

# 產生垂直磁性薄膜之新機制-反鐵磁 / 鐵磁交換耦合

國立彰化師範大學物理系 王柏堯  
國立台灣大學物理系、中央研究院原子分子研究所 林敏聰

## 摘要

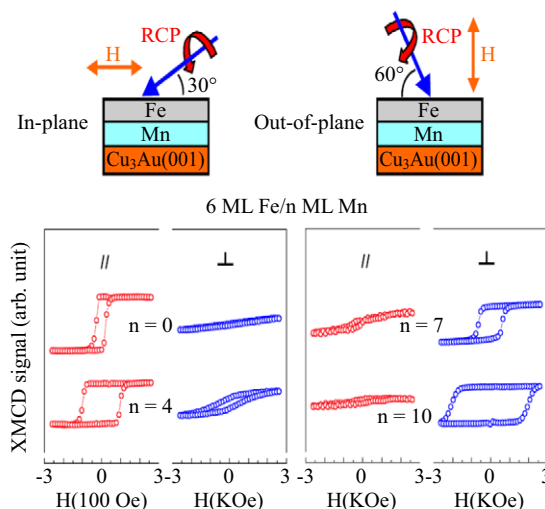
垂直磁性薄膜之開發及利用造就磁性元件之磁儲存容量能於近年內產生重大突破。此外，反鐵磁薄膜亦賦予元件磁性操控之另一自由度。本文除介紹於近年內所發現之反鐵磁薄膜對鐵磁層垂直磁性之操控外，亦探討此現象產生之背後機制。除了使讀者能瞭解此一新現象並深入一窺反鐵磁薄膜之基礎性質外，亦期盼能激發出讀者於相關研究的研究靈感。

## 一、垂直磁性薄膜之重要性

對於許多新穎之磁性元件，像是非揮發性磁性記憶體，若要達到高儲存密度、高熱穩定度、或低能量消耗，有效控制所使用磁性薄膜之垂直磁性是一重要之關鍵 [1]。在目前，垂直磁性一般是透過使用鐵磁 / 貴金屬所組成之多層薄膜，或利用具磁彈性異向性 (Magneto-elastic anisotropy) 之薄膜，分別透過其自旋-軌道角動量於介面或是薄膜內之耦合作用來達成。然而，就目前正發展的新穎磁性元件而言，若欲持續提升元件之磁儲存密度，以這兩種傳統方式來控制垂直磁性卻逐漸面臨了極限[2]。

## 二、反鐵磁性對鐵磁層之耦合行為

事實上，反鐵磁薄膜為操控鐵磁層磁性之一大利器。然由於反鐵磁材料不具巨觀上之磁性行為，因此在過去並未受到人們之重視。直至約半個世紀前，科學家發現當反鐵磁與鐵磁層相接在一起時，反鐵磁層會對鄰近鐵磁層產生耦合行為。除可造成磁滯曲線中矯頑場之增加，使鐵磁層之磁化變得更穩定之外，若進一步透過場冷 (field cooling) 之處理，亦可能會使磁滯曲線產生橫向上的偏移，也就是鐵磁層的磁矩可以被“釘”在某一外場方向，形成了所謂的交換偏耦合 (exchange bias coupling) [3]。上述兩種由反鐵



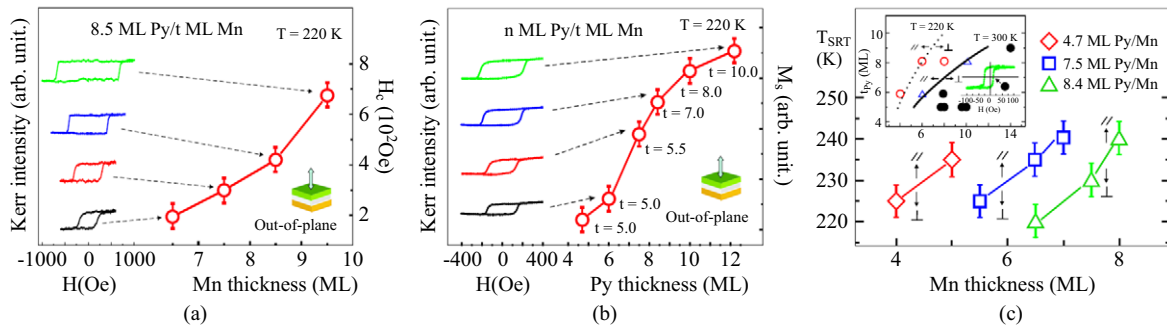
圖二 反鐵磁錳薄膜可使鐵磁層產生垂直於膜面方向上的磁性

磁性所產生之現象已在目前磁性記錄元件之設計與製作中扮演重要之角色。

## 三、反鐵磁層引發之垂直磁性

自 2011 年起，本研究團隊陸續報導了反鐵磁層可透過於介面之交換耦合使鄰近鐵磁層產生垂直膜面方向上之磁性[4]。此外，在 2013 年，透過同步輻射研究所提供之新實驗證據，本團隊更進一步揭開了反鐵磁層產生垂直磁性現象背後之神秘面紗，指出此現象是源自於反鐵磁層於介面上形成的所謂“未釘扎磁矩” (unpinned moments) 所造成[5]。本文將逐一介紹此一有趣現象及其背後產生之機制。

如圖一所示，我們發現具面心立方晶格結構之反鐵磁錳薄膜可使一些鐵磁薄膜 (例如鐵或鎳鐵合金) 產生垂直於膜面方向上的磁性。其垂直磁性之強度取決於鐵磁層與反鐵磁層之種類與厚度。因此，若透過選擇適當之鐵磁層以及鐵磁與反鐵磁層之相對厚度，便可以精準的控制垂直磁性之強弱。

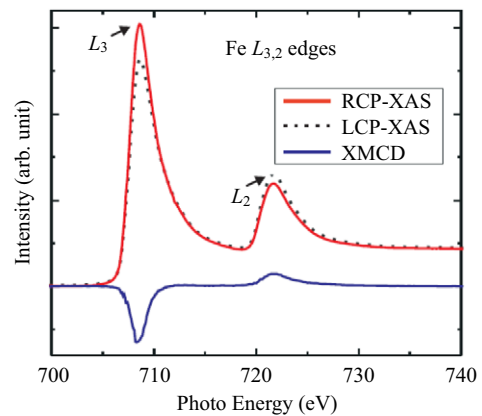


圖二 反鐵磁錳薄膜可以用以精準操控鎳鐵層垂直磁性之矯頑場大小，飽和磁化量，以及垂直磁性之熱穩定度[6]

在圖二中，我們展示出反鐵磁錳薄膜可以用以精準操控鐵磁層垂直磁性中幾個非常重要的因子，例如矯頑場大小，飽和磁化量，以及垂直磁性之熱穩定度[6]。此外，我們更進一步發現若使用原子厚度等級之鐵磁超薄膜作為反鐵磁錳薄膜之緩衝層，可使鐵磁薄膜垂直磁性之熱穩定性產生明顯提升[7]。此現象之背後機制是源自鐵磁-反鐵磁之間產生所謂的磁性鄰近效應 (Magnetic Proximity Effects)。透過此鄰近效應之幫助，所加入之磁性緩衝層可使錳薄膜的反鐵磁有序溫度明顯提升，因此可進一步增強反鐵磁層所引發之垂直磁性。以上所述展現出反鐵磁層對於垂直磁性優異之操控能力。此種方式特別適合於軟磁區間內之垂直磁性控制，也因此可以提供未來垂直磁性元件設計與控制上之新思維。

#### 四、反鐵磁性微觀上之理解

近幾年的相關研究顯示出有兩種特徵之反鐵磁磁矩可能存在於鐵磁-反鐵磁系統中。第一類磁矩是所謂的未釘扎磁矩。此類磁矩位於鐵磁-反鐵磁之介面上，且彼此自旋未相互抵銷完全。因未釘扎磁矩之長程有序行為主由鐵磁層之鐵磁性所引發，因此其磁化量會隨鐵磁層磁矩及外加磁場一同翻轉。過去研究曾報導未釘扎磁矩與鐵磁層之矯頑場增加現象有密切之相關性[5]。另一類磁矩為所謂的釘扎磁矩(pinned moments)。此類釘扎磁矩並不會隨外加磁場或鐵磁層磁矩一同翻轉。若此釘扎磁矩彼此自旋非完全抵銷，則會形成具特殊方向性之淨磁矩。有研究中顯示此類非完全抵銷之釘扎磁矩出現於距鐵磁-反鐵磁介面之較深處，並與鐵磁-反鐵磁系



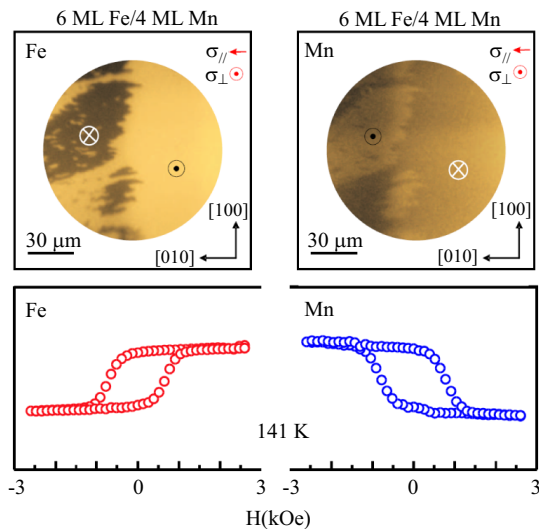
圖三 鐵薄膜之 X-ray 吸收光譜及磁圓偏振二性差譜

統中交換偏耦合之形成有密切之關係[5]。

如前面引言所提，雖過去幾年之研究對於反鐵磁薄膜引發之垂直磁性現象已經有一定程度之瞭解，但對其微觀上的機制仍然不清楚。為了挖掘此現象背後重要且有趣的物理，本團隊利用國家同步輻射中心之 x-ray 光電子顯微鏡 (X-PEEM) 與磁圓偏振二向性 (XMCD) 對此一現象進行更深入之研究。

#### 五、光電子顯微鏡與磁圓偏振二向性

光電子顯微鏡之磁性顯影與磁圓偏振二向性之產生皆本於材料內電子之 X-ray 吸收過程。已知當入射一束 X-ray 至待測樣品，若選取適當之能量，便可把處於較低能階之核層電子激發至費米能階以上之空軌域，引發所謂的 X-ray 吸收。當連續調變入射光之能量，便可以量測到如圖三所示之 X-ray 吸收光譜。因不同元素具有不



圖四 (上圖) 光電子顯微鏡對於鐵 / 錳薄膜之磁性顯影及 (下圖) 透過磁圓偏振二向性所得到之磁滯曲線

同之電子躍遷能量，透過選取適當之 X-ray 能量，便可探測不同元素之電子結構。因此提供樣品中各元素之電子結構資訊。然對於一磁性材料而言，費米能階以上空態之自旋分佈並非對稱。因此，若入射之 X-ray 具圓偏振，由於量子力學中偶極矩選擇率(dipole selection rule)之規範，圓偏振 X-ray 吸收之強度會與費米能階上空軌域之自旋分佈有關。換句話來說，當空態上產生自旋極化，也就是樣品具有磁性，左旋偏振光之吸收光譜會與右旋偏振光之吸收光譜產生差異。其差譜即為所謂的磁圓偏振二向性（如圖三下），並最大之差值會出現在  $L_3$  或  $L_2$  吸收邊。在此條件下，可將因 X-ray 激發而產生之低能量光電子透過光電子顯微鏡加以聚焦成像，得到樣品之磁性顯影，或改變外加磁場並觀察磁圓偏振二向性差譜來得到磁滯曲線。若進一步將磁圓偏振二向性差譜透過 sum-rules 進行分析[8]，便可得到磁性樣品元素之軌道磁矩與自旋磁矩。在本研究中，這些資訊可以幫助我們釐清反鐵磁層引發垂直磁性之起源。

## 六、具垂直磁晶異向性之錳未釘扎磁矩

如圖四所示，透過具元素解析的光電子顯微鏡以及磁滯曲線測量，我們發現除了鐵具有鐵磁性之外，本應為反鐵磁性之錳亦出現微弱之鐵磁性訊號。此發現指出錳於介面上形成前述所謂未

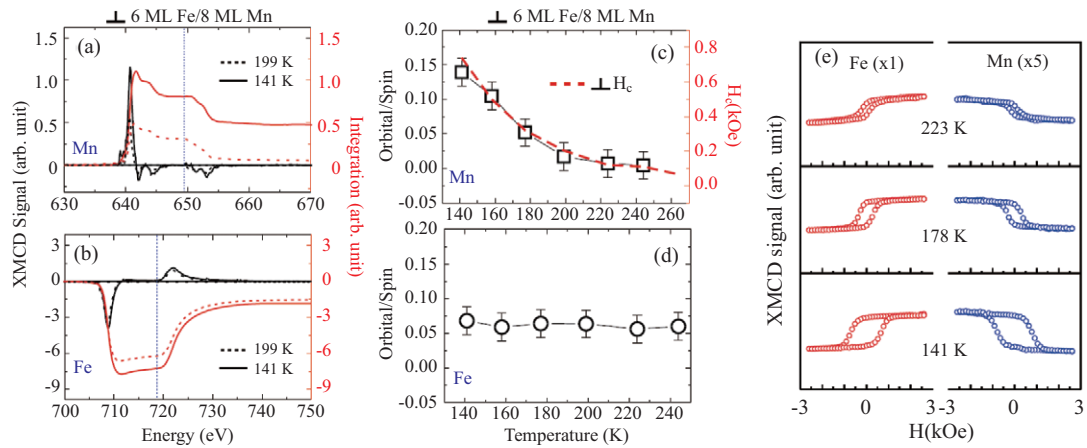
釘扎磁矩。此外，因錳與鐵之磁滯曲線組態剛好反向，亦知錳之未釘扎磁矩與鐵之磁矩形成反平行之耦合。因本研究所探討之一系列反鐵磁層引發垂直磁性行為並未伴隨交換偏耦合之出現而產生，此垂直磁性之產生可能與錳薄膜之釘扎磁矩無關，並與未釘扎磁矩較為相關。

如前文所提，薄膜之垂直磁性一般是源自於晶格結構，並透過在空間中不對稱之自旋-軌道角動量耦合所產生。因此當垂直於膜面方向的軌道磁矩遠大於平行膜面方向的軌道磁矩時，磁性薄膜就會產生垂直磁性。透過簡單的計算，可得出對於一個具有強垂直磁晶異向性之薄膜，薄膜的軌道磁矩會正比於垂直磁晶異向能。此外，磁矩之軌道 / 自旋比會正比於磁滯曲線之矯頑場[5]。因此，可以利用磁矩之軌道 / 自旋比是否正比於矯頑場之關係來推斷究竟垂直磁性是源自於何種元素之磁晶異向性。圖五顯示了一系列鐵與錳的磁圓偏振二向性差譜以及磁滯曲線隨溫度的變化。透過 sum-rules 對光譜進行分析，我們發現鐵磁矩之軌道 / 自旋比幾乎不隨著溫度變化。然而錳磁矩之軌道 / 自旋比隨溫度降低卻有非常明顯的增加趨勢。有趣的是，此趨勢是與磁滯曲線之矯頑場隨溫度變化幾乎是一致。因此可斷定此系統之垂直磁性確源自於錳層中之未釘扎磁矩。這些未釘扎磁矩在低溫下產生增強之垂直磁晶異向性，並透過與鐵磁層在介面上之交換耦合，使鐵磁層產生垂直異向性。

## 七、結語

透過具有元素解析特性之 X-ray 磁性顯影及磁圓偏振二向性差譜，我們從基礎物理研究的觀點深入的瞭解到鐵磁層之垂直磁性可由反鐵磁層在介面上所謂的非釘扎磁矩來引發。這些非釘扎磁矩因具有承襲自反鐵磁晶格而來的垂直磁晶異向性，也因此可以將鄰近鐵磁層透過交換耦合而轉至垂直於膜面之方向。此研究使得人們對於反鐵磁層與鄰近鐵磁層作用之理解，由原先已知之磁滯曲線矯頑場增加與交換偏耦合之產生，拓展至可使得鄰近鐵磁層產生垂直磁性。這些重要的發現，以及對於反鐵磁矩理解上的突破，提供了未來設計新穎磁性元件之基石。

我們由衷感謝在此一系列研究中[4-7]所有共同作者之鼎力協助以及科技部之補助。



圖五 鐵 / 錳薄膜於不同溫度下之磁圓偏振二向性差譜、磁矩之軌道 / 自旋比、與磁滯曲線[5]。

### 參考資料

- [1] S. Mangin, D. Ravelosona, J. A. Katine, M. J. Carey, B. D. Terris and E. E. Fullerton, *Nature Materials*, **5**, 210 (2006).
- [2] K. Yakushiji, T. Saruya, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, S. Yuasa and K. Ando, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 232508 (2010).
- [3] J. Nogués and I. K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.*, **192**, 203(1999).
- [4] B.-Y. Wang, N.-Y. Jih, W.-C. Lin, C.-H. Chuang, P.-J. Hsu, C.-W. Peng, Y.-C. Yeh, Y.-L. Chan, W.-C. Chiang, D.-H. Wei and M.-T. Lin, *Phys. Rev. B*, **83**, 104417 (2011).
- [5] B.-Y. Wang, J.-Y. Hong, K.-H. Ou Yang, Y.-L. Chan, D.-H. Wei, H.-J. Lin and M.-T. Lin, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 117203 (2013).
- [6] N.-Y. Jih, Bo-Yao Wang, Y.-L. Chan, D.-H. Wei and M.-T. Lin, *Applied Physics Express*, **5**, 063008 (2012).
- [7] B.-Y. Wang, C.-C. Chiu, W.-C. Lin and M.-T. Lin, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 042407 (2013).
- [8] C.-T. Chen, Y. U. Idzerda, H.-J. Lin, N.V. Smith, G. Meigs, E. Chaban, G. H. Ho, E. Pellegrin and F. Sette, *Phys. Rev.Lett.*, **75**, 152 (1995).