

垂直磁記錄原理

Principles of Perpendicular Magnetic Recording

楊志信 教授 (Jyh-Shinn Yang)

國立台灣海洋大學光電科學研究所

(National Taiwan ocean University, Institute of Optoelectronic Sciences)

摘要：

由於現今媒體中增強的熱效應，即超順磁效應的關係，水平磁記錄正接近其技術極限。垂直磁記錄公認為最接近傳統水平記錄之替代技術，並且有展延面密度達每平方英寸兆位元以上的潛能。在本文中，我們將評論垂直磁記錄模式因其組態而獨有的特徵，並且闡明垂直磁記錄超越水平磁記錄的優點。

Abstract

Longitudinal magnetic recording (LMR) is approaching its technical limits owing to the enhanced thermal effects in modern media, known as the superparamagnetic effect. Perpendicular magnetic recording (PMR) is believed to be the closest alternative to conventional technology and provides the possibility of extending the areal density beyond 1 Tbps. In this article, the unique feature of PMR due to its configuration is reviewed and the advantages of PMR over LMR are clarified.

關鍵字：垂直磁記錄、超順磁效應、微磁學

Keywords: Perpendicular magnetic recording, superparamagnetic effect, micromagnetics

前言：

磁記錄為運用磁性媒體磁滯特性以儲存訊號(資料)並重現之的技術，此技術早於西元 1898 年就由丹麥工程師 Poulsen 先生發明，最先用於聲音錄放，之後於 1956 年 Ampex 公司將此技術用於影像錄放。西元 1950 年代 IBM 公司發明了硬碟機技術，並於 1957 年出廠世上第一台硬碟機 (HDD)--RAMAC^[1, 2]，從此進入磁記錄的黃金年代。百年來，磁記錄隨著新技術的發展與運用一直維持著成長，不僅運用於專業資料儲存，並且深入人們日常生活各層面，同時也深深影響社會文化政治等層面^[3]。

作為資料儲存的記憶媒體，首重要求為可靠性，再者高儲存容量與快速存取，價格

便宜及使用簡易，硬碟機因具有這些特點而成為電腦資料儲存之主流。近 50 年來，硬碟機技術不斷地改進，記錄密度也隨著快速增加，至今已增加 5 千萬倍以上^[4]。然而更高記錄密度的追尋永不止盡，磁記錄密度仍可繼續飛躍成長嗎？較可信的答案似乎是現今水平磁記錄之密度已逼近其物理極限，即超順磁效應造成的限制^[5]。如何因應此一物理極限，本文將從基礎的磁記錄原理出發，介紹垂直磁記錄的優點將能展延此一物理極限，進一步推升磁記錄密度。

(一) 基本磁記錄原理：

資料是藉著媒體之磁化雙態代表 1 或 0 以儲存(圖 A)，磁化雙態導源於磁顆粒之形

狀或磁結晶異向性提供的單軸異向性(K_u)。為了維持資料的穩定性，顆粒之異向性提供的能量障壘($K_u V$)須遠大於熱能($k_B T$)，通常要求 $K_u V > 55 k_B T$ 以維持至少 5 年的熱穩定性，式中 V 為顆粒體積與 T 為工作溫度(~ 340 K)。磁粒具有較高的單軸異向性或較大的體積，將呈現較好的熱穩定性，然而這兩者的上限值分別受限於磁頭能提供的寫入場以及媒體訊噪比(SNR)的要求。現今高級記錄媒體之磁粒尺寸約為十奈米左右，其頑磁力(H_c)可達 4.8 kOe。媒體之磁化方向原理上可有三種主要指向，即平行軌道、垂直媒體平面以及平行平面但垂直軌道之方向，這對應三種不同的記錄模式：水平、垂直以及橫向的(圖 A)，傳統上磁記錄皆屬於水平模式。每一碟片儲存容量由軌距與位元長度決定，而兩者乘積的倒數就是面記錄密度。

當欲寫入或覆寫資料時，訊號電流通入纏繞於磁頭上的線圈而將磁極磁化，磁化的磁極於磁頭間隙逸出磁場，以改變通過間隙旁之媒體磁化至所要的狀態(方向)。因此作用於磁顆粒的寫入場須大於其翻轉場，通常要求寫入場為媒體頑磁力之 2 倍。幾十年來此種錄寫技術並沒有太大的變動，寫入磁頭最主要的改善是磁頭磁極磁化量的提升。現今高級磁頭之磁極使用鐵鈷合金($\text{Fe}_{65}\text{Co}_{35}$)，其飽和磁通量密度(B_s)可達 2.45 T，最大的寫入場預期可達 $1.9 \sim 2 \text{ T}^{[6]}$ 。設計磁頭結構時，主要考慮為須使逸出場主要分量平行於顆粒易軸方向，以提高媒體可寫入能力，並最佳化於媒體磁化轉換中心有最大的場梯度，以達成最佳的轉化銳度而減少位元長度。再者，磁頭場於偏軌方向須迅速衰減，以避免鄰軌位元被擦拭。

再生過程的目的為將記錄媒體上所儲存的磁化狀態能忠實地重現出來。早期使用感應式磁頭(即纏繞線圈的磁頭)讀出數據，其工作原理依據的是法拉第電磁感應定

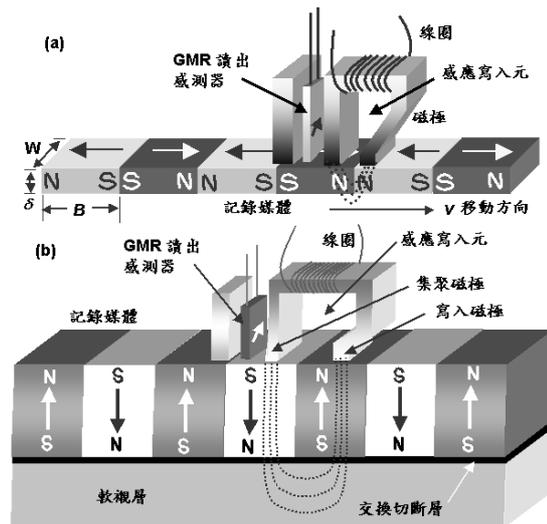


圖 A、水平(a)及垂直(b)磁記錄系統示意圖。媒體內磁化朝右(上)或朝左(下)代表位元 1 或 0。

律，即讀出訊號由媒體磁樣逸出的磁場線偶合進入讀出頭的磁通量時變率決定，此訊號正比於媒體磁化量、磁軌寬度與磁頭及媒體間相對速率^[7]。但隨著密度提升，位元尺寸減縮，讀出頭的靈敏度須提高，以維持一定水準的訊噪比，因此讀出頭改用磁電阻(MR)以及後來的巨磁電阻(GMR)效應以讀取訊號(圖 A)。MR 或 GMR 磁頭讀取訊號原理為由媒體磁樣逸出的磁場驅使磁頭感測(自由)層磁化轉動，而導至感測元的電阻變化^[8]。由於巨磁電阻技術不斷創新，其 MR 比值不斷提高(室溫時 MR 比約 25%)，水平記錄面密度也因此提升至 100 Gbps 以上。

(二) 水平磁記錄的難題：

為了增加記錄密度並維持一定水準的訊噪比，記錄位元物理尺寸與磁顆粒之粒徑依“比例定律”必須縮小，例如在 20 Gbps 時，粒徑約為 13 nm，而在 100 Gbps 時，粒徑須縮小至 9.5 nm。但粒徑(體積)太小時，熱擾動會使磁顆粒之磁滯消失，記錄資料因此喪失，此稱為“超順磁效應”。解決之道為提高磁顆粒之異向性，這同時亦增加其翻轉場，但翻轉場之最大值受限於媒體之可

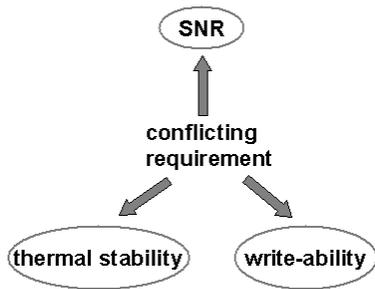


圖 B、記錄系統各要求之競爭。媒體的訊噪比、熱穩定及寫入能力三者間須相互妥協。

寫入能力，這由磁頭材料能提供的最大寫入場決定。上述的即為磁記錄著名的三難局面(trilemma)(圖 B)^[9]。經過多年辛苦的努力以提升水平記錄之密度，例如讀出磁頭運用磁阻(GMR 及 TMR)效應以及引入反鐵耦合(AFC)型媒體以增強熱穩定性等，但最近磁記錄界終於屈服於現實，即水平磁記錄之終極密度受限於超順磁極限^[5, 10]。

(三) 垂直磁記錄的優點：

為了克服超順磁極限，進一步提高儲存容量與記錄密度，採用垂直磁記錄技術公認為最接近水平記錄之替代方案^[10]。此記錄技術早於西元 1977 年由日本東北大學岩崎教授發明^[11]，然而直到今年，才有產品上市。現今垂直磁記錄之演示面密度可達 170 Gbps (希捷)，而東芝公司的 1.8 吋硬碟機也即將上市，其面密度達 133 Gbps^[12]，當然此記錄密度仍無法與水平記錄相抗衡，然而理論分析預測其面記錄密度將可超過 1 Tbps 的潛能^[13]。多年的研究結果顯示，垂直磁記錄具有延緩超順磁極限至較高的記錄密度之願景，這由於此記錄系統有如下所述的優點，即(1)因軟襯層的成像作用使磁頭的寫入場增大，(2)靜磁作用有利於垂直磁化反向排列，以保證高記錄位元的穩定，(3)使用較厚的膜可提供較大的磁粒體積以抗拒熱擾動。垂直磁記錄是否能如人所願，進

一步推升磁記錄密度？底下我們將以深入淺出方式，探討與垂直磁記錄密切相關的議題，如磁頭場、磁粒翻轉與媒體去磁場特性，說明垂直磁記錄能否達到超高密度，某些議題的挑戰是極嚴苛的。

(四) 寫入磁頭磁場特徵：

為了有效地使寫入場垂直媒體表面，寫入頭採用單極頭與軟襯層組合(圖 A(b))據信是有較佳的錄寫行為。由於軟襯層之高導磁率，真實單極頭會因軟襯層的成像效應而有效地集中磁場線，因而提高寫入場之垂直分量。利用簡易的“磁荷模型”分析磁頭場，易使我們瞭解其中的物理；實際的寫入場是由真實磁極與虛擬的像磁極表面均勻磁荷所產生的磁場合成。為了比較，亦呈現典型的水平記錄磁頭(環型磁頭)的結果。由圖 C 插圖可知垂直媒體位於磁極“等效”間隙內，而水平媒體則位於磁極“物理”間隙旁，這組態差異造成兩類記錄不同的磁頭場特徵(圖 C)；對於單極頭與軟襯層組合，從磁頭表面($z = 0$)至媒體層與軟襯層界面($z = h$)，磁頭場水平分量(H_x)迅速地減少，而垂直分量(H_z)雖也衰減，但仍維持一定的水準，這意味著垂直媒體可運用較厚的磁粒以增加熱穩定性。進一步分析磁頭場的向量分佈，可知磁顆粒翻轉之寫入場角度發生於 15° 至 25° 間(圖 D)。對於環型磁頭，遠離磁頭表面時，磁頭場(水平與垂直分量)迅速地減少，這造成水平記錄無法使用較厚的媒體以增加熱穩定性。但當媒體接近磁頭時，環型磁頭寫入場的水平與垂直分量是同樣重要，這場分佈使得磁顆粒翻轉之寫入場角度發生於 45° 左右(圖 D)。由於磁粒的翻轉場大小與場角度密切相關(見底下)，這意味著寫入場角度的效應於高密度錄寫時伴演重要的角色。

原理上，單極及軟襯層組合之最大逸出場為 $B_s (= 4\pi M_s)$ ， M_s 為磁頭材料的飽和磁化

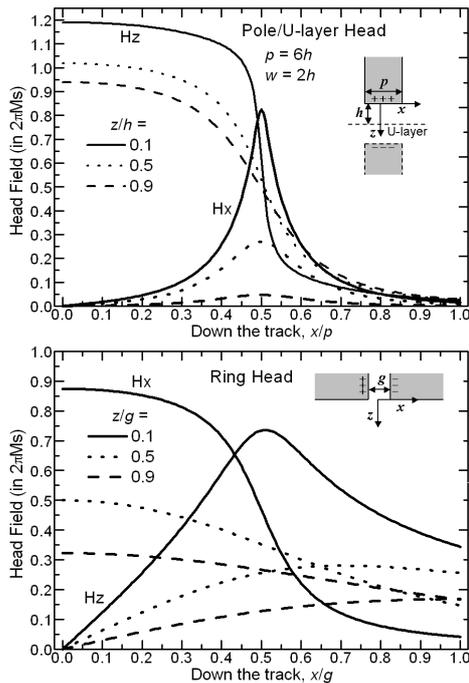


圖 C、垂直(左)及水平(右)記錄磁頭之寫入場分佈。插圖為磁極示意圖與座標說明，水平媒體位於磁極之下方，而垂直媒體位於真實磁極之下方並與軟襯層相接。 H_x (H_z) 表示水平(垂直)分量， p 及 w 分別為長方形磁極之長度及寬度。

量)，為環型磁頭的 2 倍。較精確的向量場分析顯示，垂直磁記錄之實際的最大寫入場為環型磁頭的 1.75 倍^[14]。另一寫入頭之重要參數為寫入場梯度，單極及軟襯層組合的場梯度是低於環型磁頭的。若將寫入場角度之因素考慮進來，單極及軟襯層組合之媒體可寫入能力約有百分之 15 的優勢(圖 D)，此數值顯然地與直觀的想法有落差。因此，為了提升垂直寫入磁頭的性能以適合超高密度之用，寫入磁極設計最佳化研究是必須的，而此工作須藉用數值微磁學方法，記錄層與軟襯層之磁化對寫入場的影響亦須同時考慮，才能得到準確的結果^[6, 15]。

(五) 記錄媒體磁性 微磁學分析：

高密度記錄使用薄膜媒體，其由單域磁粒密集堆積組成，磁粒尺寸約為十奈米左右，磁粒間主要交互作用為偶極的，而磁粒

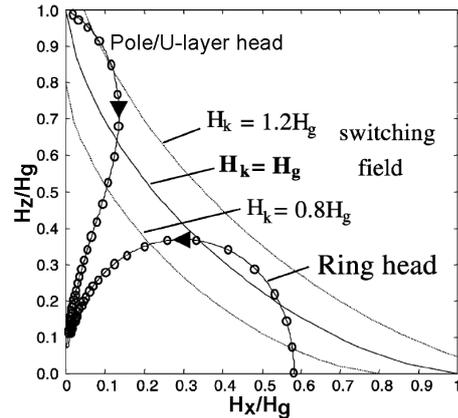


圖 D、以極座標表示垂直及水平記錄之磁頭場分佈。磁頭場是利用保角映射方法求得。 H_x (H_z) 表示水平(垂直)分量， H_g 為深間隙場(或最大的磁頭場)，圓點表示磁頭場，而實線為一致轉動模型的星形線。資料取自[14]。

間交換作用特意地減至最低，這是因為太大的交換作用將提高雜訊而降低了訊噪比^[16]。為了探討媒體翻轉特性，合理地假設各磁粒之磁化反轉為一致轉動的^[17]，並暫時忽略磁粒間交互作用。錄寫過程本質為向量的，因此磁粒的翻轉場 H_{sw} 與寫入場角度 β 的相依性深切影響其記錄行為，此相依性為

$$H_{sw}(\beta) = H_k (\cos^{2/3} \beta + \sin^{2/3} \beta)^{-3/2} \quad (1)$$

式中 $H_k = 2K_u/M_{so}$ 。圖 E 顯示，於 45 度場方向時，磁粒有最小的翻轉場與零斜率，而於零度或 90 度場方向時有最大的翻轉場與極大的斜率，這結果清楚表示媒體內磁粒於水平與垂直記錄之寫入場角度效應是迥然不

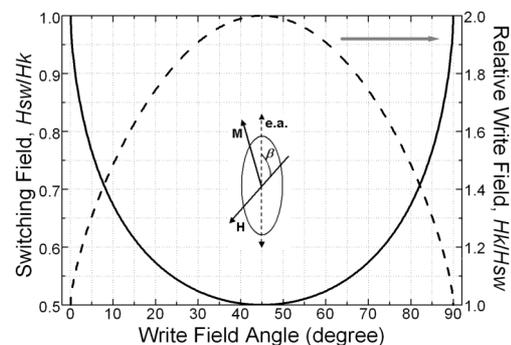


圖 E、一致轉動模型所得的翻轉場與場角度之關係。插圖說明寫入場與磁粒易軸之相對指向。

同的。垂直磁記錄媒體有較大的翻轉場，這合理解釋垂直磁記錄雖有較大的寫入場，但媒體可寫入能力優勢卻高出不多。再者，垂直磁記錄媒體有較大的翻轉場梯度，因此些微的易軸指向分布(如 2°)引起與水平記錄同數量級的錄寫位置(轉換中心)分散^[18]，因此磁粒高度指向的垂直媒體是必需的。

然而，較大的翻轉場梯度卻使垂直記錄有較銳利的寫入轉換，這可由下列垂直磁化轉換與各有關的磁場之關係得知

$$\frac{dM_z}{dx} = \frac{\partial M_z}{\partial H_z} \left(\frac{dH_{Hz}}{dx} + \frac{dH_{dz}}{dx} \right) - \frac{\partial M_z}{\partial H_z} \frac{dH_{SW}}{dH_{Hx}} \frac{dH_{Hx}}{dx} \quad (2)$$

式中 $\partial M_z / \partial H_z$ 表示媒體之磁化曲線的斜率， H_H 及 H_d 表示磁頭磁場與媒體的去磁場^[19]。第一項為通用的 Williams-Comstock 模型所用的表示式，此處式(2)中多了第二項，以考慮媒體翻轉場之角度效應。考慮上述的各種因素，由蒙地卡羅模擬研究得知，垂直記錄之最佳化寫入角度約於 15° 至 20° 間^[19]。此外，由式(1)得知，如將磁粒特意排列成 45° 度傾斜，將可充分利用 45° 度翻轉場之優勢，而有較佳的水平或垂直記錄表現^[20, 21]，但此類媒體的製程挑戰是滿大的。另一可行的方案為運用複合媒體，即硬的垂直媒體層偶合軟的水平媒體層，據研究指出此複合媒體之記錄表現類似 45° 度傾斜媒體，但其製程卻相對地簡易^[22]。

媒體內磁粒間的交互作用會影響媒體之翻轉場與熱穩定性。利用簡易的雙偶合等同磁粒模型(圖 F)^[23]，易於掌握其參數間之相依性。由磁偶極產生的磁場線很容易得知靜磁作用的效應，靜磁作用將使垂直粒子之平行態較不穩定，而使反平行態較穩定；相反地，鐵磁交換作用則呈現相反的結果。因此，靜磁作用使平行態的垂直磁粒之翻轉場與能量障壘同時降低，而交換作用傾向於兩

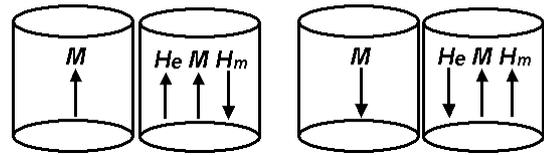


圖 F、垂直媒體內兩相鄰磁粒間交互作用示意圖。左(右)磁粒對呈平行(反平行)排列， H_e 及 H_m 分別表示交換與偶極作用場。左與右磁粒對亦可分別表示垂直媒體內均勻磁化或磁化轉換區情況。

磁粒平行排列，使兩相鄰磁粒作一致轉動翻轉，導至磁粒等效體積增大，因而增強能量障壘；但太大的交換作用於錄寫時會增大磁化轉換區之磁化分歧，因而增加媒體雜訊。由此可見，為了增加垂直媒體的熱穩定性，減弱磁粒間靜磁作用將比增強交換作用來的重要。

當垂直媒體磁化時，表面磁荷產生的去磁場與磁化反向，將使理想的長方形迴路變成切變形狀(圖 G)。當頑磁力 H_c 小於 $4\pi M_s$

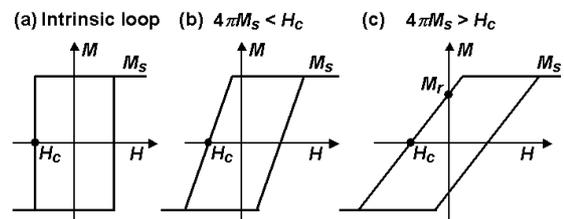


圖 G、(a)理想的垂直記錄媒體之磁滯迴路，(b, c)因去磁場的關係，量測的磁滯迴路為切變的。

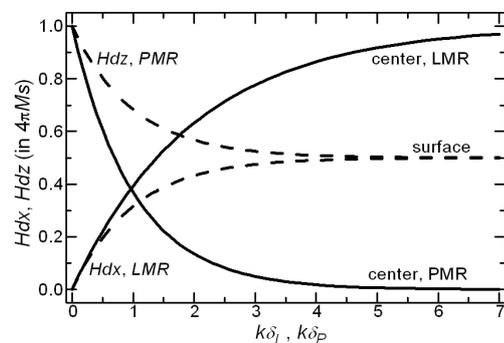


圖 H、由水平與垂直譜和磁化圖案產生的最大去磁場。於高密度時，兩類記錄媒體表面處去磁場皆達 $2\pi M_s$ 。 δ 為媒體厚度與 $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 為波長。

(M_s : 媒體飽和磁化量)時, 去磁場將引起顯著的熱衰退, 尤其於低頻記錄時。因此, 垂直媒體須要求其頑磁力 H_c 大於 $4\pi M_s$ 。當垂直媒體錄寫諧和磁化圖案時, 媒體內去磁場強度隨磁化圖案的波長減小(密度增加)而逐漸減弱(圖 H), 但於表面處, 高密度時的去磁場則漸趨於飽和, 此飽和值($2\pi M_s$)與水平諧和磁化圖案於表面的去磁場最大值是相同的^[24]。這結果有二重意義: 第一為說明垂直記錄是免於去磁作用而勝於水平記錄的想法似乎過於簡化; 第二是於超短波長磁化分佈時, 只有極小區域內磁荷對靜磁場有貢獻。後者很清楚地顯示於超高密度時, 不管水平或垂直磁化模式, 讀取訊號皆遭遇極嚴重的間距損失, 為了克服此讀取訊號損失, 磁頭飛行高度須降低; 再者, 磁讀出頭必須使用靈敏度更高的感測元件(如 TMR 磁頭)。

結論 :

為了克服超順磁極限以提升磁記錄密度, 近期內記錄模式將無可避免地由水平式轉變成垂直式。由於垂直媒體內引入高導磁率的軟襯層, 使得寫入場增強, 因此窄而厚及高異向場(H_k)的磁顆粒得以使用, 此一利基可有效地減縮位元長度, 磁記錄密度預期將推升至每平方英寸兆位元以上。當然欲達到此目標, 最佳化的寫入磁頭的設計、高靈敏度的磁讀出頭的搭配、適宜的媒體配製以及垂直磁記錄系統的整合, 皆為嚴峻的挑戰, 亦為成功的關鍵。

參考文獻 :

[1] A. Moser, *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. 35, R157 (2002); see, [online] <http://www.magneticdiskheritagecenter.org/>.
 [2] 郭博成, “磁記錄簡介”, 磁性技術手冊第 13 章, 磁性技術協會, 民 91; 張慶瑞, 物理會刊, 十一卷三期, 268 (1989); 黃暉理及楊志信, 物理季刊, 七卷二~四期, 71 (1985).
 [3] J. D. Livingston, Scientific American, pp. 80-5, Nov. 1998.

[4]. E. Grochowski, Hitachi Global Storage Technologies (<http://www.hitachigst.com/hdd/technolo/overview/chart02.html>).
 [5] 曾厚朗及盧志權, 磁性技術協會會訊, 第 25 期, 9 (2000); D. Weller and A. Moser, IEEE Trans. Magn. 35, 4423 (1999).
 [6] M. S. Patwari and R. H. Victora, IEEE Trans. Magn. 40, 247 (2004); S. Batra, J. D. Hannay, H. Zhou, and J. S. Goldberg, *ibid.* 40, 319 (2004).
 [7] 張慶瑞及楊志信, “磁記錄原理”, 磁性技術手冊第 14 章。
 [8] Jian-Gang Zhu, Materials Today 17, 22 (2003).
 [9] H. J. Richter, J. Magn. Magn. Mater. 287, 41 (2005).
 [10] S. Khizroev and D. Litvinov, J. Appl. Phys. 95, 4521 (2004).
 [11] S. Iwasaki and Y. Nakamura, IEEE Trans. Magn. 13, 1271 (1977); S. Iwasaki, J. Magn. Magn. Mater. 287, 9 (2005); 事實上早於 1950 年代 IBM 公司也曾發展垂直磁記錄技術, 後因故取消, 參閱 IEEE Trans. Magn. 39, 1871 (2003).
 [12] 參閱東芝公司發佈的新聞 (http://www.toshiba.co.jp/about/press/2004_12/pr1401.htm).
 [13] J. J. Miles, D. McA. McKirdy, R. W. Chantrell, and R. Wood, IEEE Trans. Magn. 39, 1876 (2003); M. H. Kryder and R. W. Gustafson, J. Magn. Magn. Mater. 287, 449 (2005).
 [14] R. Wood, Y. Sonobe, Z. Jin, and B. Wilson, J. Magn. Magn. Mater. 235, 1 (2001).
 [15] S. Li and L. Wang, Appl. Phys. Lett. 82, 1896 (2003); K. Senanan and R. Victora, *ibid.* 81, 3833 (2002).
 [16] 張志高, 磁性技術協會會訊, 第 26 期, pp. 11-18, Oct. 2000.
 [17] 楊志信, 磁性技術協會會訊, 第 28 期, pp. 27-37, April 2001.
 [18] H. J. Richter, E. C. Champion, and Q. Peng, IEEE Trans. Magn. 39, 697 (2003).
 [19] H. J. Richter and A. Yu. Dobin, J. Magn. Magn. Mater. 287, 41 (2005).
 [20] H. N. Bertram and K. Z. Kao, IEEE Trans. Magn. 38, 3675 (2002); J. P. Wang, Y. Y. Zou, C. H. Hee *et al.*, *ibid.* 39 1930 (2003).
 [21] H. J. Richter, IEEE Trans. Magn. 29, 697 (1993).
 [22] R. H. Victora and Xiao Shen, IEEE Trans. Magn. 41, 537 (2005).
 [23] W. Chen, S. Zhang, and H. N. Bertram, J. Appl. Phys. 71, 5579 (1992); Ivo Klik, Jyh-Shinn Yang, and Ching-Ray Chang, *ibid.* 76, 6493 (1994); Hong Zho and H. N. Bertram, IEEE Trans. Magn. 38, 1405 (2002).
 [24] H. J. Richter, J. Phys. D: Appl. Phys. 32, R147 (1999); D. Litvinov, M. H. Kryder, and S. Khizroev, J. Appl. Phys. 93, 9155 (2003).