



磁性微結構中 自旋磁化組態 及其動態過程

文・圖片提供／張慶瑞（物理系教授）

衛榮漢（物理系博士後研究員）

賴梅鳳（工程科學及海洋工程學系助理教授）

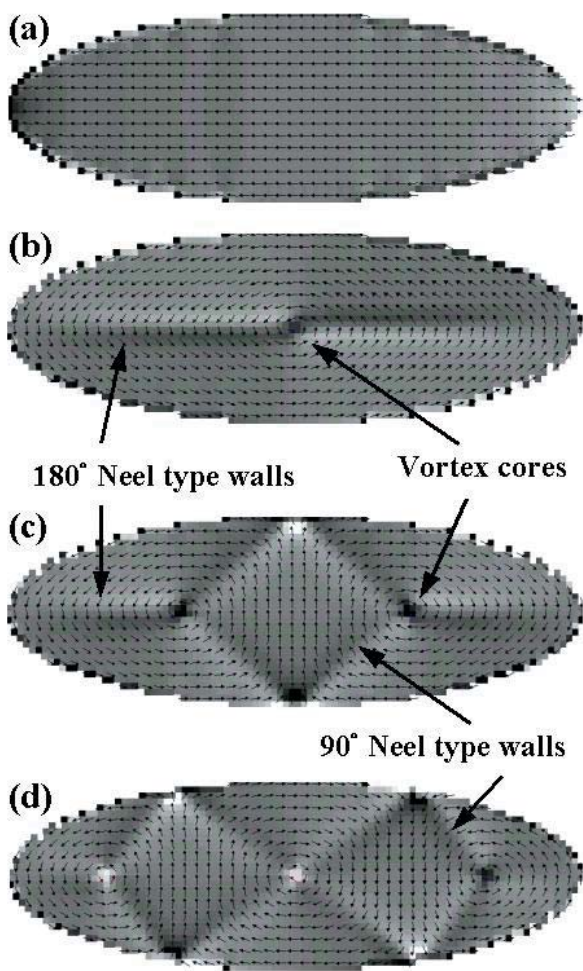


圖1：橢圓軟磁薄膜上典型的磁化組態：(a)準均勻態（單磁區），(b)單渦旋態，(c)雙渦旋態，(d)三渦旋態。所有橢圓薄膜的尺度皆為長軸 720 奈米，短軸 240 奈米，厚度 30 奈米。

由於奈米製作技術及各種時間及空間的超精密量測技術的不斷進步，加上近年來自旋電子學的興起，使得磁性微結構中自旋磁化組態及其動態過程的研究成為一項熱門的課題。首先將介紹磁性微結構中的各種自旋磁化的穩定結構，繼之描述研究磁性微結構動態過程的理論與實驗方法，最後將提及此領域的一些最新研究進展。

前言

由於微影技術及各種奈米製作技術的發展，磁性微結構的自旋磁化組態及其動態過程是近來十

分熱門且進展迅速的一個領域。另外，由於超快光學技術的進展，也使得得以觀察在奈秒（nanosecond）以至於飛秒（femtosecond）時間尺度下，自旋磁化的動態過程。而更由於計算機能力的進展，使得目前甚至可以在一般的PC上，利用自旋磁化的動力學方程來模擬整個動態過程中的行為，來對於實驗結果有更深入的理解與洞察。

磁性微結構的穩定態

在了解整個自旋磁化的動態過程前，先介紹磁性結構中的自旋磁化組態。自旋磁化組態事實上是一個非常複雜的問題，因為在同樣的條件下，同時可以存在許多能量大小不一的穩定態，而使得整個能量曲面，同時有許多的局部極小值存在。而在真實系統中，我們所能觀察到的狀態則決定於磁性微結構的大小、形狀，磁異向性，樣品邊緣的粗糙程度，以及先前的磁化歷史……等。但一般來說，磁性微結構在小尺寸時，由於交換交互作用力（exchange interaction）的主導，將一定範圍內的自旋磁化緊密地限制在同一方向上，因此呈現單磁區（single domain）或者是準均勻態（quasiuniform state）的情況，如圖1(a)。隨著薄膜的尺寸增加，單磁區不再是最穩定的狀態，多磁區的組態將可更有效的降低總能量，雖然磁

壁（domain wall）的存在增加了些許的交換能，不過卻也因此而大幅度地降低了去磁能（demagnetization energy）。圖1(b)顯示了軟磁薄膜上最簡單的非均勻態，也就是單渦旋（one-vortex）的結構，在此結構中，除了中心的核心具有垂直膜面的磁化向量外，所有的磁化向量都平躺在薄膜平面上。圖1(c)則是顯示了較複雜的雙渦旋結構，而圖1(d)則顯示了三渦旋結構。

在各種影響磁化組態的因素中，我們以其中最重要的尺寸與形狀為例。圖2顯示了在30nm厚的橢圓軟磁薄膜，其單磁區態與單渦旋態的存在區間相圖。圖中準均勻態可以存在於從x軸到紅線的幅角範圍。而單渦旋態可以存在於從y軸到藍線的幅角範圍。單磁區邊界（single domain boundary）則標定出這兩種態的能量相等的界線。這個例子告訴我們，各種組態各有其存在的區域，並且這些區域是可以交互重合的。

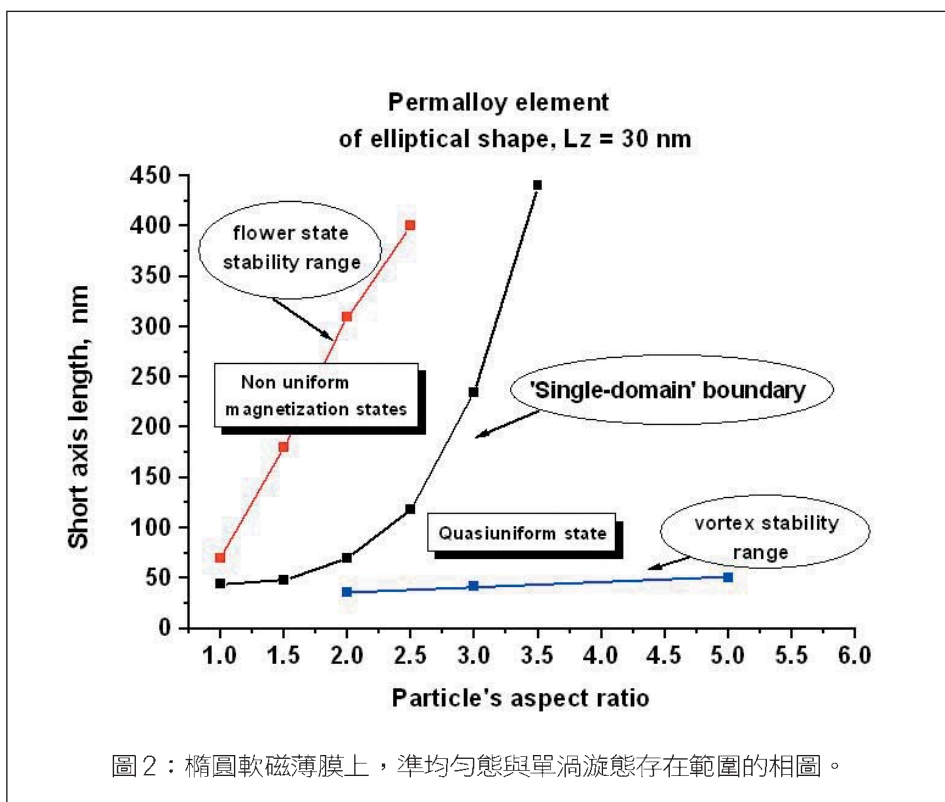


圖2：橢圓軟磁薄膜上，準均勻態與單渦旋態存在範圍的相圖。



理論模擬中的相關能量與動力方程

對於磁性系統，理論上我們必須考慮幾種能量項：交換能（exchange energy）、異向能（anisotropy energy）、則曼能（Zeeman energy）、靜磁能（magnetostatic energy）等。這些能量項所產生的有效場作用於自旋磁化向量，可以使得自旋磁化向量依循著自旋磁化的動力方程式運動。

自旋磁化的動力方程

磁化體中的各個磁化向量與作用於其上的總磁場方向不一致時，磁化向量會呈現進動的行為，並且由於阻尼的效應，磁化向量會逐漸與作用其上的總有效場趨於一致方向，如圖3所示，其行為可以用朗道-李弗西茲-吉爾伯特（Landau-Lifshitz-Gilbert）方程來描述。

朗道-李弗西茲-吉爾伯特方程為以下的形式：

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}) + \frac{\alpha}{M_s} \left(\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right)$$

其中， γ 為迴轉磁比率， α 為無單位的現象學阻尼參數。有效場 $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ 為總能量對磁化的負導數。

$-\gamma (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}})$ 項代表磁化繞著有效場 $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ 的進動，此有效場提供了磁化向量旋轉所需要的力矩；

$\frac{\alpha}{M_s} \left(\mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right)$ 項則描述了能量的耗散，方向是朝著有效場 $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ 的方向。此耗散項使得磁化向量逐漸朝著有效場 $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ 靠近，最終當系統達到平衡的時候，磁化會順著有效場 $\mathbf{H}_{\text{eff}}$ 的方向。

動態過程的模擬

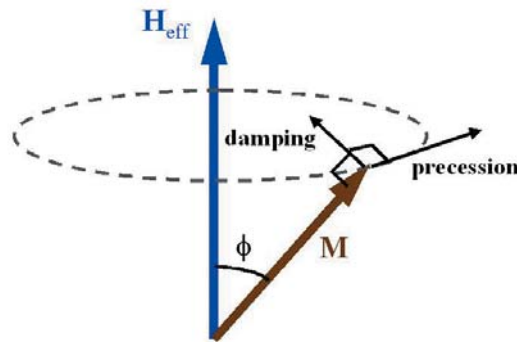


圖3：自旋磁化向量受到作用於其上的有效場，呈現進動與阻尼效應。

為了模擬鐵磁物質的自旋磁化動態過程，我們必須將樣品分成許多立方體分格，這些分格內部的磁化皆均勻地各自朝向某一個方向。分格的數目當然是愈多愈好，這樣得到的結果更接近真實狀況；但是，計算所須的時間往往與分格的數目成指數的增加，因此分格的數目必須同時考慮到電腦的計算能力與其代表的物理意義。一般來說，分格的邊長大小，大約須要小於此磁性材料的交換長度（exchange length），這樣才足以保證在這些分格內部，磁化皆能夠均勻地朝向某一個方向。

模擬的方法為採取一系列的疊代方式，使得磁化向量最終調整成和其有效場同樣的方向。當系統達到穩定態的時候，模擬即終止。疊代的步驟如下：首先我們用初始的自旋組態來計算每個立方體分格的有效場，之後每個立方體分格的磁化再同時設定每次疊代的時間間距；在每次的時間間距內，磁化不僅會繞著有效場作微小的進動，磁化與有效場的夾角也會同時減小一些。

計算到最後，每個立方體分格的磁化就幾乎順著其有效場的方向，因此其後的疊代計算幾乎不改變磁化的方向。一般來說，任何接連兩次的疊

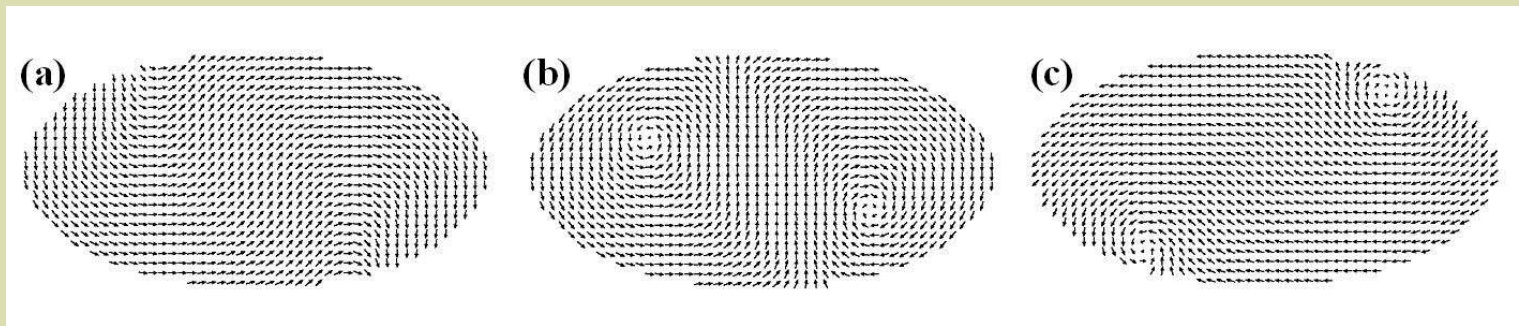


圖4：單磁區的磁化翻轉動態過程。圖中為軟磁薄膜，其長軸為 240 奈米，短軸為 120 奈米，厚度為 30 奈米。

代，若每一磁矩的角度變化皆小於 10° ，則通常可視為系統完成翻轉。圖4為一個橢圓軟磁薄膜的單磁區磁化翻轉的動態過程，原本的單磁區薄膜，所有的磁化向量皆向右（未顯示），若開始外加一個反向的磁場（向左），當磁場逐步增加到翻轉場（-750 Oe）瞬間，單磁區突然變成不穩定而依序變成(a)到(c)的組態，最後(c)中的兩個小渦旋結構被排出薄膜，所有磁化向量順著外加場朝左方，呈現單磁區的狀態，因而完成翻轉。整個過程大約花費 1 奈秒。

動態過程的實驗觀察

傳統的磁區影像量測技術只能觀察到弛豫時間（relaxation time）超過 1 秒的行為，對於快速的動態行為無法觀察。基本上，研究自旋磁化動態過程的實驗必須同時具備良好的空間解析度及時間解析度。現在通常所使用的為頻閃磁光顯微鏡（stroboscopic magneto-optical microscopy）。這種方式的時間解析度可以藉由條狀金屬線所產生的微微秒（picosecond）或奈秒（nanosecond）磁脈衝將飛秒雷射脈衝（femtosecond laser pulses）調整成與其同步而得到。影像的空間解析度通常可以達到 0.5 微米（micron）。此外，軟磁薄膜的自旋磁化動態過程，也可經由在次奈秒的時間

尺度下，測量穿隧磁阻（tunneling magnetoresistance）來進行研究。如此研究了不同外加磁場的脈衝強度與時間長短之下對於磁化翻轉時間的影響之後，其結果可和微磁學模擬（micromagnetic simulation）所得到的結果交相比較印證。為了將翻轉時間最小化，亦有研究指出，必須盡量減少磁場脈衝終止之後的磁化進動，而這可由調整磁場脈衝的強度與時間長短而

張慶瑞 小檔案

1979 年在國立台灣大學物理學系獲物理學士學位，1988 年在美国加州大學聖地牙哥分校（UCSD）獲物理博士學位。

畢業後，曾在工業技術研究院的材料工程所短期服務 4 個月。1989 年 2 月起進入國立台灣大學物理學系，現任物理學系主任暨物理研究所所長，並兼任天文物理研究所所長，同時也是台大奈米儲存研發中心（CNR）主任、理論物理中心（CTP）主任，亦兼任台灣物理學會理事長、亞洲物理學會執行長、IEEE 台灣磁性委員會召集人。

目前研究興趣主要在奈米磁學及自旋電子學，在正式國際期刊所出版文章已超過百篇以上。文章主要內容涵括磁化的弛緩效應、介觀尺寸磁性體的動態翻轉機制、多層膜的異向能、巨磁阻來源與應用、新一代高磁能積硬磁、磁記錄原理及應用。



達成。

結語

由於磁電子元件需要有快速反應的特性，因此研究其動態行為對於發展自旋電子元件來說更顯得迫切。目前自旋電子學不但是基礎研究問題，但同時也是最現代而有經濟規模的千億位元記憶媒體及量子電腦的問題。對於次微米及奈米尺度的磁性薄膜，它們的自旋磁化動態行為的研究，仍然有相當大的空間。但是現有的一些頻閃磁光顯微鏡技術即使加上近場光學的輔助，目前還是沒有辦法達到理想的解析度。這是未來有待努力的目標。 

參考文獻：

- [1] Lai MF, Wei ZH, Wu JC, Ching-Ray Chang et al., 2005 “As-deposited magnetic states in arrays of rectangular permalloy elements”, IEEE TRANSACTIONS ON MAG-

NETICS 41 (2): 944-946 FEB (2005).

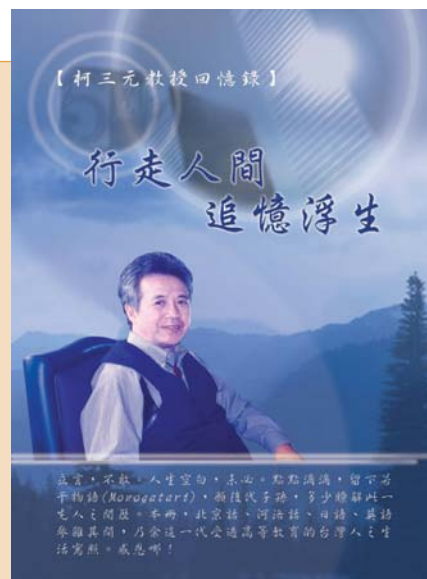
- [2] Wei ZH, Lai MF, Ching-Ray Chang, et al. 2004, “Magnetization reversals in elliptical permalloy particles”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 40 (4): 2107-2109 Part 2 JUL (2004).
- [3] Lai MF, Wei ZH, Ching-Ray Chang, J Wu, 2003, “Influence of vortex domain walls on magnetoresistance signals in Permalloy rings”, PHYSICAL REVIEW B 67 (10): Art. No. 104419 MAR 1 (2003).
- [4] Usov NA, Ching-Ray Chang, Wei ZH, 2002, “Buckling instability in thin soft elliptical particles”, PHYSICAL REVIEW B 66 (18): Art. No. 184431 NOV 1 (2002).
- [5] Yung-Hung Wang, Chi-Huang Lai, Ching-Ray Chang, Jyh-Shinn Yang, and Y. D. Yao, 2001, “Exchange-bias-induced double-shifted magnetization curves in Co biaxial films”, PHYSICAL REVIEW B 64 (9): Art. No. 094420 SEP 1 (2001)
- [6] Ching-Ray Chang, 2000, “A Hysteresis model for Planar Hall Effect in Thin Films”, IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 4, pp. 1214-1217, (2000)

商學系校友柯三元

出版其一生的追憶

1955 年商學系第 4 屆畢業校友柯三元，花費 3 年時間，將其豐富的人生閱歷，撰寫出版《行走人間、追憶浮生》回憶錄。該書正如其自述所言；立言，不敢，人生空白，未必。較為特異之處在於，北京話、河洛話、日語、英語等參雜字裡行間，自稱乃其這一代受過高等教育的台灣人之生活寫照。

柯先生曾任國營事業職員、大專院校兼任教授、企管公司及企業內部講師、經營管理顧問、地方法院簡易庭調解委員等職，並撰寫了二、三十本有關經營管理叢書。



該書乃柯先生幾十年來生活見聞與點滴，全書分 40 小節，處處可見其幽然自嘲之口吻，篇篇皆傑作。（文● 圖片提供／柯三元）