

磁性奈米鑄型結構

文/張家旗、張怡甄、陳哲勤、洪連輝、吳仲卿

奈米鑄型磁膜結構的實現與研究，除了印證微磁學的理論，同時在磁性儲存、磁性記憶體(例如磁阻式隨機存取記憶體，MRAM)及磁場感測方面具有很大的應用價值。本文主要探討奈米磁性薄膜製程，與分析在研發及可能量產的現況發展。並且由微磁學的理論，探討不同尺度鑄型磁性薄膜的磁區結構及其翻轉行為。其中，形狀異向性扮演一個非常重要的機制，也就是說不同形狀之鑄形磁性薄膜，具有截然不同的磁區結構穩定態和翻轉機制。

一、前言

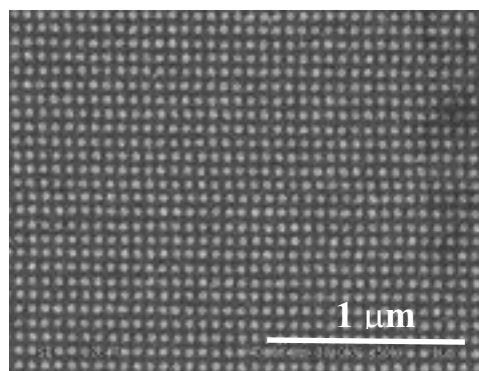
由於奈米結構製作技術的進步，人們對磁學的探究不再停留在塊材或大面積薄膜，進而拓展了對微小鑄型磁性薄膜的研究領域，而且不同形狀的鑄形薄膜，基於形狀異向性的支配，其磁區結構會有所不同，甚至磁矩翻轉的行為也會有截然不同的機制。簡單的說，形狀決定了鑄型薄膜的磁特性，包括殘磁態及磁矩翻轉機制等。而直到目前為止，幾乎所有的幾何形狀的鑄型磁性薄膜都被研究過，例如，矩形[1]、兩端漸尖形[2-3]、橢圓形[4-5]、圓形[6-8]、環狀形[9-12]等等。尤其，當鑄型元件縮小至奈米尺度時，其特性更是值得探究的問題。事實上，此領域的發展，除了探討微磁學的物理機制外，在磁性紀錄及磁場感測的潛在應用面，更是驅使人們投入此研究的主要原動力。

二、製程與檢測技術

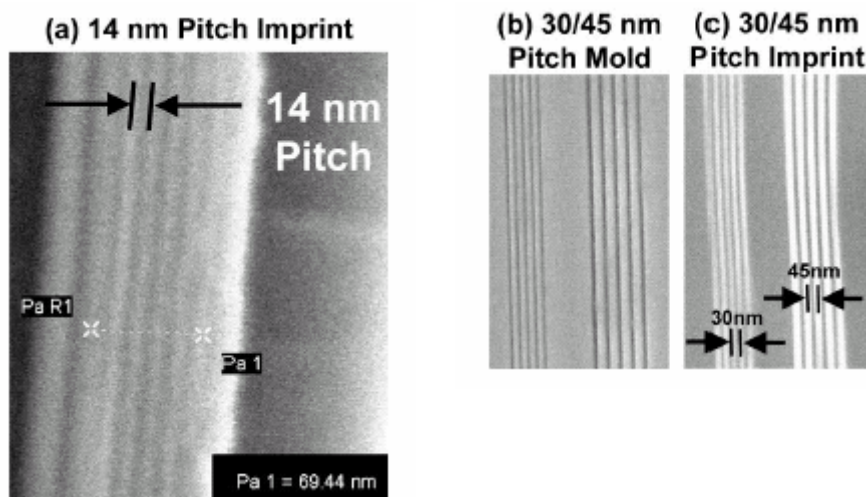
奈米鑄型磁膜的研究需要製程技術及磁特性檢測。基本上，前者的發展已成熟多年，尤其光微影及電子束微影技術在半導體工業使用已久，而後者在近十多年也有長足的進展，舉凡穿隧式電子顯微儀(Transmission Electron Microscopy) [13]、磁光柯爾效應(Magneto-Optical Kerr effect, MOKE) [14]、超導量子干涉儀(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID) [15]、掃描式霍爾探針顯微術(Scanning Hall Probe Microscopy, SHPM) [16]、(Local Hall effect, LHE) [17]、磁阻量測(Magneto-resistance

Measurement) [18-19]、磁力顯微術(Magnetic Force Microscopy, MFM) [20-22]、微磁學模擬(Micromagnetic Simulation) [9]等，都被廣泛的應用在微小鑄型磁膜元件的研究上。

多年來，半導體製程技術的成熟，對鑄型磁膜的研究，提供了一個入門技術。其中，光微影技術可以提供小至次微米尺度的結構製程，兩百奈米以下則需要電子束微影的支援，圖一為本實驗室製作之三十奈米直徑(六十奈米間距)金屬點陣列。而近年來的發展，逼進十奈米或更小的結構製程更已不是難事。只是電子束微影製程有其先天性的困難，也就是低產量(low throughput)的限制。然而，科學界也不斷的克服技術瓶頸，尤其奈米壓印技術的開發已逐漸成熟。圖二是普林斯頓大學電機系的研究群最近發表的4奈米線寬、14奈米間距的壓印成果[23]。當然此技術需要多道繁複的製程，在未來實際的應用面，仍然需要進一步的努力，惟在科技的發展歷程上，可以算是使未來奈米元件製程露出一線曙光。



圖一、本實驗室製作之三十奈米直徑(六十奈米間距)金屬點陣列。



圖二、(a)普林斯頓大學電機系的研究群最近發表 4 奈米線寬、14 奈米間距的壓印成果，(b)(c)分別為壓印版模與壓印成果，間距 30/45 奈米[23]。

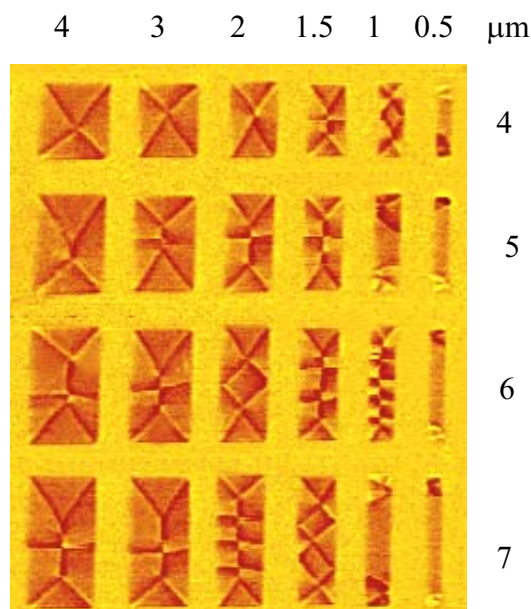
三、磁區結構與磁矩翻轉

不管是從微磁學的角度出發，或是從應用面出發也好，各種不同形狀之鑄型磁膜的研究已經是相當熱門的課題。籠籠總總，在文獻上可以看到的計有：矩形、兩端漸尖形、橢圓形、圓形、環狀形。僅此分別略述如下：

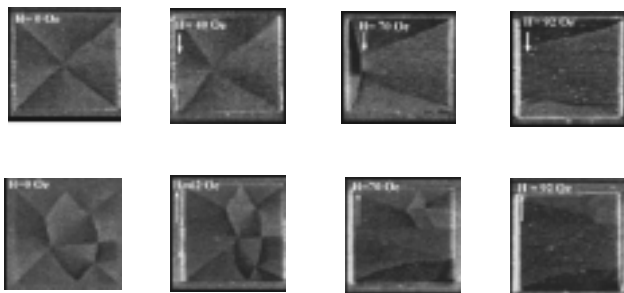
A、矩形

圖三為不同長寬比之矩形陣列在殘磁態下的磁力顯微影像[24]。由磁力影像上可以清楚的看到不同長寬比的矩形，其磁區結構有很大的差異。長寬比值較小者(aspect ratio $\cong 1$)，其磁區結構為所謂的渦旋態(vortex state)，此磁區結構具有較低的漏磁場的特性。長寬比值稍大者($1 < \text{aspect ratio} < 7$)，具有較複雜的磁區結構，其中包含 vortex core 與 cross-tie wall。然而，在長寬比超過 7 的情況下，磁區結構會趨於較簡單的狀態，此結構類似單一磁區狀態(single domain)，但是在兩端仍有一些磁壁存在，即所謂的 Edge domains。然而，磁矩的翻轉行為也是研究的重點之一，圖四為馬理蘭大學電機系研究群在 1999 年第一次利用磁力顯微儀在外加磁場下所得到之動態磁矩的翻轉過程[25]，圖中為 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$ ，厚度為 26 nm 之正方形鎳鐵 (premalloy) 元件。由該系列影像可知，此翻轉過程是不可逆的(irreversible)，且不具有穩定之殘磁態，

這是由於在矩形薄膜中容易產生 Edge domains 的結果。事實上，在高長寬比的元件中，雖然有類似單一磁區的簡單結構，但是仍有 Edge domains 的存在，使得殘磁態仍有些微的差異，也就是所謂的“C”state 與“S”state。也因為如此，其翻轉過程也相當不一致，造成翻轉場有些許的差距[26]。因此，兩端漸尖的形狀則為解決不可逆翻轉的因應形狀。



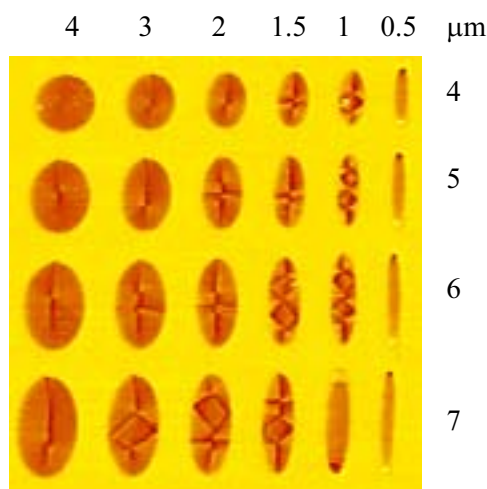
圖三、鎳鐵矩形陣列接近殘磁態時之磁力影像。尺寸如圖中所示，鎳鐵膜厚 43 nm[24]。



圖四、鎳鐵正方形之動態翻轉行為，磁膜尺度為 $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ ，厚度為 $26\ \text{nm}$ [25]。

B、橢圓形

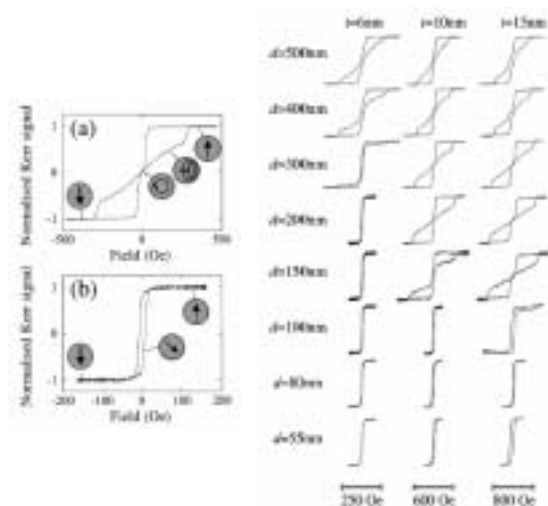
有鑒於在長方形中易產生 Edge domains，改變兩端形狀來降低 Edge domains 的發生率，進而得到一個更接近單一磁區的磁化狀態，鋸形、眼睛形、橢圓形都是被研究的形狀。在此我們討論形狀較為圓滑的橢圓形，在不同的長寬比下其磁區狀態。圖五為不同長寬比之橢圓/圓形陣列在殘磁態下的磁力顯微影像 [24]。與矩形陣列的情形類似，長寬比值較小者 (aspect ratio $\cong 1$)，其磁區結構為渦旋態，此磁區結構具有較低的漏磁場的特性。長寬比值稍大者 ($1 < \text{aspect ratio} < 7$)，仍具有複雜的磁區結構。然而，在長寬比超過 10 的情況下，磁區結構會趨於較簡單的狀態，其結構類似單一磁區狀態 (single domain)，而且在兩端並沒有 Edge domains 出現，這將有助於得到簡單且可逆的翻轉過程，相關的研究仍持續進行當中。



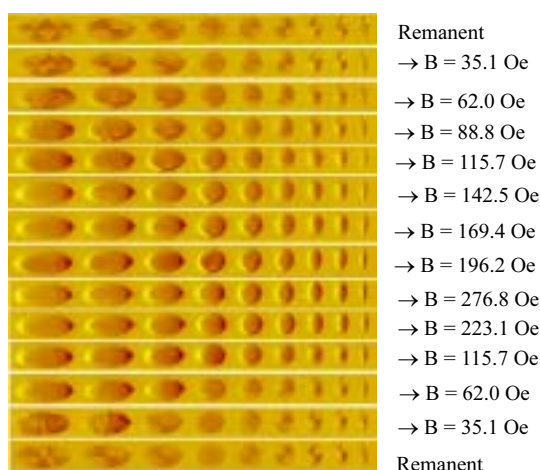
圖五、鎳鐵橢圓/圓形陣列接近殘磁態之磁力影像。長軸變化由 7 至 $0.5\ \mu\text{m}$ ，鎳鐵膜厚 $43\ \text{nm}$ [24]。

加大長寬比為的是要得到簡單且穩定的磁化狀態，同時也造成元件的漏磁場增加，限制了元件製作的密度極限。針對此方面，反而是將形狀做成接近正圓形，使磁化狀態成為渦旋態才能克服漏磁場的問題。然而，R. P. Cowburn 在 1999 年做了一系列尺寸的研究。結果顯示，當直徑在小於 $100\ \text{nm}$ 以下時，由於交換磁能 (Exchange energy) 主宰整個系統的總能量，使得渦旋態無法穩定存在，如圖六所示 [6]。

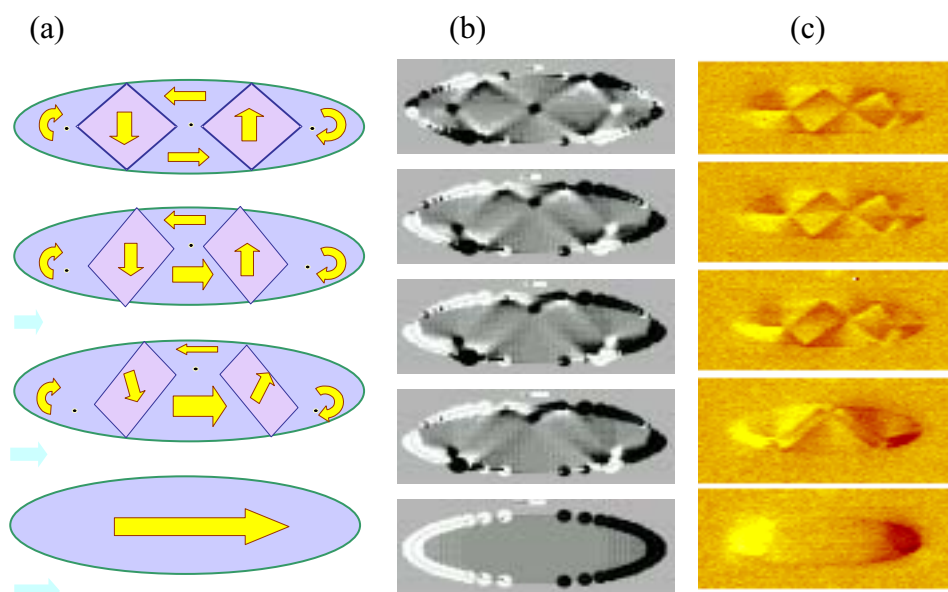
圖七顯示的是橢圓鎳鐵陣列在外加磁場下之一系列磁力顯微圖像，簡單的歸納可以瞭解到：各種磁區變遷、渦旋態之旋向、及反轉磁場等等。圖八則顯示磁區即時變遷之磁力顯微圖像與微磁學模擬的結果比較分析，可以說是具有相當的一致性。



圖六、不同直徑之一系列圓盤的磁滯曲線 [6]。



圖七、單軸為 $3\ \mu\text{m}$ 的橢圓鎳鐵陣列在不同大小的外加磁場下的磁區翻轉行為。外加磁場方向向右，磁場大小如圖右 [24]。



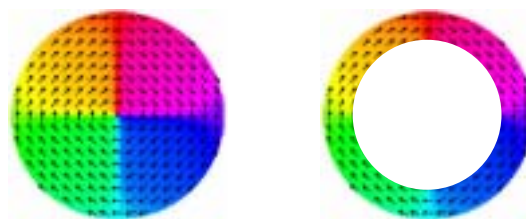
圖八、鎳鐵橢圓即時磁區變遷磁力顯微影像與微磁學模擬結果比較，模擬是由台大物理系張慶瑞教授研究群所主導。此為三渦旋磁區在外加磁場下的磁矩翻轉行為，磁場方向是平行於磁膜的長軸。(a)三漩渦磁區在外加磁場下的磁矩翻轉行為示意圖；(b)理論模擬所得之三漩渦磁區在外加磁場作用下的磁荷分佈；(c)外加磁場方向向右時，磁區翻轉行為的磁力顯微影像[24]。

C、環形

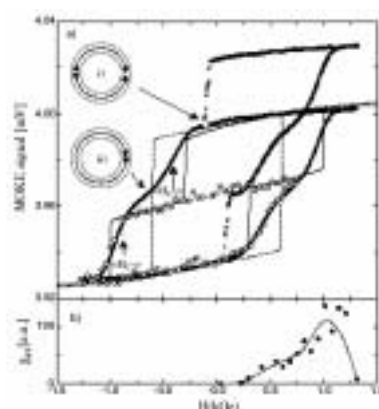
相對其他形狀而言，環形是一個具有對稱性的幾何形狀，其磁區結構保有如在正圓形中出現的渦旋態之優點-低漏磁場，而且可以輕易的保有渦旋態而不致使系統能量過高。這是由於環形即是將圓盤中心部分交換磁能較高的部分移除，如圖九所示。然而，磁性環的穩定態是否就僅有渦旋態呢？在 2001 年，J. Rothman 等人發現其磁滯曲線中有一個明顯的轉折點 (transition)，這表示必定有兩個穩定態[19]。配合微磁學模擬的結果，J. Rothman 宣稱另一個可能出現的狀態是具有兩個磁壁的磁化狀態，如圖十示意圖，因為結構近似洋蔥的橫切面，所以被稱為洋蔥態 (onion state)。另外，好些暫穩態也相繼被發現[9]，簡單的說，渦旋或洋蔥態可以加小渦旋於一端或兩端。圖十一顯示的是磁阻曲線及其磁區結構示意圖，圖中顯示近零磁場時之兩端雙小渦旋暫穩態結構。

在有關環狀鎳鐵膜的研究中，除了瞭解磁區結構的分佈（渦旋或洋蔥態）及其翻轉（渦旋到洋蔥態或洋蔥到渦旋態，或甚至經由暫穩態），對於磁區結構的掌控也是邁向應用的一個主要關鍵。對於此分面的

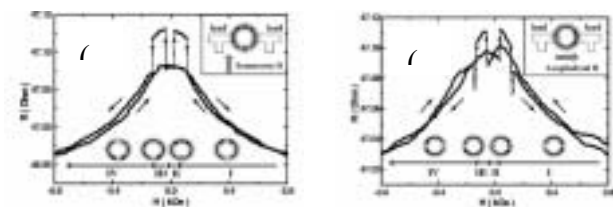
研究，讀者可以參考英國劍橋大學的 J. A. C. Bland 教授研究群的成果。



圖九、在圓盤與圓環中渦旋態的示意圖，箭頭代表磁矩排列方式，顏色表是磁矩之方向。



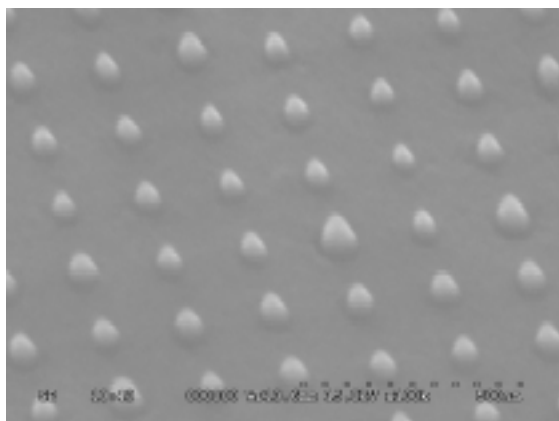
圖十、鎳鐵環狀薄膜之磁滯曲線，發現有一轉折點，表示有兩個穩定態存在[12]。



圖十一、鎳鐵環狀元件之磁阻曲線及其磁區結構示意圖[10]，如插圖所示，依不同的外加磁場方向，可的到不同的磁阻曲線，(a)橫向磁電阻曲線，(b)縱向磁電阻曲線[9]。

四、奈米尺度鑄型結構

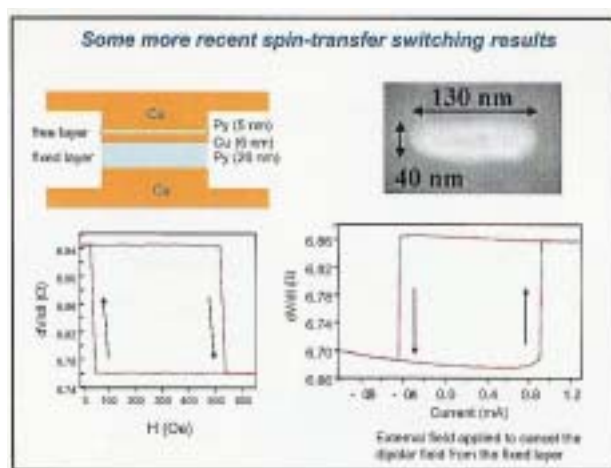
在磁阻式隨機存取記憶體(MRAM)的發展過程中，穿隧式磁性多層膜結構之鑄形元件受到高度的關注，除了更接近實際的應用之外，將其結構縮到奈米尺度，更可以觀察到新穎的物理現象，本實驗室結合電子束微影術及離子束乾式蝕刻，成功的製做出四十奈米左右穿隧磁性多層膜柱陣列，如圖十二所示。進一步配合回蝕刻技術，將可以完成串連上下電極。



圖十二、本實驗室製作之直徑四十奈米左右穿隧磁性多層膜柱陣列。

對於磁記憶體的架構而言，讀寫的機制需要進一步的研究，尤其當尺度越縮越小時，則經由縱橫雙導線提供之正交磁場翻轉方式(X-Y selection)勢必面臨挑戰。近兩年實現之自旋轉移(Spin torque transfer)為一可行之道，藉由流經元件之高密度自旋極化電流以達到自由層翻轉的目的，因此電流的方向決定記憶元的高低阻態，進而達到0/1的數位要求。有關此方面的研究，讀者可參考康乃爾大學研究群的成果。圖

十三為2004年美國物理年會中的最新成果，其薄膜為三層的自旋閥結構(鐵磁/非鐵磁/鐵磁金屬)，製作成 40×130 nm的橢圓形狀，採用電流垂直膜面的量測(CPP)方式。因為元件的尺度以達奈米級，所以可以輕易達到高電流密度的訴求，因此，不但可以外加磁場的方式完成翻轉，也可以藉由高密度自旋極化電流之自旋傳輸現象驅使自由層翻轉。此種機制可以視為一種“寫入”的方式，若可行的話，將可取代現今通用的X-Y selection機制，大大的減低元件製作的複雜度。



圖十三、奈米尺度橢圓多層膜結構之翻轉行為，包括以外加磁場與自旋傳輸現象來達成翻轉。

五、結語

截至目前為止，對於奈米鑄形磁性薄膜的研究發展，雖不至全盤透徹，但顯然已趨於完備。巨磁阻磁頭是一個實際的例子，從發現該物理現象到實現商品化，僅僅十年的時間。相信若要更積極的往應用面發展，無疑是要結合各種專長人力。MRAM的發展蓄勢待發，歐美日等大廠無不卯足全力以赴，相信在近年內將會有傲人的成績。另外，磁感測並結合生醫元件的發展更具有無窮的潛力與商機。因此，奈米鑄型磁性薄膜結構的研發應屬刻不容緩。

致謝

在此感謝經濟部學界科專計畫 Grant No.92-EC-17-A-01-S1-026 與國科會 Grant No.NSC92-2120-M-018-002 計畫的支持。

參考文獻

- [1] R.P. Cowburn, A.O. Adeyeye, and M.E. Welland, Phys.Rev.Lett. **81** 5414 (1998)
- [2] W. H. Rippard et al., Appl. Phys. Lett. **77** 1357 (2000)
- [3] Thomas Schrefl et al., J. Magn. Magn. Mater. **175** 193 (1997)
- [4] M. Hanson, O. Kazakova, P. Blomqvist, R. Wäppling, and B. Nilsson, Phys. Rev. B **66** 144419 (2002)
- [5] J. Aumentado and V. Chandrasekhar, Appl. Phys. Lett. **74** 1898 (1999)
- [6] R.P. Cowburn, D.K. Koltsov, A.O. Adeyeye, M.E. Welland, and D.M. Tricker, Phys. Rev. Lett. **83** 1042 (1999)
- [7] Taras Pokhil, Dian Song, and Janusz Nowak, J. Appl. Phys. **87** 6319 (2000)
- [8] Y. Zheng and J.G. Zhu, J. Appl. Phys. **81** 5471 (1997)
- [9] M. F. Lai, Z. H. Wei, C. R. Chang, J. C. Wu, J. H. Kuo, and J. Y. Lai, Phys. Rev. B **67** 104419 (2003)
- [10] S.P. Li, D. Peyrade, M. Natali, A. Lebib, Y. Chen, U. Ebels, L.D. Buda and K. Ounadjela, Phys. Rev. Lett. **86** 1102 (2001)
- [11] L. Lopez Diaz, M. Kläui, J. Rothman, and J.A.C. Bland, Physica B **306** 211 (2001)
- [12] J. Rothman, M. Kläui, L. Lopez Diaz, C.A.F. Vaz, A. Bleloch, J.A.C. Bland, Z. Cui, and R. Speaks, Phys. Rev. Lett. **86** 1098 (2001)
- [13] Guo Y. et al. Applied Surface Science **218**, 106 (2003)
- [14] M. Kläui, J. Rothman, L. Lopez Diaz, C.A.F. Vaz, J.A.C. Bland and Z. Cui, Appl. Phys. Lett. **78** 3268 (2001)
- [15] M. Kläui, C.A.F. Vaz, J.A.C. Bland, and etc, Appl. Phys. Lett. **84** 951(2004)
- [16] J. Bekaert, D. Buntinx, C. Van Haesendonck, V.V. Moshchalkov, J. De Boeck, G. Borghs and V. Metlushko, Appl. Phys. Lett. **81** 3413 (2002)
- [17] Marcus Steiner and Junsaku Nitta, Appl. Phys. Lett. **84** 939 (2004)
- [18] M. Kläui, C.A.F. Vaz, J.A.C. Bland, W. Wernsdorfer, G. Faini, and E. Cambril, Appl. Phys. Lett. **81** 108 (2002)
- [19] M. Kläui, C.A.F. Vaz, J. Rothman, J.A.C. Bland, W. Wernsdorfer, G. Faini, and E. Cambril, Phys. Rev. Lett. **90** 097202 (2003)
- [20] Xiaobin Zhu, P. Grütter, V. Metlushko, Y. Hao, F.J. Castaño, C.A. Ross, B. Ilic, and H.I. Smith, J. Appl. Phys. **93** 8540 (2003)
- [21] U. Welp, V.K. Vlasko-Vlasov, G.W. Crabtree, J. Hiller, N. Zaluzec, V. Metlushko, and B. Ilic, J. Appl. Phys. **93** 7056 (2003)
- [22] U. Welp, V.K. Vlasko-Vlasov, G.W. Crabtree, J. Hiller, N. Zaluzec, V. Metlushko, and B. Ilic, Phys. Rev. B **68** 054408 (2003)
- [23] Michael D. Austin, and Stephen Y. Chou etc. Appl. Phys. Lett. **86** 5299 (2004)
- [24] W. Z. Hsien, Master thesis, Department of Physics, National Changhua University of Education (2001)
- [25] R. D. Gomez, T. V. Luu, A. O. Pak, and I. D. Mayergoyz etc. J. Appl. Phys. **85** 4598 (1999)
- [26] Youfeng Zheng et al. JAP **81**, 5471 (1997)

作者簡介

張家旗，國立彰化師範大學物理系 專任助理

張怡甄，國立彰化師範大學物理系 專任助理

陳哲勤，國立彰化師範大學物理系 博士班學生

洪連輝，交通大學光電博士，現任國立彰化師範大學物理系教授兼任奈米科技中心主任。

吳仲卿*，美國奧勒岡大學物理學博士，現任國立彰化師範大學物理系教授兼任系主任。

*Email: phjcwu@cc.ncue.edu.tw