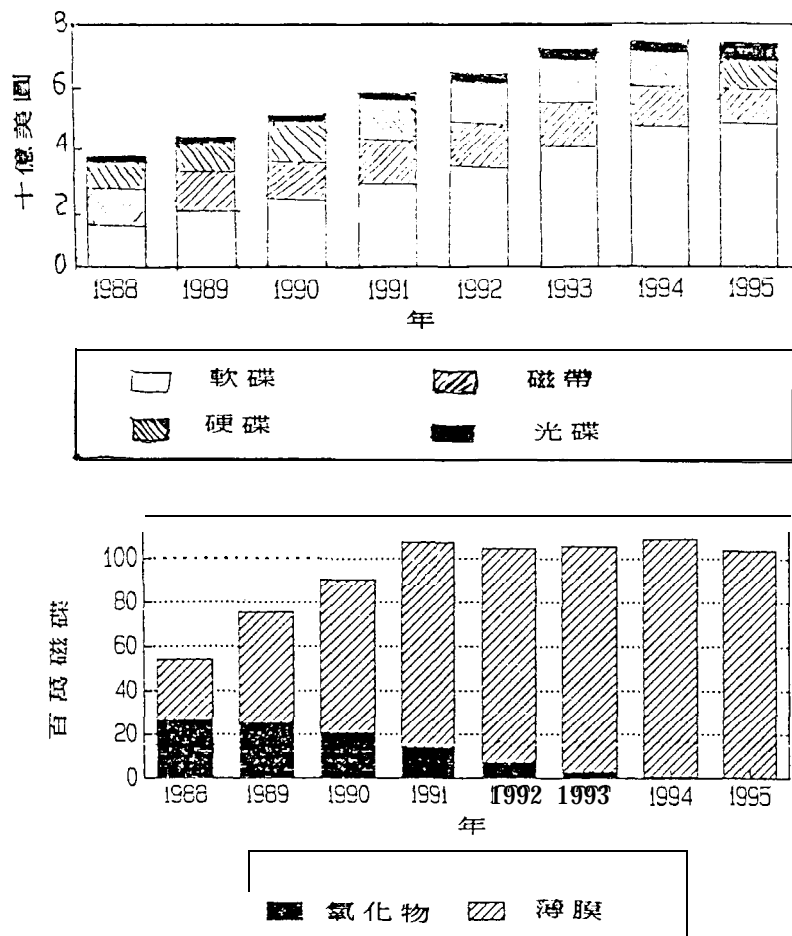


圖 十

大科爾角度材料尋找上做更多的研究，才能提高輸出訊號強度與實用性。傳統磁記錄預計在近期內可達到與其他技術相同的密度（如利用垂直記錄），可是在磁頭飛行高度上需要再降低。總而言之，不管是那種記錄方式，要達到輕薄短小的極致目標，都需要更多的研究開發。磁記錄工業的遠景在近期內應傾向於磁光記錄的發展，但是傳統磁記錄仍有其廣大市場，唯在媒體與磁頭的發展方向應朝薄膜材料研究（圖十）〔17〕。

磁資訊工業提供了良好的磁性物理研究領域。例如瞭解、分析、發展與製造新的磁性材料；分析磁頭與記憶媒體間的摩擦學（tribology）與潤滑（lubrication）的問題；懸浮在聚物流體中的磁性針狀體所牽涉的磁流體現象以及磁矩在外加磁場變化下的動態行為等。都尚待研究人員作更深入的探討。在美國、歐洲和日本每年都投入大筆的研究經費在磁資訊的發展上。據估計過去數年內，世界上有100家以上的新公司成立〔3〕。台灣最近也相當注重磁性材料的發展，相關的磁資訊公司近年都有不錯的成長〔18〕。也就由於磁資訊工業不斷的進展，如何將新穎的想法與技術應用到實際的產品，造出更快速輕便的裝置。提供了無數引人入勝的工作給富有創造力的物理學家。同樣的，在學的研究生如果從事這方面的題目。除了提高在物理學的知識及在學術界和工業界的市場價值外，同時也不影響從事有創造力研究的理想。今天，世界的潮流在往資訊為基礎的道路上運動著，而許多有趣的研究題目也都與資訊關連著。磁物理不僅是古老的指南針問題，同時也是最現代的十億位元記憶媒體的問題。磁資訊的工業提供了最好的機會與挑戰給物理學家，那是以前研究磁物理的學者未曾遇過的機會。

#### 參考資料

1. R. W. Wood, "Magnetic Recording Systems", IEEE, Proceeding, **Nov.**, 1557, (1986).
  2. J. C. Mallinson, "The Next Decade in Magnetic Recording", IEEE, Trans. Magn., MAG-21, 1624, (1985).
- 物理會刊（十一卷三期）1989年

3. M. H. Kryder and A. B. Bortz, "Magnetic Information Technology", Dec., 20, (1984).
4. M. H. Kryder, "Magnetic Information Storage Technology", IEEE, Proceeding, Nov., 1475, (1986).
5. A. B. Bortz, S. W. Dunkle, "Report of the Workshop on Magnetic Information Technology", National Science Foundation, Washington, D. C. (1983).
6. J. C. Mallinson and H. N. Bertram, "Theoretical and Experimental Comparison of the Longitudinal and Vertical Modes of Magnetic Recording", IEEE, Trans. Magn., MAG-20, 461, (1984).
7. F. Jeffer, "High-density Magnetic Recording Heads", IEEE, Proceeding, Nov., 1540, (1986).
8. N. Smith, "Micromagnetic Analysis of a Coupled Thin-film Self-biased Magneto-resistive Sensor", IEEE, Trans. Magn., MAG-23, 259, (1987).
9. C. -R. Chang and D. R. Fredkin, "The Dynamic Vectorial Model for Assemblies of Acicular Particles", IEEE, Trans. Magn., MAG-22, 391, (1986).
10. W. H. Meiklejohn, "Magneto-optics: A Thermomagnetic Recording Technology", IEEE, Proceeding, Nov., 1570, (1986).
11. E. Attaran and P. J. Grondy, "The Magnetic Magneto-optical and structural properties of PtMnSb Thin Films", J. Magn. Magn. Mat., 51, (1989).
12. C. D. Mee and E. D. Daniel, "Magnetic Recording", Vol. II, McGraw-Hill Book Company, 310, (1988).
13. A. E. Berkowitz and W. H. Meiklejohn, "Thermomagnetic Recording Physics and Materials", IEEE, Trans. Magn., MAG-21, 1624, (1985).

14. C. D. Mee and E. D. Maniel, "Magnetic Recording", Vol. I, McGraw-Hill Book Company, 18, (1987).
15. A. J. Perneski, "Propagation of Cylindrical Magnetic Domain in Orthoferrites", IEEE, Trans. Magn., MAG-5, 554, (1969).
16. S. Konish, "A New Ultra-high-density Solid State Memory: Bloch Line Memory", IEEE, Trans. Magn., MAG-19, 1838, (1983).
17. "Two Conclusions Regarding Optical Media Acceptance", MMIS, Vol. X No.5, 73 (1989).
18. 張文成, "我國磁性材料工業現況及展望", 材料與社會, 26頁, 民國77年5月。

(張慶瑞, 現任教於台灣大學物理系)

