

93 年 7 月

表面磁光科爾效應系統與 Co/Ir(111)之磁性研究

蘇書玄* 李彥龍* 蔡志申†

摘 要

表面磁光科爾效應其磁性解析可達一原子層，將其配置於超高真空系統，可成研究奈米級磁性超薄膜之利器。本文將介紹表面磁光科爾效應原理，並對 Co/Ir(111)薄膜在奈米尺度厚度下隨著厚度增加，其磁化曲線之變化作深入探討。

關鍵詞：表面磁光科爾效應、奈米級薄膜、超高真空系統、磁性性質、磁性紀錄材料。

一、前 言

「磁性薄膜」近年來由於應用性高，廣受工業界及學術界矚目。在奈米科技蓬勃發展下，奈米級磁性薄膜的研究更是目前學術界炙手可熱的研究主題。原因是由於磁性薄膜表現出許多與塊材所不同的特性，且自 1989 年以來許多研究發現在 Co/Pt[1]、Co/Pd[1]、Co/Au[2]、Co/Cu[3] 和 Fe/Ag[4]...等多層膜，具有垂直方向的磁異向性(perpendicular magnetic anisotropy, PMA)，由於垂直異向性物質之單位面積上位元密度是水平異向性物質的十倍以上，因而使這些組成了高密度磁光紀錄材料的很好選擇。而工業界上也將此磁性薄膜的特性應用在電腦記憶方面的資料儲存與讀寫，例如：硬碟、CD-RW 等，因此最受矚目的高密度磁光記憶材料之研究，更成為資訊尖端科技時代的重點。

本實驗室研究主題在建立超高真空系統(UHV)以及自製磁光科爾效應儀(magneto-optical kerr effect, MOKE)、表面磁光科爾效應量度系統(surface magneto-optical kerr effect, SMOKE)。以所建立之磁光科爾效應儀進行 10 nm 鐵薄膜($Al_2O_3 \setminus V \setminus Fe \setminus V$)的表面磁性量度。而在超高真空中的實驗，基於 Co 薄膜在許多基材上具有垂直異向性可用於高密

* 東海大學物理系

† 中正大學物理系

度磁光記憶材料上，著手查閱與 Co 相關的磁性研究，結果發現 Co(12 Å)/Ir(16 Å) 多層膜蒸鍍在 MgO 基材上，具有很強的單軸異向性[5]，以及 Co(t Å)/Ir(24 Å) 多層膜在薄膜厚度較薄時，具有垂直方向的磁異向性，當薄膜長至臨界厚度($t=12 \text{ Å}$)後，具有平行樣品表面方向的磁異向性[6]。在我們所查閱與 Co/Ir 相關僅為多層膜的研究中，可知 Co/Ir 實具有其磁性研究的價值，雖然 Co/Ir 多層膜之磁性研究已發展了一段時間，但是從事不同厚度的 Co 超薄膜與 Ir(111)單晶間界面的磁性研究卻很少，因此針對本實驗室儀器系統的特性，可對不同厚度的 Co 超薄膜長在 Ir(111)基材間的界面，進行磁性研究與分析，如此所得之 Co/Ir 界面性質訊息，將可對多層膜系統之物性有更深入的認識，並藉由單一原子層磊晶成長方式，我們更可以在界面形成過程中，探究物性之變化，進而控制界面品質與其物理特性。

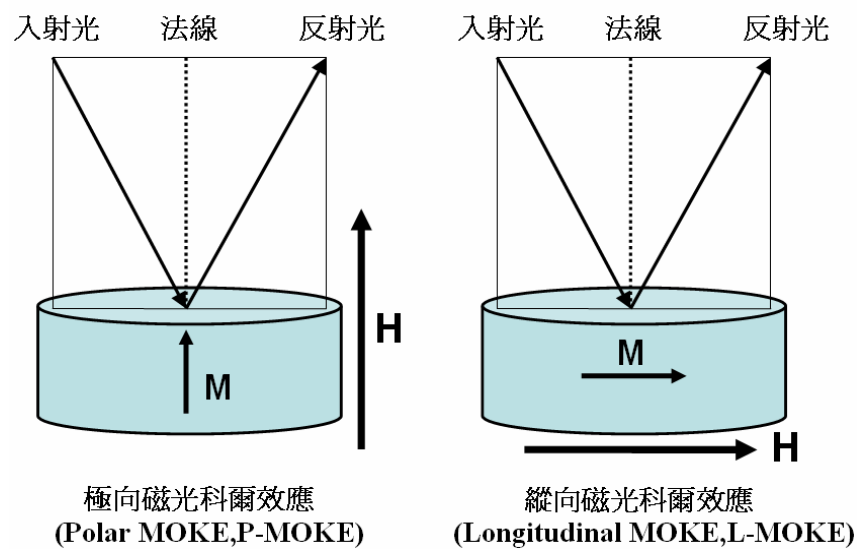
二、歷史發展與簡介

在 1845 年，麥可法拉第(Michael Faraday)首先發現了磁光效應 [7]，他當時發現外加磁場在玻璃樣品上時，傳輸光的偏極面發生旋轉的效應，隨後在金屬表面上做光反射的實驗，然而他所得到的結果不準確，因為金屬表面並不够平整，32 年後，在 1877 年科爾(John Kerr)在觀察偏極光從磨光的電磁鐵磁極反射出來時，發現了磁光科爾效應 [8, 9]。直到 1985 年，E.R. Moog 和 S.D. Bader 兩位學者提出 SMOKE 來作為 surface magneto-optic Kerr effect 的代號來表示應用磁光科爾效應在表面磁學上的研究 [10]，第一個表面磁光科爾效應研究系統是鐵超薄膜磊晶成長在金單晶(100)面上的實驗 [11]，此研究並促成了表面磁光科爾效應成為表面磁學重要的研究方法。在國家科學委員會的長期支持下，東海大學物理系之奈米磁學實驗室歷經多年的努力投入大量研究經費及人力，建立超高真空表面磁光科爾效應量度系統，並成功以此所建立之表面磁光科爾效應系統量測到奈米級鐵磁性薄膜之磁化曲線。以下將介紹表面磁光科爾效應儀器之原理、儀器裝置及奈米級薄膜樣品之磁性量度。

三、磁光科爾效應原理及儀器配置

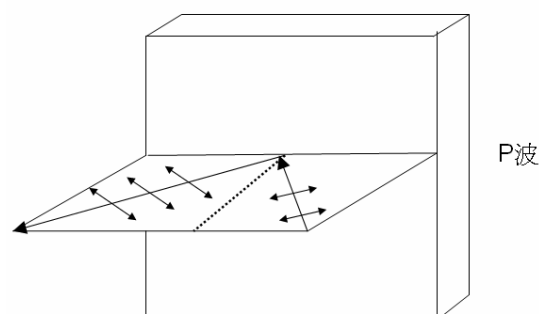
磁光科爾效應為線偏振光入射於磁性材料，反射後轉變為橢圓偏振光的現象。此橢圓偏振光的長軸與原線偏振光的夾角 θ_K 稱之為柯爾旋轉角，橢圓偏振光的橢圓率 ϵ_K 稱之為科爾

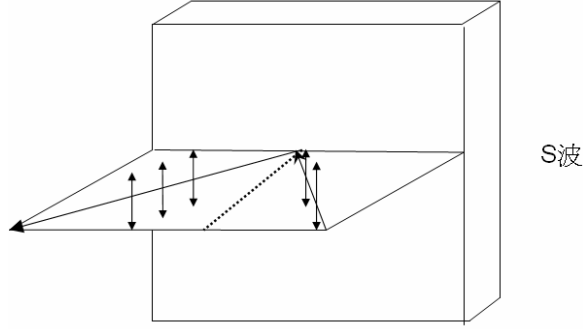
橢圓率。一般來說， θ_K 和 ε_K 皆很小($\ll 1^\circ$)，且與磁性物質的磁化大小 M 成正比，因此量測 θ_K 或 ε_K 隨外加磁場改變的情形，便可以反應出磁性物質的磁化曲線。在實驗上，我們通常都以量測極向磁光科爾效應(polar MOKE)和縱向磁光科爾效應(longitudinal MOKE)訊號來了解薄膜的各種磁性性質。如圖一所示，極向磁光科爾效應是指磁化強度 M 垂直於樣品表面時的效應，也就是外加磁場的方向垂直於樣品；而縱向磁光科爾效應是指磁化強度 M 平行於樣品表面時的效應，也就是外加磁場的方向平行於樣品。



圖一 極向磁光科爾效應和縱向磁光科爾效應形態示意圖

磁光科爾效應依據入射光偏振方向可分為 P mode 及 S mode 兩種。P mode 是指入射光的偏振方向和光入射平面平行，而 S mode 則是指入射光的偏振方向和光入射平面垂直，如圖二所示。





圖二 線偏振光的 P 及 S mode 示意圖

由 Bader 等人有關的表面磁光科爾效應理論 [10]，得知科爾旋轉角 θ_K 及科爾橢圓率 ε_K 正比於樣品的磁化強度 M ，當選定入射光為 P 波狀況下，反射光的 P 波及 S 波電場分量與 θ_K 及 ε_K 有以下的關係式：

$$\frac{E_S}{E_P} = \theta_K + i\varepsilon_K$$

E_P 為 P 波電場分量， E_S 為 S 波電場分量，因此只要量測 $\frac{E_S}{E_P}$ 便可以得到科爾訊號。定義檢偏器轉至平行 S 波方向時的角度為 0° ，然後調整一個小角度 δ ($\delta \approx 0^\circ$)，此時反射光的強度 I 可以用下式表示：

$$I = |E_P \sin \delta + E_S \cos \delta|^2$$

由於科爾旋轉角很小，因此反射光在 S 波方向的分量遠小於在 P 波方向的分量，所以 $E_S \ll E_P$ ，則：

$$I \approx E_P^2 |\delta + \theta_K + i\varepsilon_K|^2 \approx |E_P|^2 (\delta^2 + 2\delta\theta_K)$$

原入射光之強度 I_0 可表示為：

$$I_0 = E_P^2 \sin^2 \delta = E_P^2 \delta^2$$

則原式可寫成：

$$I = I_0 \left(1 + \frac{2\theta_K}{\delta} \right)$$

因此反射光的強度變化 ΔI ：

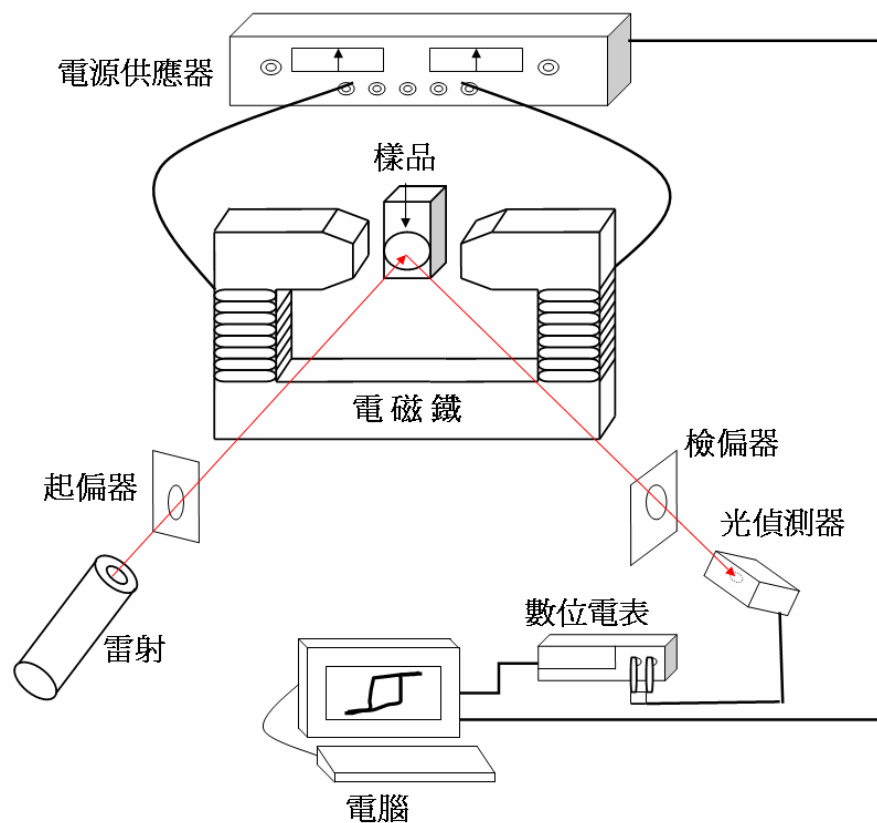
$$\Delta I = I - I_0 = I_0 \left(\frac{2\theta_K}{\delta} \right)$$

最後得：

$$\therefore \theta_K = \left(\frac{\delta}{2} \right) \left(\frac{\Delta I}{I_0} \right)$$

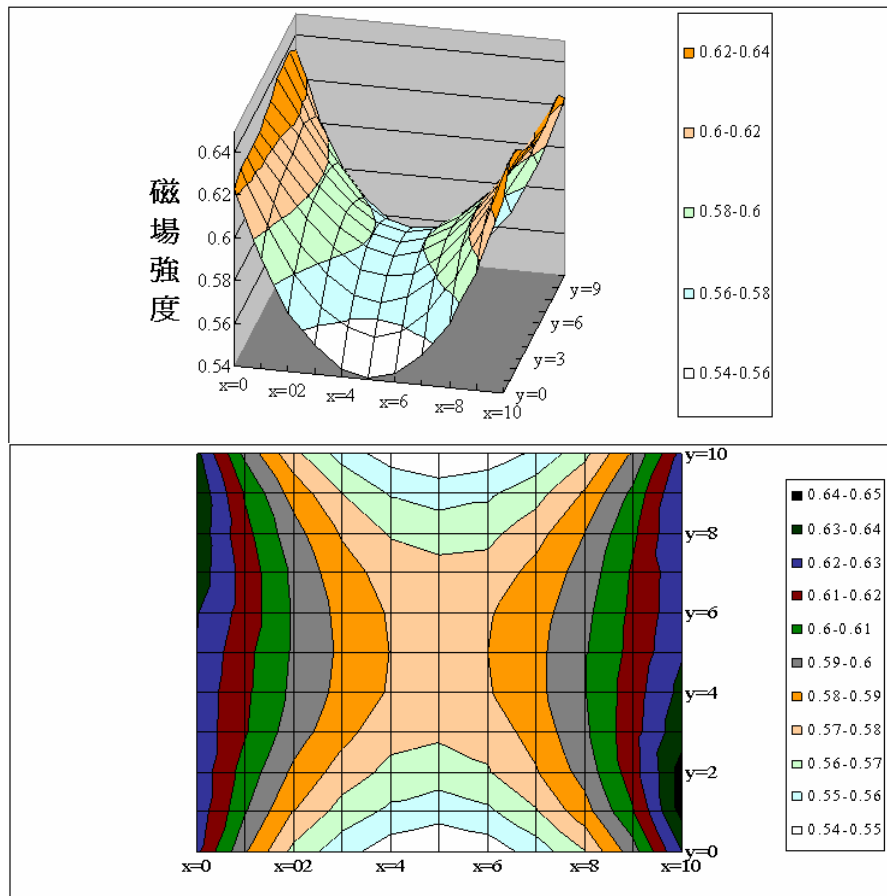
由此可知科爾旋轉角 θ_K 正比於反射光的強度變化 ΔI ，所以我們以反射光的強度變化來代表科爾旋轉角度的變化，並將 ΔI 與外加磁場作圖，便可得磁滯曲線。

磁光科爾效應量度系統包含了雷射、起偏器、檢偏器、電磁鐵、光偵測器、可程式數位電表和可程式電源供應器，儀器架設如圖三所示。首先將雷射光源調整為 P 波以 45° 角入射樣品，通過高消光比的 Glan-Thompson 起偏器(或稱為偏振器)，以過濾剩餘 S 波，再經由樣品反射，通過 Glan-Thompson 檢偏器(或稱為偏振器)，過濾 P 波，最後由光偵測器接收訊號，將訊號轉換成光電流後，並以內建之放大器將光電流訊號放大後，輸出至數位電表，再由數位電表將光電流訊號轉換成電壓值，藉由 IEEE488 介面卡輸入至個人電腦，經由電腦語言程式輔助處理成所需要的數據或圖表。實驗中樣品所需之外加磁場，是由電腦控制電源供應器之輸出電流予電磁鐵所產生的。



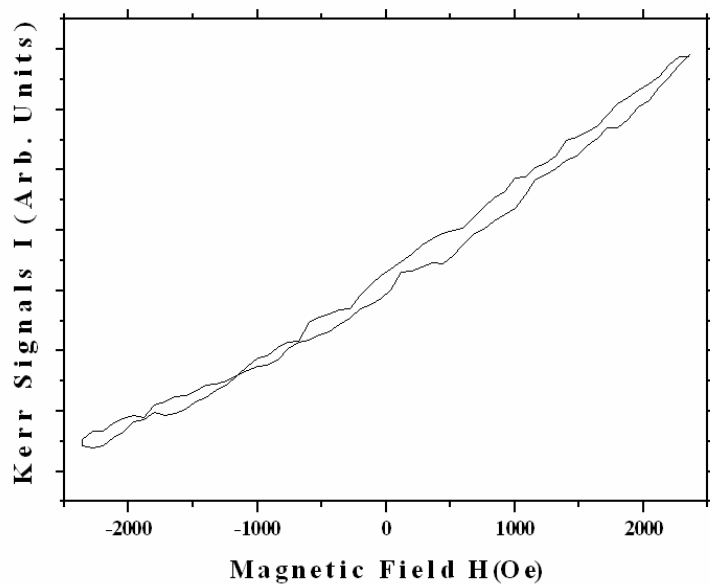
圖三 磁光科爾效應儀之儀器架設圖

由於一般樣品大小約為 1 平方公分左右，而雷射光點大小約為 1 平方公厘，因此電磁鐵在量測樣品時，附近須能產生一均勻的磁場以降低量測之困難度與誤差。在本實驗室此系統中，我們將自製電磁鐵通上 0.5 A 且利用高斯計去量測，可得到電磁鐵磁場強度空間分布，如圖四所示。由圖四中可知道電磁鐵的兩端磁場分布是均勻的，而實驗時樣品也位於電磁鐵的兩端磁場分布空間的中央位置，因此降低實驗的誤差。



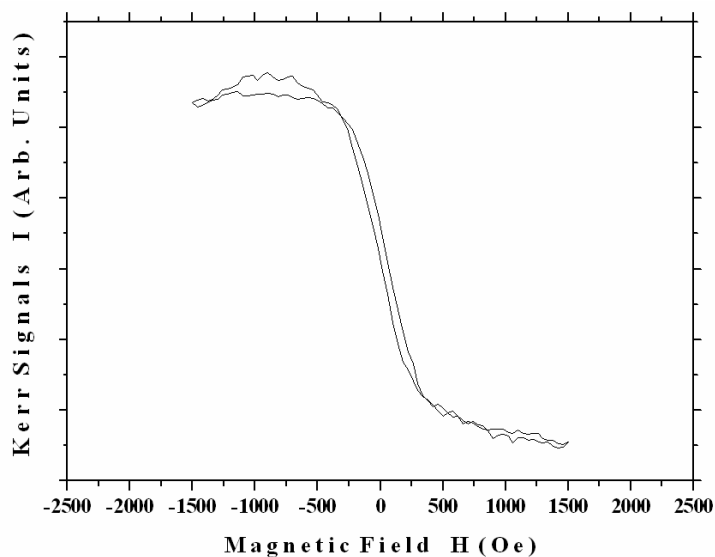
圖四 電流為 0.5A 之電磁鐵磁場強度空間分布圖

而我們以鍍在氧化鋁上 10 nm 鐵($Al_2O_3 \setminus V \setminus Fe \setminus V$)為樣品，在提供 2300 Oe 的垂直樣品面的外加磁場下，測得其磁化曲線，如圖五所示。由圖五中可知道外加磁場垂直樣品面的方向，為難磁化的方向，也就是磁壁必須要獲得較高的能量，才能完全位移或旋轉成單一磁域結構的飽和狀態。



圖五 鐵塊材之極向磁光科爾效應圖

而進一步以 L-MOKE 對平行於樣品面的磁化情形進行量測，在提供樣品面上方向 1500 Oe 的外加磁場，量得其磁化曲線。由圖六中可看到磁化曲線在室溫下外加磁場約 300 Oe 時達飽和，且有顯著的殘磁量，足見磁壁可以容易的位移或旋轉至此時的磁化方向，而形成單一磁域的飽和狀態。另外使此時樣品殘磁量降為零的矯頑力值約為 30 Oe，因此可判定樣品鐵(Fe)薄膜的易磁化軸應是平行於樣品表面的方向(in-plane)。



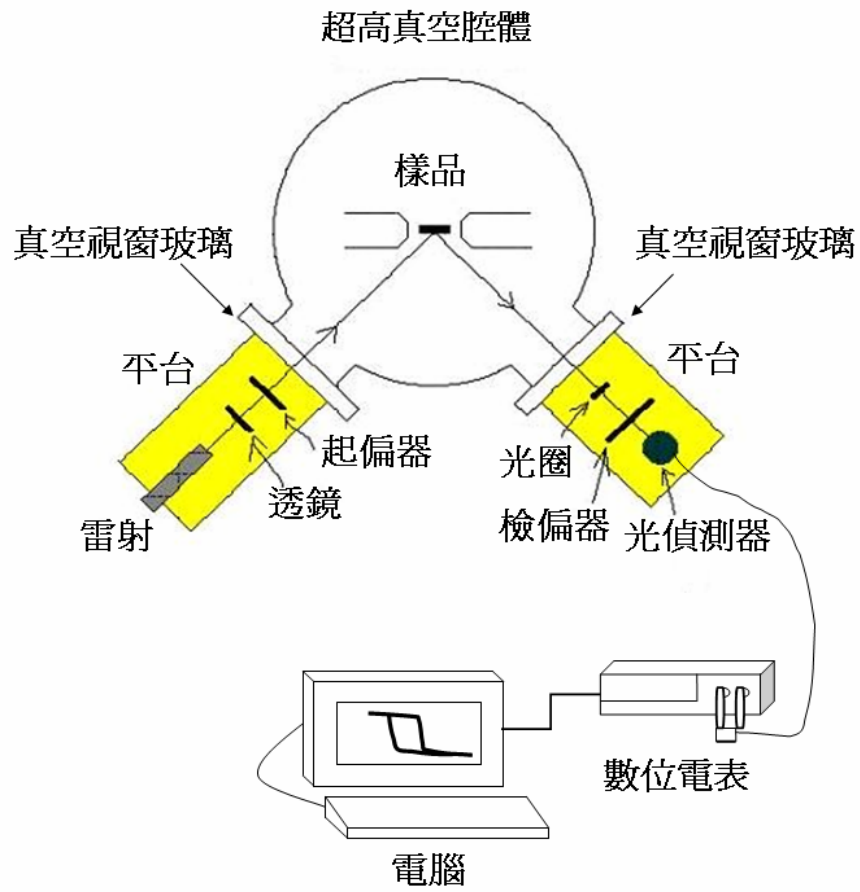
圖六 鐵塊材之縱向磁光科爾效應圖

四、表面磁光科爾效應量度系統的建立與量測

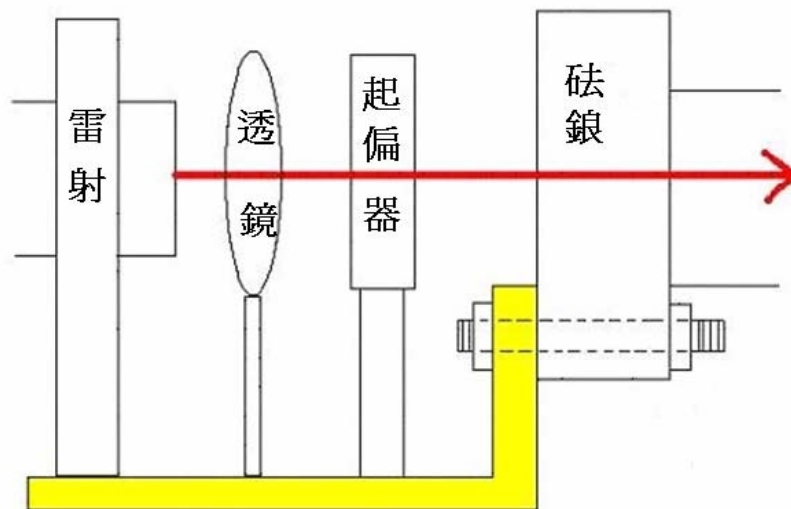
4.1 表面磁光科爾效應量度系統介紹

使用磁光科爾效應的原理來研究樣品表面或是在薄膜厚度僅為數原子層厚之超薄膜的磁性特性，稱為表面磁光科爾效應。而表面磁光科爾效應量度系統，則將磁光科爾效應儀的所有元件裝設在超高真空系統上，應用超高真空系統成長鐵磁性材料薄膜於基材上，再以磁光科爾效應儀量測鐵磁性薄膜的表面磁性行為。

表面磁光科爾效應量度系統架設圖如圖七所示。在超高真空系統之真空度維持部份，本實驗室使用機械幫浦、渦輪分子幫浦、鈦昇華幫浦和離子幫浦將真空腔內的壓力維持於 3×10^{-10} torr。在真空腔體外上裝有(1)離子鎗：用於清潔樣品表面。(2)蒸鍍鎗：用於蒸鍍磁性薄膜，而本實驗室系統所蒸鍍磁性樣品為鈷(cobalt)。(3)質譜儀：可監測及分析真空腔體內雜質的成分。(4)歐傑電子能譜分析儀：分析樣品表面元素組成、成分比例、厚度和成長模式。(5)磁光科爾效應儀的雷射、起偏器、檢偏器與光偵測器元件。在真空腔體內裝有(1)離子真空計：用來量測真空腔體內的壓力(2)樣品座：樣品座上裝有基材的樣品，而本實驗室系統的基材為銱(iridium)。(3)磁光科爾效應儀的電磁鐵。必須注意的是超高真空與大氣中的磁光科爾效應量測差異於由於樣品侷限於超高真空中，因此雷射光路徑上除了原有的光學元件外，多了兩片真空視窗玻璃(如圖八所示)，因此在做實驗前，務必先調整雷射光路徑，才不至於讓真空視窗玻璃的反射與折射效應干擾數據量測。



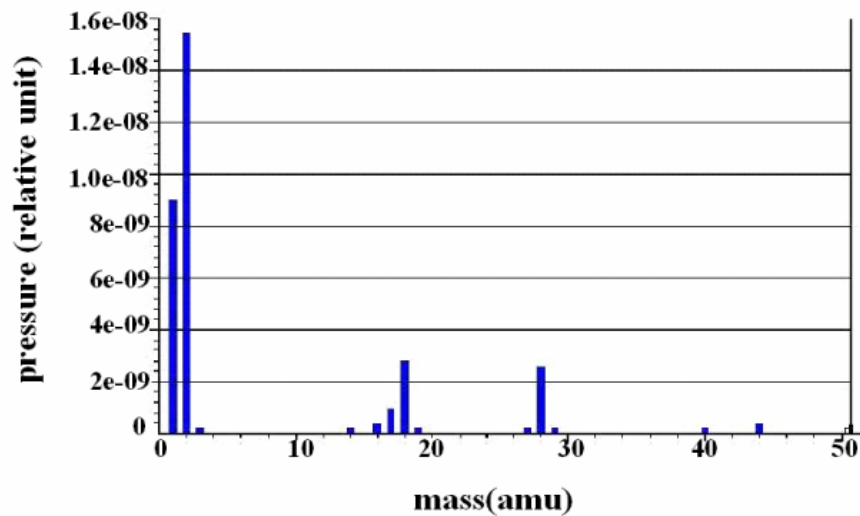
圖七 表面磁光科爾效應量度系統裝設示意圖



圖八 雷射光路徑圖

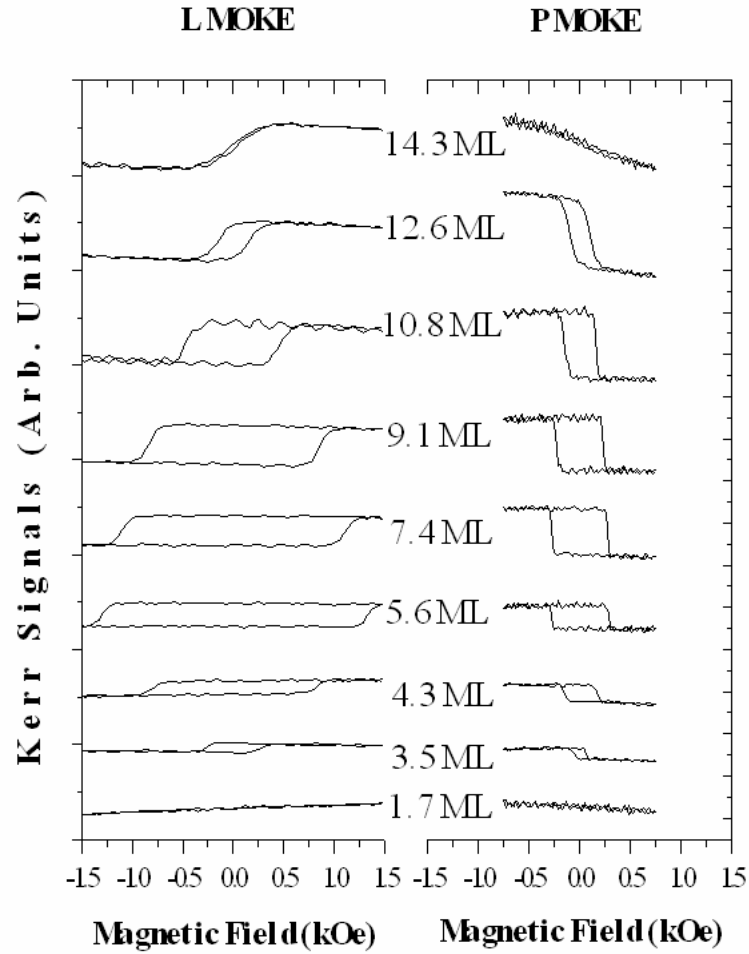
4.2 Co/Ir(111)超薄膜磁性特性

在實驗前，必須先確定真空腔體內的壓力在良好狀態，也就是殘餘氣體量不能太大，因此我們可利用質譜儀來監測真空腔體內殘餘氣體的成分。圖九為以離子真空計測量知壓力為 5×10^{-10} torr 時，質譜儀分析所得真空腔體中殘餘氣體成分及含量圖。由圖八中可看到殘餘氣體主要為 H_2 、 H_2O 和 CO 以及微量的 Ar 及 CO_2 。



圖九 壓力為 5×10^{-10} torr 下超高真空腔內殘餘氣體的質譜儀分析圖

在本實驗室所研究的磁性系統是在銱(111)基材上蒸鍍鈷薄膜，量測其磁化曲線圖。隨著鈷膜厚度的增加，圖十為不同厚度的 Co/Ir(111)，其縱向磁光科爾效應及極向磁光科爾效應的磁化曲線之變化情形。從圖中可以看出在 Co 薄膜厚度 3.5 原子層(monolayer,ML)時縱向磁化曲線及極向磁化曲線皆開始出現磁滯現象，直到厚度增加為 12.6 ML 縱向磁化曲線矯頑力都較極向磁化曲線大上數倍。當 Co 薄膜厚度達 5.6 ML 後，縱向與極向磁化曲線開始出現變化，兩方向矯頑力逐漸遞減。當厚度達 14.3 ML 時，極向磁滯現象已完全消失，僅剩下縱向磁化曲線依然有磁滯現象。



圖十 不同厚度的 Co 薄膜在 Ir(111)基底上成長的縱向及極向磁光科爾效應的磁化曲線變化圖

我們利用磁異向性來討論此實驗結果。磁異向性有三種：磁晶異向性 $K_{crystal}$ 、磁彈異向性 K_{me} 與外型異向性 K_{shape} 。當薄膜厚度較薄時，樣品的表面及介面效應顯著，由於自旋-軌道耦合，使自生磁化方向會沿著晶軸方向，所以產生了磁晶異向性 $K_{crystal}$ ，以及因為 Co、Ir 的晶格參數的不同，Co 在 Ir 表面成長可能為非同調性(incoherent)的磊晶成長，產生了磁彈異向性 K_{me} ，這兩種因素是造成易軸方向為非平行於樣品表面的原因。當薄膜厚度逐漸增厚時，磁晶異向性與磁彈異向性的影響逐漸減弱，相反地，因受到樣品外型逐漸增厚的影響，磁偶極矩間的交互作用亦逐漸增強，產生了外型異向性 K_{shape} ，此異向性為使易軸在平行樣

品表面方向的主因，所以當 Co 薄膜較厚時(5.6 ML)，易磁化方向會逐漸轉向於平行樣品表面。

由多層膜研究可知 $(Co/Ir)_n$ 的表面磁異向能 $K = K_v + \frac{2K_s}{t}$ [12]， K_v 為塊材貢獻之單位體積磁異向能， K_s 為介面或表面貢獻之單位面積磁異向能， t 為磁性層厚度；將此式左右乘上厚度 t 再以 Kt 對 t 作圖便可以分別由其斜率與縱軸截距，以求得 K_v 與 $2K_s$ 大小。再將 K 設為零便可求得 $t = -2K_s / K_v$ 。在薄膜厚度較薄時，其極向方向較縱向易磁化；當薄膜長至臨界厚度後，其縱向較極向方向易磁化。這與我們所得到的不同厚度的 Co/Ir(111)實驗結果相符合，在薄膜厚度較薄時，其極向方向較縱向易磁化；當薄膜長至臨界厚度後，其縱向較極向方向易磁化。

而具有大的矯頑力，是在選擇適合的磁光記憶材料時的必須條件之一，因為具有大的矯頑力是使磁光記憶材料穩定性高的主要原因。矯頑力 H_c 是將磁化量消滅至零所需要的外加磁場大小，若記憶材料的矯頑力夠大，則儲存媒體受到外界磁場的干擾小，亦即一般的游離磁場對矯頑力大的記憶材料一點影響也沒有，本薄膜厚度 5 ~ 8 ML 間之極向矯頑力約為 250 Oe，因此可以利用為磁性紀錄材料。

五、結語

在大氣中鐵薄膜的實驗中，我們選擇 10 nm 此特定厚度的鐵薄膜($Al_2O_3 \setminus V \setminus Fe \setminus V$) 樣品進行磁異向性實驗，實驗中發現縱向磁化曲線矯頑力值為 30 Oe，極向磁化曲線矯頑力值為 2300 Oe 下仍未呈現飽和情況，兩矯頑力值相差甚多，可明確判定此樣品的易軸為平行於樣品表面方向，並驗證了此大氣中的磁光科爾效應儀之解析度可達奈米尺度。

而在超高真空中不同厚度的 Co/Ir(111)磁異向性實驗中，發現 Co 厚度 0~3.5 ML，並無量測到磁滯現象，厚度 3.5 ML 到 12.6 ML 之間，極向較縱向易磁化。當 Co 薄膜厚度達 5.6 ML 後，易磁化方向逐漸由極向轉向靠近縱向。當厚度漸增至 13 ML 後，薄膜轉變為縱向較極向易磁化。當厚度達 14.3 ML 時，極向磁滯現象已完全消失，僅剩下縱向依然有磁滯現象，此時可判定易軸方向已完全平行於樣品表面，並驗證了此表面磁光科爾效應量度系統之解析度可達 3.5 ML。

致謝

作者們感謝國科會對本研究計畫：NSC 91-2112-M-029-001，NSC 92-2112-M-029-007 及 92-2815-C-029-018-M 的支持與資助。

參考文獻

- [1] W. B. Zeper and F. J. A. M. Greidanus, *J. Appl. Phys.* **65**, 497 (1989).
- [2] C. H. Lee, H. He and W. Vavara, *Phys. Rev. Lett.* **62**, 653 (1989).
- [3] D. Pescia, G. Zampieri and G. L. Bona, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 933 (1987).
- [4] N. C. Koon and B. T. Jonker, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2463 (1987).
- [5] H. Yanagihara, K. Pettit, M. B. Salamon, Eiji Kita, S. S. P. Parkin, *J. Appl. Phys.* **81**, 5197 (1997).
- [6] F. J. A. den Broeder, W. Hoving and P. J. H. Bloemen, *J. Magn. Magn. Mat.* **93**, 562 (1991).
- [7] M. Faraday, *Trans. Roy. Soc. (London)* **5**, 592 (1846).
- [8] J. Kerr, *Philos. Mag.* **3**, 339 (1877).
- [9] J. Kerr, *Philos. Mag.* **3**, 161 (1878).
- [10] Z. Q. Qiu, S. D. Bader, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 664 (1999).
- [11] E.R. Moog, S.D. Bader, *Superlattices Microstruct.* **1**, 543 (1985).
- [12] M. T. Johnson, P. J. H. Bloemen, F. J. A. dan Broeder, J. J. de Vries, *Rep. Prog. Phys.* **59**, 1409 (1996).

Magnetic study of Co/Ir(111) using surface magneto-optic Kerr effect

S. S. Su^{*} Y. L. Li^{*} J. S. Tsay[†]

Abstract

The measurement of a surface magneto-optic Kerr effect system could achieve one-atomic-layer sensitivity. It becomes an excellent tool for the investigations of magnetic properties of nanometer-thick films when it is constructed under ultrahigh vacuum environment. In this article, we will introduce the theory and the construction of a surface magneto-optic Kerr effect system. The evolution of magnetic responses versus the film thickness for Co/Ir(111) system will also be discussed.

Keyword: surface magneto-optic Kerr effect, nanometer-thick film, magnetic properties, magnetic recording material.

^{*} Department of Physics, Tunghai University

[†] Department of Physics, National Chung Cheng University