

高磁場表面磁光效應系統及其關鍵技術之探討

To Explore A High Magnetic Field Surface Magneto-Optic Effect System and Its Related Key Technology

蘇炯武、張硯筑、黃銘祥、蔡宗軒

Chiung-Wu Su, Yen-Chu Chang, Ming-Siang Huang, Tsung-Hsuan Tsai

本文將詳細介紹筆者實驗室如何自行開發表面磁光效應探測技術，並將其應用在超高真空系統環境，成功量測出高達正負 3200 Oe 磁場強度之磁滯迴圈曲線，以進行基礎磁性質之探討。此外，亦討論一般自行架設儀器系統可能面臨的問題，例如電流源自動控制、光感測器接收、樣品座與真空環境零件選用及光路校準等。本文同時也展示以此技術成功地量測出鐵／矽 (Fe/Si) 薄膜樣品及氧化鋅晶體 ZnO (002) 表面上沉積金屬鈷薄膜過程之磁滯曲線變化。

The paper will introduce the development of surface magneto-optic effect technique and how to apply in the ultrahigh vacuum system of author's lab. The magnetic properties such as typical magnetic hysteresis loops can be measured successfully under the field strength reaching as high as ± 3200 Oe. We will also discuss the realistic problems about the automatic control of current source, the detection of photo signals, the selection of sample holder and other vacuum components, and photo alignments for the home-made users who want to setup their own device. Besides, authors will show the successful results from the hysteresis loop measurements of Fe/Si samples and observations of the loop variation from the deposition of Co ultrathin films on ZnO (002) crystal surface.

一、前言

表面磁光效應探測技術自從 1985 年由 E. R. Moog 和 S. D. Bader 博士第一次提出，將此技術應用在超薄膜原子薄膜系統以來⁽¹⁾，表面科學領域之子領域—表面磁學也變成學術界一熱門研究題材。而此領域之另一項研究題材—超薄膜系統，限於其

沉積各類薄膜材料時必須維持在一定等級之超高真空環境，才能免於實驗過程中吸附過多雜質，導致材料組成不均勻，因此設計出能對應之磁性量測儀器即有先天環境上之限制，而表面磁光效應的發現則為該研究出現一道曙光。因為如果真空維持得當，完美的表面結構性質就會牽引豐富的磁性質變化^(2,3)。然而在優勢中仍存在一些不能忽略的問

題，即一般磁光實驗由電磁鐵 (electro-magnet) 提供之測量磁場，大約在 < 2000 Oe 範圍左右。

實驗作法是直接將電磁鐵本體置於真空內部，纏繞上千匝數耐熱電線於鐵芯上，並提供一定大小的電流，才能在真空臨場 (*in situ*) 環境下製造一定程度之磁場強度。由於耐熱電線仍有最大承載電流之限制，若超過負載的電流，則如同一般在大氣中電線會將包覆在外之塑膠皮熔化而引發短路走火，在安全考量下，所能提供的磁場強度範圍則被侷限。更重要的是，超高真空不能被外來因素例如耐熱電線之嚴重釋氣 (outgas) 所污染。

2000 Oe 的磁場上限常使得表面磁光科學家及使用者在解釋更高磁場的磁性質時可能面臨窘境，由鑑於此，筆者於實驗過程中大膽嘗試新的作法，將 2000 Oe 左右之極限再往前推進 1000 Oe 左右。因為當初在設計製作時，已將目前國內所能提供最大場之真空臨場磁光量測作一般性調查，發現大部分作法是在內部裝設電磁鐵，或是在腔體內部正對之兩端焊接一延長鐵芯，以導引磁力線，該作法仍無法使磁場強度提升太多。筆者考量系統設計需具備三軸方向之光路進出 (polar-、longitudinal- 和 transverse-)，以及最大場設定在 3000 Oe 目標下，便著手設計一不影響超高真空度、且能達到預計磁場的電磁鐵。歷經兩年艱辛的實驗過程，從設計、草圖、確認、製造成品，加上各機件購置齊全後，再自行開發操作系統之測量自動化，最後實際測量出第一組數據實屬不易。本文便是筆者將這兩年來實驗過程的寶貴經驗提出分享，希望有助於該領域的研究人員能夠快速獲取所需資訊，開發出高效能全方位的磁光量測系統。

二、磁光效應技術原理

1. 磁光柯爾效應原理

材料要具備磁性質之典型條件為在外加磁場下顯現磁滯現象，而磁滯迴圈曲線是樣品感應磁化量 M 和外加磁場 H 的關係圖，由磁光柯爾效應 (magneto-optic Kerr effect, MOKE) 理論得知⁽⁴⁻⁶⁾，柯爾旋轉角 θ_K 和柯爾橢圓率 ϵ_K 與 M 的大小成線性關係。利用光線偏極特性與材料在磁場下產生非對

稱性介電張量，產生交互作用耦合^(7,8)，再藉由簡易光學設計以讀取 θ_K 或 ϵ_K ，即相對獲得磁化量變化。這屬於非破壞性量測方式，原則上十分清楚簡易。

柯爾旋轉角 θ_K 與經樣品反射後光強度之關係式為⁽⁹⁾：

$$\theta_K = \left(\frac{\delta}{2}\right) \left(\frac{\Delta I}{I_0}\right) \propto M \quad (1)$$

ΔI 為光軸旋轉微小角度前後所呈現之光強度變化，由式 (1) 可清楚看出 θ_K 正比於 ΔI ，因此藉由反射光強度變化正比柯爾旋轉角的變化，繪製外加磁場與 ΔI 的關係圖，以獲取磁滯曲線，俾能瞭解材料的磁化性質。

2. 磁光柯爾效應儀裝置

磁光柯爾效應儀架設方塊圖如圖 1 所示，最主要利用穩頻氦氖雷射 (He-Ne laser) 之光穩定特性，提供波長為 632.8 nm 的純線性偏振光，並在雷射本體出口端放置一偏振器 (起偏器)，以確保高純度的 P -wave 入射到樣品表面，此時樣品平面左右或上下兩端，則利用電磁鐵提供均勻的磁場。反射後，接收端前放置一偏振器 (檢偏器)，經樣品反射後橢圓偏振光往 S -wave 偏振方向增加多少，因此檢偏器需調整成與入射互相垂直之 S -wave 方向。

但需注意的是，雖然起偏器與檢偏器夾角為 90° ，通過之偏振光強度極小，但在 MOKE 訊號擷取的原則上，是取柯爾旋轉角的改變量，除了起偏

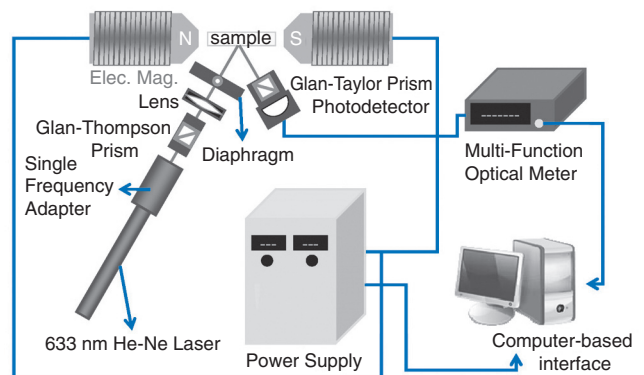


圖 1. 磁光柯爾效應儀架設裝置。

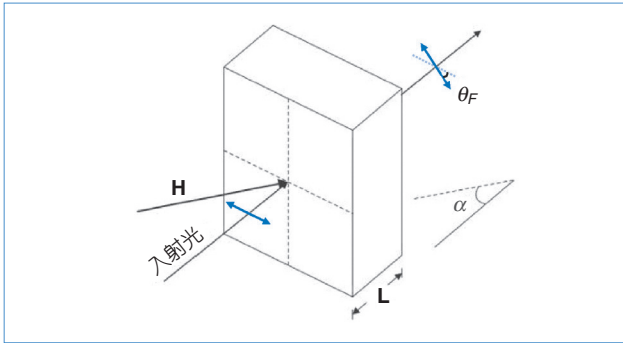


圖 2. 法拉第效應示意圖。

器與檢偏器的角度應互相垂直外，仍須往前或往後細部微調一角度(式 1 中之 δ)，此位置是感應器對於偏振量改變最敏感的角度範圍，為成功量測必需條件之一^(10,11)。

3. 磁光法拉第效應原理

當一線性偏極光通過透明性高的材料時誘發極旋轉，此現象為法拉第效應⁽¹²⁾。絕大部分磁光量測系統上均使用反射光來當作分析訊號，原因是材料之不透光性，但如果樣品本身透明性高，反射率低時，則可利用光穿透式的法拉第效應。量測原理與磁光柯爾效應唯一的不同，只是量測穿透光線的訊號。

一線性偏振光入射到樣品後(如圖 2 所示)，法拉第旋轉角 θ_F 與外加磁場 H 的關係式如下⁽¹³⁾：

$$\theta_F = V_F L H \cos \alpha \propto M \quad (2)$$

其中 θ_F 為法拉第旋轉角， V_F 為費爾德 (Verdet) 常數， L 為光通過旋光介質的光程長度， H 為外加磁場強度， α 為 L 與 H 的夾角。

光偵測器量測到的光強度變化正比於 θ_F ，而會與 V_F 、 L 、 H 相關，實驗中 L 為固定常數， V_F 為 H 之函數，為磁光耦合係數，因此時樣品受到外加磁場磁化後誘發法拉第旋轉角，藉由光強度變化以得知磁化量變化。

4. 磁光法拉第效應裝置

目前筆者實驗室使用之樣品為 ZnO 晶體，由於

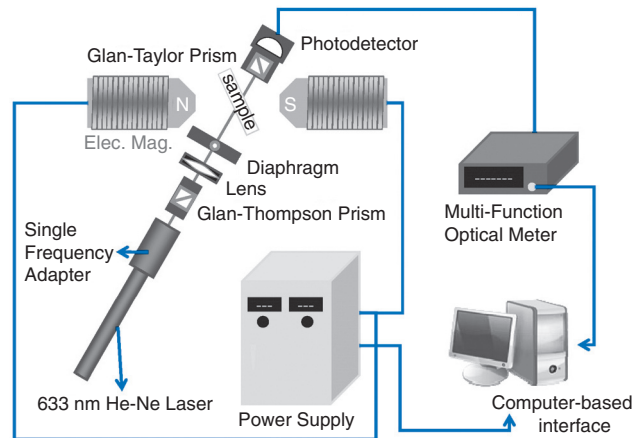


圖 3. 法拉第效應實驗裝置圖。

其為兩面拋光的透明薄板，導致反射訊號過小，無法利用磁光柯爾效應儀進行磁探測，因此改以穿透式的法拉第效應進行量測，儀器架構之方塊圖如圖 3 所示。磁光法拉第效應上各光學元件的功用皆與磁光柯爾效應相同，唯一需注意的是，量測法拉第效應時因電磁鐵空間配置的緣故無法讓樣品法線方向垂直於磁場，須讓樣品與磁場方向夾角 α (如圖 2)，且可使雷射光入射方向與樣品面法線方向平行(但不是必要)來進行實驗。

三、實驗前之系統評估

欲探測表面磁光效應，首先須評估超高真空系統上各腔體所允許之進出口是否符合磁光系統配置(一進一出，並有機會遵守光的基本性質：直線前進、反射定律)。因超高真空系統的腔體儀器裝設特殊性太高，加上商用磁光臨場測量平台成本過高，市面上尚未有符合類似系統可搭配使用，通常要依照實驗室需求自行設計與架設。常見測量的設計大約可分為兩種，一為交流光訊號 AC 量測法，利用 lock-in 訊號放大技術將微小偏振訊號經由訊號處理最佳化，以輸出非雜訊數據(適合一般商用雷射光源)(如圖 4)⁽¹⁴⁾，而另一類為本文強調之直流光訊號 DC 量測法(如圖 5)^(7,8)。

利用穩頻雷射(stabilized laser)光訊號的穩定性及偏振晶體(crystalline polarizer)之極佳偏振消光比(extinction ratio)，後端再搭配能即時作訊號處理之

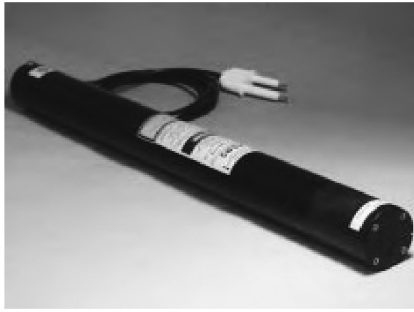


圖 4. 一般 He-Ne 雷射 (圖片取自銓州光電股份有限公司)。

多功能光功率計，以準確量測光的實際強度變化，如此便完成一磁光訊號量測之基礎。然而磁光系統的配置看似簡易，只要具有一般儀器架設的經驗皆可輕易在大氣環境下架設成功。但是若欲將大氣環境下的機台移至超高真空系統進行架設，由於各種形狀系統先天性的限制，在移轉過程中將有層出不窮的問題產生，而坊間有關這方面的資料仍舊極少，因此筆者希望能將這兩年來成功架設磁光系統的經驗與讀者分享。

超高真空系統之起始設計需考慮的因素甚為繁雜，諸如：系統周圍裝載儀器設備的種類、擺放的適當位置 (因極有可能會受到強大磁場之影響而造成損壞) 等皆需事先全盤考量清楚。一般新腔體若非直接向國外購買現成品，便是委託製造商依客戶需求製作，目前國內也有數家廠商具有自製腔體的能力，不過若所需超高真空系統壓力的真空度在 $10^{-10} - 10^{-12}$ Torr 之間，筆者則建議直接向國外有信譽的廠商採購較為妥當。當初筆者欲進行實驗時，



圖 5. 穩頻 He-Ne 雷射 (圖片取自宏惠光電股份有限公司)。

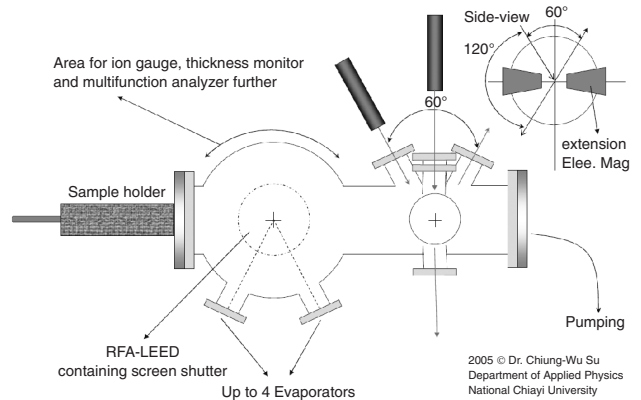


圖 6. 實驗室腔體設計草圖。

先將儀器架構繪成草圖 (如圖 6)，再繪製設計圖以進行委製，並與對方往來簽單，同時國外廠商亦派人至筆者實驗室進行現場溝通，待實際腔體運至實驗室已耗費將近 1 年半的時間 (如圖 7)。因此筆者建議新手們在設計時務必先考慮周詳後再行委託製造，因為後續加裝儀器及機件之步驟與細節相當繁瑣，如位置擺設經常出現空間不足等問題，若無高瞻遠矚的本事，日後欲更改原設計則將耗費更高的成本。

再者，若欲在超高真空系統上裝載磁光系統中不可或缺的電磁鐵系統，通常有兩種方法，筆者皆有過如下兩種方法的操作經驗，一是將電磁鐵系統裝設在真空內部 (如圖 8)，另一種則是將電磁鐵系統裝設在系統外部，(以筆者設計為例，腔體凹型、電磁鐵凸形組合設計，如圖 9 所示)。目前筆者是以

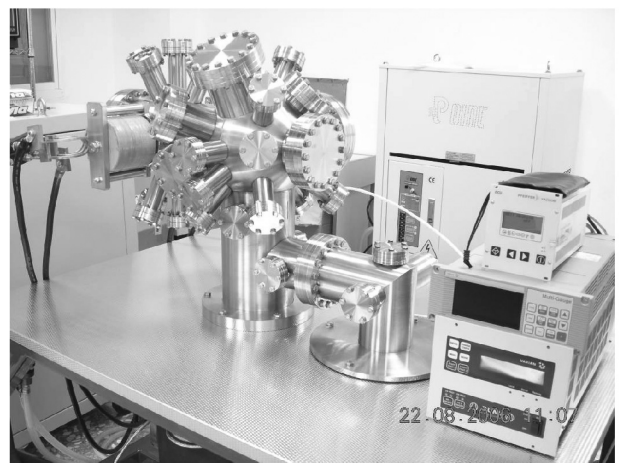


圖 7. 筆者實驗室系統腔體圖實景。

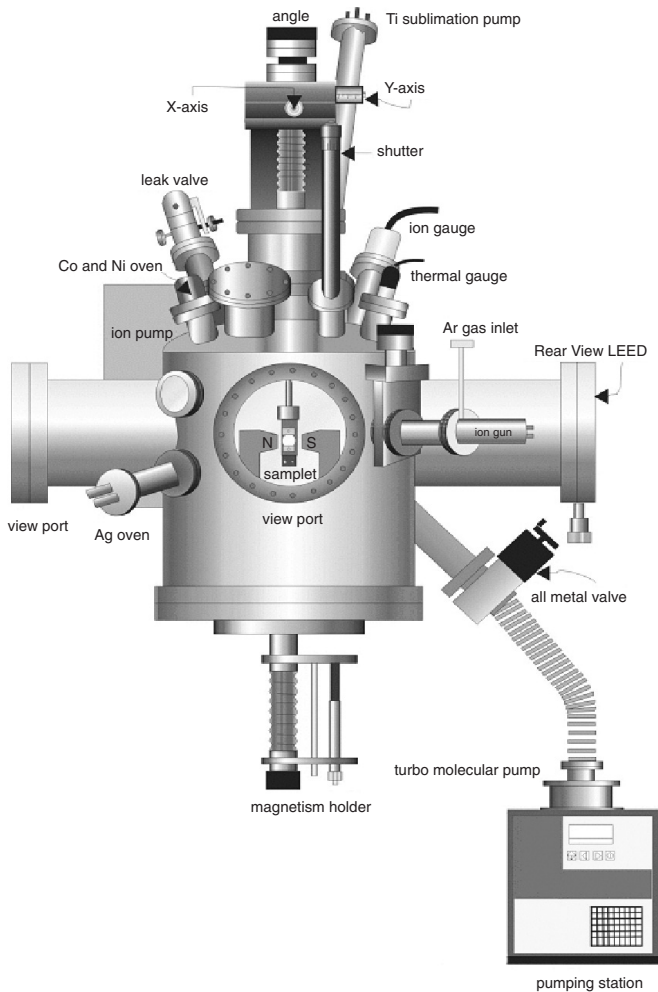


圖 8. 國立台灣師範大學表面物理實驗室表面磁光系統配置圖。

自行設計研發可移動至外部的電磁鐵系統為主，亦為本文敘述重點。因後者不僅可裝設在超高真空系統，亦可在幾乎不影響超高系統真空度的運作下 (10^{-10} Torr) 輕易地卸載至一般大氣平台上 (目前筆者實驗室在超高真空及大氣環境下已成功擷取數據)，進行所謂大氣高場磁光系統量測 ($\sim 8000-9000$ Oe, 1.3 cm pole gap)，在滿足多類型實驗量測需求上可說十分便利。然而坊間各大實驗室為何仍未普遍採用，筆者深究原因可能為下列數項。第一、依照超高真空磁光系統的設計圖觀察 (如圖 9)，凹形設計之不鏽鋼壁有一定厚度 (腔壁厚度約 3 mm)，雖然磁力可感應磁化不鏽鋼材質並傳遞磁場至另一端，但是卻無法在大氣中以同樣距離條件進行模擬磁場強度之校正。第二、電磁鐵兩端之間隙也需按照實

驗者所需傳送樣品及樣品座之大小，一併考量所需磁場強度的最大值是否如預期。由於筆者當初設計已設定磁場間隙之正中點最大磁場約 3000 Oe 左右，所以委託製造電磁鐵之美國 AMC Co., Ltd. 即進行相對應之模擬製造。然而 AMC 公司利用方形空心粗銅管纏繞在電磁鐵芯的周圍，是為配合 3.2 cm gap 能產生約 3000 Oe 最大場之需求，所以提供銅管上之電流負載最大將近高達 300 A。這對於一般超高真空系統的使用者而言是相當驚人的數字，尤其操作人員在安全上須特別注意，所以相對地在控制電流提供電源的方式也變得較不容易。

首先，必須有控制高達 300 A 之電源供應器 (如圖 10)，若要作額外自動控制，則須請廠商先行設計加裝可自動控制之 RS-232 或 GPIB port，供日後電腦連結溝通。由此可程式控制電源供應器，起初是以 RS-232 介面作設計，筆者要求更改為 GPIB 介面，以搭配也是 GPIB 同控制介面之 Newport 1835-C 光功率計，其相容光讀取頭為可見光半導體矽偵測器 (如圖 11)，因此撰寫自動控制程式較為簡便。然而電源供應器上 RS-232 轉 GPIB 器 (GPIB-232CV-A) 之額外控制介面 (編號：ADAM-4019、ADAM-4024、ADAM-4520) (如圖 12)，曾讓筆者實驗室一度無法進行電源之溝通，後經由重重關卡之檢測，才發現原來是電源與介面之連結電線端早在送出廠時接錯，導致介面損壞，最後經由送修才恢復可控制的狀態。所以準備開始

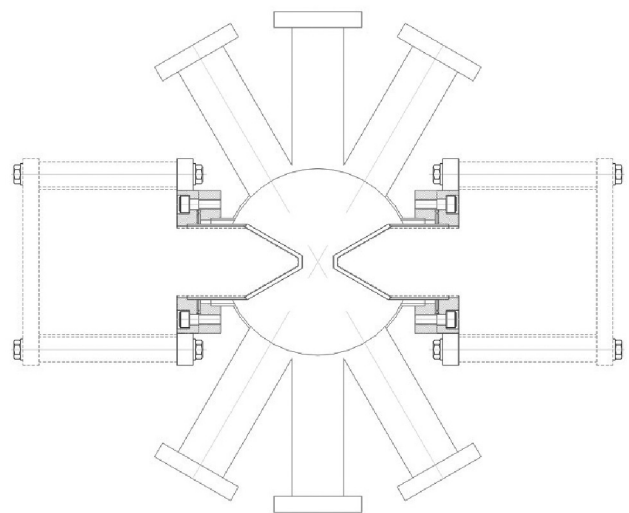


圖 9. 筆者實驗室之表面磁光系統電磁鐵配置設計圖。



圖 10. 高電流電源供應器。

撰寫連結控制程式時，必須對每一項儀器機件先進行連結之基本測試，才不會浪費許多寶貴的時間。待一切就緒後，筆者實驗室則是利用現今最普遍的儀器連結控制軟體 LabVIEW[®]，進行控制程式撰寫平台。目前需要控制之機台有電磁鐵控制系統 (AMC Watercooled Electromagnet & Gold Choice 25-300)、光訊號強度讀取控制系統 (Newport 1835-C)、偏極晶體精密旋轉控制系統 (Sigma SHOT-602) 及磁場強度校正控制系統 (F. W. Bell 7030 gauss meter) 等，以下將逐一介紹每項儀器機件的型號，以及如何利用簡易程式進行控制。至於所開發之程



圖 11. 矽半導體光偵測器讀取頭 (圖片取自阜拓科技股份有限公司)。

式碼，鑑於筆者仍擁有實驗室開發版權，若有需求，可逕向筆者來信索取，但僅可使用在學術用途上。

待控制系統一切就緒後，即能開始進行各項樣品之量測。一般磁光效應量測之配置是適合反射式 Kerr effect、或是穿透式 Faraday effect，須先行評估，另外，與磁場相對之光入射面是垂直方向、縱向、橫向之測量 (如圖 13) 也需一併考量。

四、分項儀器

1. 穩頻氦氖雷射

實驗室使用的雷射為波長 633 nm 的氦氖雷射，最大功率為 1.4 mW (實驗時之功率為 1.2 mW)，偏振度為 5000 : 1，並在雷射出口端裝置一穩頻器，可將雷射穩定度提高至 10^{-4} mW。

2. 起偏器

為增加雷射偏振純度，加裝一 Glan-Thompson 稜鏡作為起偏器，如圖 14 所示，其具有極高的消光比 1×10^{-6} 。此偏振器為兩塊方解石晶體結合而成，它可以讓平行結合面的偏振光通過，並且過濾非平行的偏振光，在實驗中我們將偏振片固定在旋轉台上，並將其旋轉至雷射偏振方向 (也就是 *P* 波方向)。要注意的是，雷射光必須垂直平面入射，避免造成光路散開。



圖 12. ADAM-4019 泛用型控制介面輸入模組 (取自研華股份有限公司)。

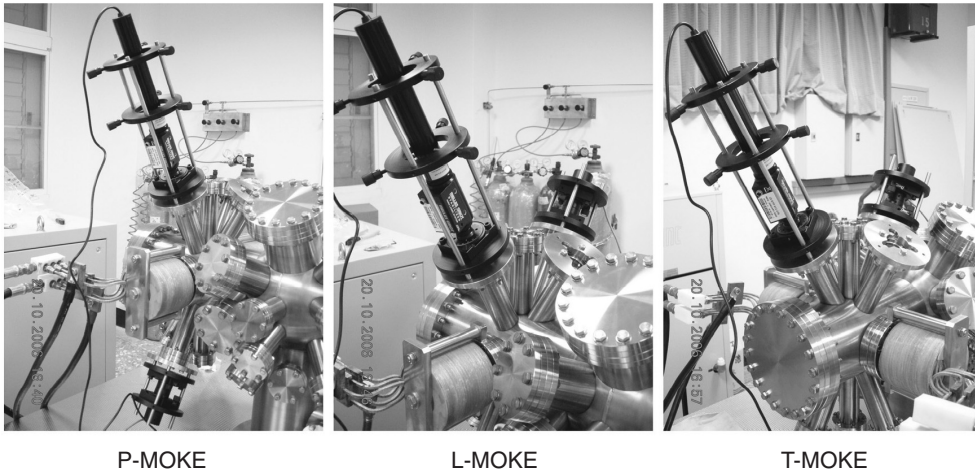


圖 13. 三軸向表面磁光測量系統。

3. 聚焦透鏡

由於雷射光源至樣品有一段距離，為將光源聚焦至樣品表面得到良好的反射光，因此在偏振片後加裝一片聚焦透鏡 (焦距 250 mm)。

4. 光圈

當雷射光通過偏振晶體及聚焦透鏡時，可能會造成散射，為避免散射光造成實驗誤差，因此在發射端的最前頭加上一個可調式光圈，擋住不必要之散射光。

5. 檢偏器

實驗室所用的檢偏器為 Glan-Thompson 稜鏡，如圖 15 所示，其消光比高達 1×10^{-6} 。與 Glan-Thompson 稜鏡不同的是，它可讓垂直結合面的偏振光通過，過濾其他非垂直結合面的偏振光。實驗時我們將其固定在旋轉台上，並且旋轉至 *S* 波方向 (即光強度最小值、與 *P* 波垂直方向)，檢測反射光在垂直入射光面的偏振光強度變化情況。

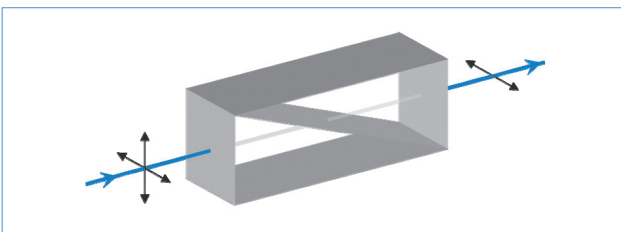


圖 14. Glan-Thompson polarizer。

6. 光偵測器

光偵測器為矽半導體偵測器，檢測器接收範圍面積大小為直徑 11.3 mm，可感應的波長範圍為 400–1100 nm。其原理是利用光電效應將接收到的光子轉換成光電流傳遞至光功率計內積讀取。

7. 光功率計

實驗室使用之光功率計 (Newport multi-function optical meter 1835-C) 為高解析度之低功率光接收器，接收光功率讀值後，藉由 IEEE488 傳輸線將訊號透過 GPIB 介面卡送由電腦控制軟體以讀取數值。

8. 電源供應器

實驗室所用的電源供應器有兩種類型。高電流電源供應器最大輸出電流為 300 A、最大輸出電壓為 25 V (國橋電機公司訂製)，藉由 IEEE488 線連接電腦，利用 LabVIEW 作自動控制。低電流電源供應器最大輸出電流為 35 A、最大輸出電壓為 20 V，可利用 RS-232 (9-pin D-sub) 連接電腦控制。

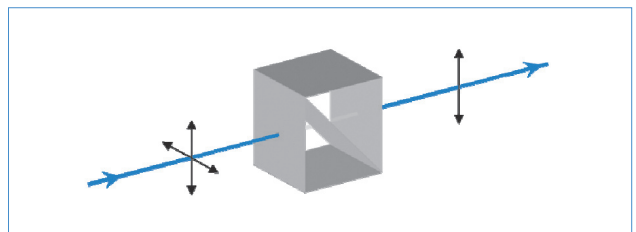


圖 15. Glan-Taylor polarizer。

9. 電磁鐵

電磁鐵鐵芯是由純生鐵 (美國 Advanced Magnetic and Cryogenic, LLC 公司委製，鋼鐵材料編號：AISI 1006) 製作。由於真空腔體的磁極間距過大，加上電磁鐵必須置於腔體外，因此銅管線圈需輸入最高電流值約 300 A，以產生對應之中心磁場約 3000 Oe，以滿足實驗預期。由於引入高電流會導致電磁鐵本體負載過大，造成溫度急速上升，超過纏繞銅管間非導體絕緣層材質允許之溫度極限，導致熔毀短路。為了達到降溫目的，銅管設計為空心方形管，以利於連結一定速率之蒸餾純水 (冷卻水溫 15 °C) 之冰水循環於銅管中空內部，維持穩定常溫循環。目前真空腔體上的電磁鐵磁極面間隙為 3.2 cm，最大中心磁場可達 3200 Oe。

五、實際架設及注意事項

1. 架設原則

首先，實驗時可將雷射調整為 *P* 波入射，而後由光偵測器以 *S* 波進行接收 (依量測原理亦可利用 *S* 波入射、偵測)。所謂 *P* 波、*S* 波是指電場偏振方向與入射、反射光面平行或垂直，平行光平面則稱為 *P* 波，垂直光平面則稱為 *S* 波 (如圖 16)。

表面磁光系統除了可利用表面磁光柯爾效應測量法 (surface magneto-optic Kerr effect, SMOKE) 測量一般反射式樣品，亦可利用表面磁光法拉第效應測量穿透式樣品 (surface magneto-optic Faraday effect, SMOFE)。SMOKE 量測的基本原則為反射光的強度變化代表柯爾旋轉角的變化，和外加磁場比較得磁滯曲線圖，原理公式如前述式 (1)。SMOFE 量測基本原則為外加磁場時樣品受到磁化會影響法拉第旋轉角，可由光強度變化得到實驗結果，並畫出磁滯曲線圖，原理公式如前述式 (2)。

2. 架設時注意事項

目前新一代之儀器幾乎能與 National Instruments (NI) 公司的軟體驅動介面 LabVIEW 相容，LabVIEW 對於 RS-232、RS-485 和 GPIB 等介面之支援性佳，大部份儀器預設驅動程式均可在各儀器製造商或 NI 網頁上自由下載，利用該套件組合開發適合實驗需求之平台。

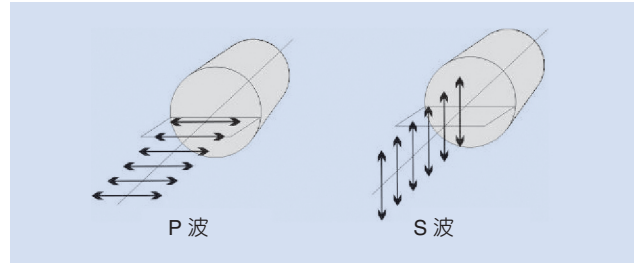


圖 16. *P* 波與 *S* 波方位示意圖。

3. 注意事項舉例 (以筆者實驗室平台為主)

筆者實驗室所訂做的電流供應器可提供 300 A 高電流，最小讀值為 1 A，設定電流源輸出部分，主要目的是為了讓電流輸出可構成一個迴圈，再搭配光功率計作圖。利用各儀器所附 LabVIEW driver 撰寫程式，把該小套件放入內建 while loop 功能，使其可以連續循環執行。首先，需設定 while loop，讓電流以每秒一安培之速率增減數值。該部分主要是一迴圈劃分為四個數值結構，也就是從 0 A 到 300 A、反向到 0 A、從 0 到 -300 A，最後從 -300 A 回到 0 A 完成一個循環。利用此設定所需花費總時間約 20 分鐘，但可依據各搭配儀器之效能及擷取速率調整，例如可以每秒 5 安培為一單位或每秒 0.5 安培為單位為增減速率。目前市面上較常用之電流源均安裝有程式控制模組，以便控制電流或電壓，此控制模組的設定會影響使用者對儀器所需設定工作範圍的數值。目前筆者實驗室使用 ADAM-4024 (in) 及 ADAM-4019 (out) 模組，用以控制電壓之實際最大值為 10 V，對應本電源供應器最大輸出電流值為 300 A，若以 1 A 之大小遞增或遞減，則由控制端對應輸入 1/30 V。使用者注意模組之設定須在迴圈內部，為控制程式重點之一。另外，因為 LabVIEW 只能辨識儀器內碼，因此須額外搭配一介面函式庫 VISA (虛擬儀器軟體架構，可使 LabVIEW 軟體無需在儀器之 I/O 在不同平台上使用) 來控制處理資料的輸入與輸出。

在讀取光訊號之光功率計方面，以相同作法將此儀器的 LabVIEW 驅動套件置入同一迴圈內。例如本實驗室所使用的 1835-C，因驅動套件完整 (套件內部已具備所需之完整控制碼，設定內容包含雷射光的波長、讀值速率等)，可省略上述控制模組及 VISA 部分，利用上述電磁鐵控制及光功率計讀

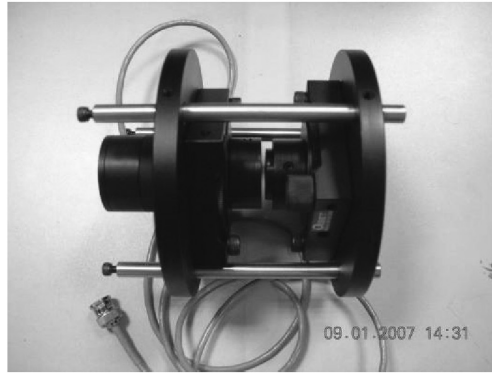


圖 17.
超高真空光學元件固定
支架。

取控制這兩組儀器，即可完整繪製出一磁滯迴圈曲線。由於每項輸出變數均是時間的函數，因此可利用同一時間擷取各項所需變數數值，並將此變數資料利用一維矩陣列接收並存取，最後以二維 (2D) 繪圖版面便可立即呈現磁滯曲線的變化，或利用其他 2D 繪圖軟體 (例如：Origin Pro) 輸出數值檔，作後級數據處理亦可。

磁場之校正亦是非常重要的部分，主要設定的方法是將上述部分光功率計替換成高斯計。由於筆者實驗室目前所使用高斯計是目前市面上最頂級之型號 F. W. BELL Model 7030，由廠商 (佳準科技) 提供的 70X0 系列 LabVIEW 驅動套件，只需輸入內部設定好的 GPIB 位址 (例如此儀器之內建儀器識別碼為 15)，即可設定三軸合一之高斯計探棒，以讀取 X、Y、Z 三軸不同磁場的數值。

最後需注意之步驟為各量測儀器間擷取速率相容性。由於每套儀器設備在處理訊號之速率極限均不相同，但 LabVIEW 同時提供此解決方法，利用

wait until next ms multiple 功能鍵，統一設定 while loop 執行一次所需時間。例如在光功率計、電源供應器以及高斯計設定每秒讀取一個數據，讓使用者可以方便地控制每部儀器在處理資料後傳遞彼此訊息以同步溝通，可降低訊號延遲所造成讀取不正確訊號之系統誤差。

六、測量疑問與解決方法

1. 光路校準

由於超高真空腔體進出視窗角度複雜的緣由，光學元件之裝設無法利用一般商用光學平台，因此委託製造光學元件固定支架 (銓州光電公司)，可輕易將雷射及所需偏振器、透鏡、光圈及光偵測器等零件一併架設在同一光軸上。更方便的是，利用委製之腔體視窗轉接片，可將此套件組直接固定在真空腔體視窗上，輕易的裝卸及移動進出口的位置 (如圖 13)，完成一可測量三軸方向之光學平台。

首先，起偏器 (Glan-Thomson 稜鏡) 的方向必須確定，裝設到腔體的平台後調整為 P 波入射方向，先以手動調整穩頻雷射 (Melles Griot 05-STP-912 single frequency laser system; polarized) 雷射偏極方向，使其與起偏器偏極方向目視一致，此時利用電動控制精密旋轉台微調起偏器角度，由同一入射直線接收端偵測所讀取之光功率數值，由於雷射偏極端已被固定在光學元件支架上，起始偏振方向已經確定為 P 波入射，倘若光功率在微調後顯示極大值時，表示此時之入射光為一純淨 P 波偏極光。



圖 18. 精密電動光學旋轉台 (圖片取自銓州光電股份有限公司)。

之後若進行磁光柯爾效應量測，先將樣品傳送待測端定位，入射光經由不透明樣品反射後至接收端，先行確認入射面、反射面與磁場方向垂直，亦可利用反射出系統外之光點位置，以確定每次量測點位置均相同。若光程距離拉長，則可使標記降低誤差，雷射入射角度也可利用此法固定，減少人為調整可能產生之誤差。

若發現撞擊在樣品上之光點目視過於模糊及光點扭曲不易觀察，則可將透鏡放置在起偏器後端以聚焦，可依實際雷射光點束大小選用適當聚焦的透鏡。

2. 電動控制精密旋轉台

快速獲取正確數據之關鍵為將手動光學旋轉台直接更換成旋轉台 (型號：Sigma Koki Co., Ltd. SGSP-60YAW motorized rotary stages，如圖 18)，經由控制連結到可控制雙軸之步進微調控制器 (Sigma Koki Co., Ltd. SHOT-602 two-axis stage controller，如圖 19)，利用 RS232 介面作自動化控制。由於精密旋轉台可提供最小步進角為 0.0025 度之靈敏度，符合 Kerr 或 Faraday 偏轉角度範圍，在測量磁光系統上是適合的儀器配件。控制旋轉台軟體 Hyper Terminal Display 則由國內知名光學製造代理商銓州光電股份有限公司 (Onset Co., Ltd.) 所提供。

3. 成功量測前之關鍵

當光徑不論反射或透射後，光束經由導引進入光偵測器 (Newport photodetector, 818 series)，依照磁光量測原理，前端需放置 S 波檢偏器。實際作法是利用電動控制精密旋轉台調整 Glan-Taylor 稜鏡偏極方向，使其讀取光功率為極小，當達到極小值後，再往順向或逆向調整檢偏器至 0.5 度左右 (此為本實驗室經驗值)，依據所量測磁滯迴圈曲線，判斷是否調整至更小角度 (用以降低 P 波方向背景光及光學性質問題，請參照第二項第 2 節說明)。前述順逆方向上之作法會使得磁滯迴圈走勢產生左右鏡向的現象，亦時常發現磁滯圖形扭曲不對稱情形，或出現俗稱蝴蝶迴圈 (butterfly-shape loops) 等問題，須自行調整至適當角度⁽¹⁵⁾。當初選用 Glan-



圖 19. SHOT-602 雙軸控制器 (圖片取自銓州光電股份有限公司)。

Taylor 稜鏡作為出射端之檢偏器，乃因其具有與 Glan-Thomson 稜鏡之異軸偏振性質，兩晶體除了其光學消光比 (extinction ratio) 高達 $10^6:1$ ，在調整上較不易產生光路折射及方向誤判之情形，可作為讀者參考使用。

4. 後級訊號處理 (Newport 1835-C Multi-Function Optical Meter)

一般雷射若出廠偏振度值在 500:1 範圍已屬於精密光學實驗等級，但初期雷射的穩定度及雜訊處理是很大的問題。筆者實驗室採用高達 5000:1 偏振度之穩頻氬氖雷射 (輸出功率 1.2 mW，單頻光輸出)，其體積小、重量輕，適合於各類型真空腔體中架設。另外，提升偏振程度的設計是在光源前端有一能以專利電路鎖住頻率之雷射光源穩頻器 (內建壓電晶體，型號：single frequency adaptor (SFA))。一般雷射強度由於自然頻率正弦波之晃動，使得光學強度基準位 I_0 值無法固定，若經由 SFA 將光訊號之穩定性處理十分鐘後，即能消滅大範圍之雷射光自然頻率影響，趨於一穩定值。之後便利用光功率計內設之軟體濾波功能，開始進行最後光訊號之調整，其功能分別為 (a) 無雜訊過濾 (none filter)、(b) 數位過濾 (digital)、(c) 類比過濾 (analog)，以及 (d) 數位與類比過濾。筆者曾嘗試上述四項功能，結果如圖 20，可觀察縱軸刻度已調整一致，依照實驗最後的結果選擇數位與類比模式之選項功能進行背景雜訊的過濾。然而在雜訊已經過濾處理後，雷射的穩定度在進行訊號微弱之磁光實驗時，光訊號輸出穩定度依然不符所需。另外，在此類型穩頻器上具有輸出功率調整的旋鈕

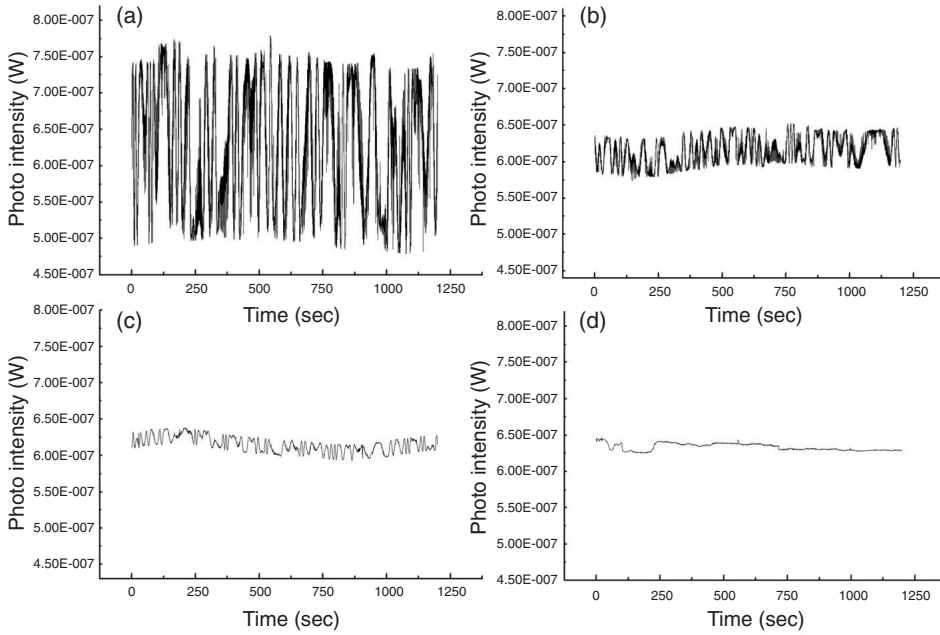


圖 20. Newport 1835-C 驅動軟體濾波訊號處理功能比較。

(範圍 0.6 – 1.4 mW)，從測試報告數據得知，進行上述範圍內不同輸出功率在兩分鐘內的穩定度比較，(比較如圖 21)，發現在 1.1 mW 以上之輸出功率值具有較佳的穩定性及偏振度，由於出廠設定為 1.2 mW，因此將雷射輸出功率固定在 1.2 mW 作為雷射光輸出功率數值。

5. 磁力線之空間分布

由於筆者當初設計腔體時，是以光線進出需符合 3 軸量測 (P-, L-, T-方向) 為前提，並考慮樣品座大小形狀是否會因旋轉能移動之範圍有所限制，考

量後電磁鐵磁極面之最小間距為 3.2 cm。由於磁極面之直徑較小 (~1 cm)，是否會造成不均勻之空間磁場，產生量測之失誤，因此在實驗最初空檔進行維護時，將腔體破真空至一般大氣環境下，於提供一定額度電流於電磁鐵以觀察磁場強度的分布情形。另外，利用高斯計探棒，以支架固定深入腔體內部，模擬由電磁鐵中心左右各移動 0.7 cm 範圍，位置與磁場關係圖如圖 22 所示。由圖顯示高電流提供之中心點處正負 0.1 cm 區域較穩定，因此進行磁光實驗時入射雷射光需對準薄膜樣品正中心，雷射光點約 1 mm，以準確對應中心磁場。

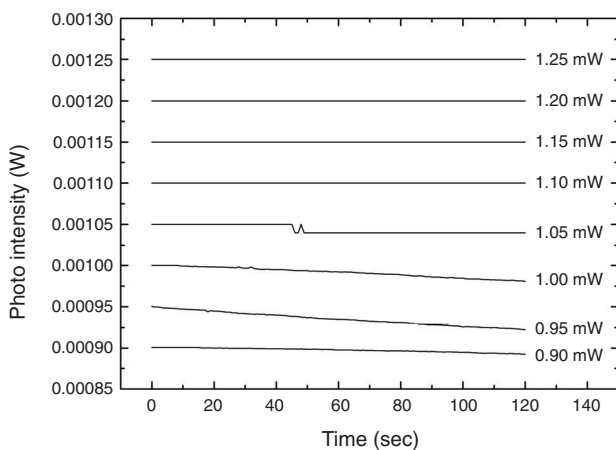


圖 21. 不同輸出功率之雷射功率穩定度。

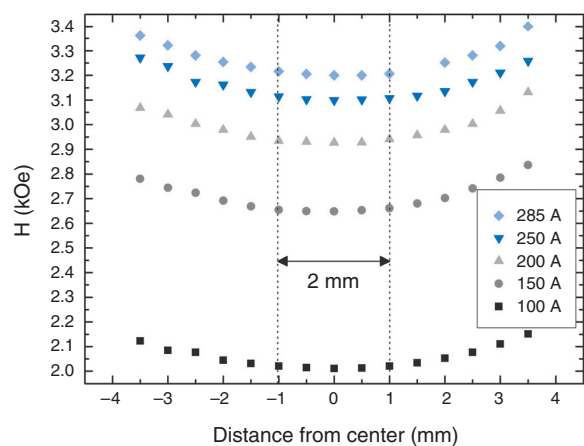


圖 22. 空間位置與磁場均勻度測試。

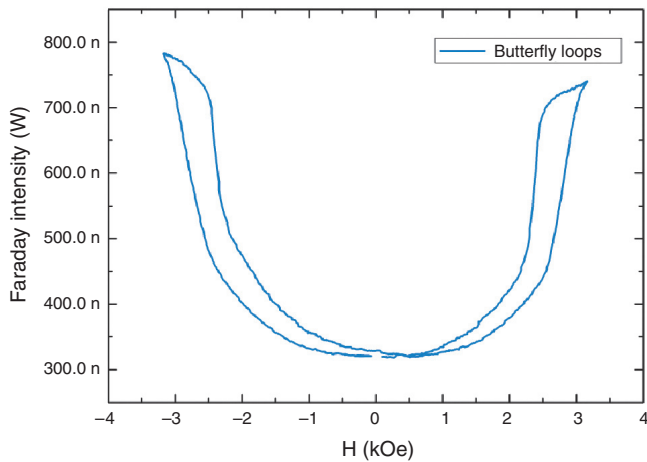


圖 23. 蝴蝶磁滯迴圈實際測量圖。

6. 非對稱及蝴蝶磁滯曲線現象^(15, 16)

非對稱及蝴蝶磁滯曲線現象普遍發生在架設磁光系統之新手，發生該現象的原因可分為三類：一、因為柯爾或法拉第旋轉角 θ 或橢圓率 ϵ 彼此形成耦合量，而與光強度參考變化量形成非線性關係⁽¹⁶⁾，經常會讓筆者誤認此為熟知之交換偏壓場 (exchange bias) 現象⁽¹⁷⁾。二、腔體或電磁鐵本體在磁迴路轉向時仍有殘餘微量磁場造成總磁場偏離，產生磁場數值大小左右不對稱現象。三、樣品座之材質問題，進行磁性量測實驗之前提為此材料可能具有某些磁特性，然而在超高真空內部機件的材質通常選用穩定不易氧化之不鏽鋼，而不鏽鋼為含碳量較低的鐵材，仍具有基礎磁性質，若將樣品座整體以不鏽鋼材質製作，會因磁力線通過此承載座，而呈現樣品座與樣品同時被磁化的現象，訊號互相干擾。筆者在腔體設計上，樣品傳送方向與地平面平行，承載座在遠端會另有重力承載問題。磁場小

時，樣品座因磁化而偏離原處之效應較小，但讓樣品座被磁化飽合的高磁場下，使此樣品座如同一塊具有強吸引力的磁鐵，使得樣品平面偏離平衡位置，此偏離則造成雷射撞擊光點並非落在同一區域內，進行磁光量測而產生量測瑕疵 (實例如圖 23)。筆者實驗室發現此問題後，立即將承載樣品座之材質由不鏽鋼更換為無氧銅材質製作 (如圖 24)，才馬上恢復典型的磁滯行為。

7. 測量成果展示

(1) Fe/Si 薄膜樣品

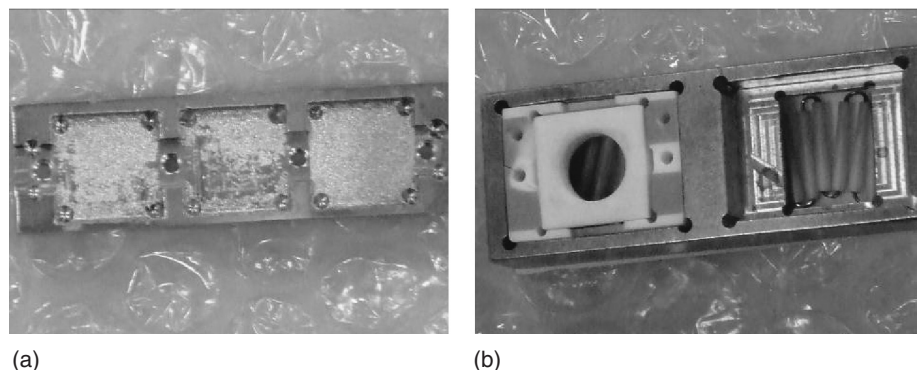
筆者實驗室早期以手動方式量測磁滯曲線始終遭遇訊號不同步、測量不精準、樣品座不適當等嚴重問題，因此在開發磁光效應自動化控制系統後，藉由台灣師範大學物理系蔡志申教授提供一片 Fe/Si 薄膜參考樣品，作為大氣磁光系統之前級校正，利用自動化程式所量測 Fe/Si 磁滯曲線結果如圖 25 所示。

(2) Co/ZnO (002) 薄膜樣品

此部分之展示是呈現金屬 Co 薄膜在成長時所對應之磁滯曲線變化，成長時的基板是選用氧化鋅 ZnO (002) 晶體表面。筆者實驗室利用自行纏繞之 0.5 mm 直徑 Co 線材通以一定電流，以熱昇華方式逐次蒸鍍於超高真空處理過之乾淨 ZnO (002) 表面，原子蒸鍍速率為 0.3 Å/hr，在每一次的薄膜成長過程後，以 SMOFE 依序觀測所對應之 longitudinal 及 polar 方向之未處理原始磁滯曲線 (如圖 26)，發現磁滯曲線相關於薄膜結構之有趣變化。在此不贅述，請有興趣的讀者能參閱筆者日後所寫之文章。

圖 24.

(a) 不鏽鋼樣品座，(b) 無氧銅樣品座。



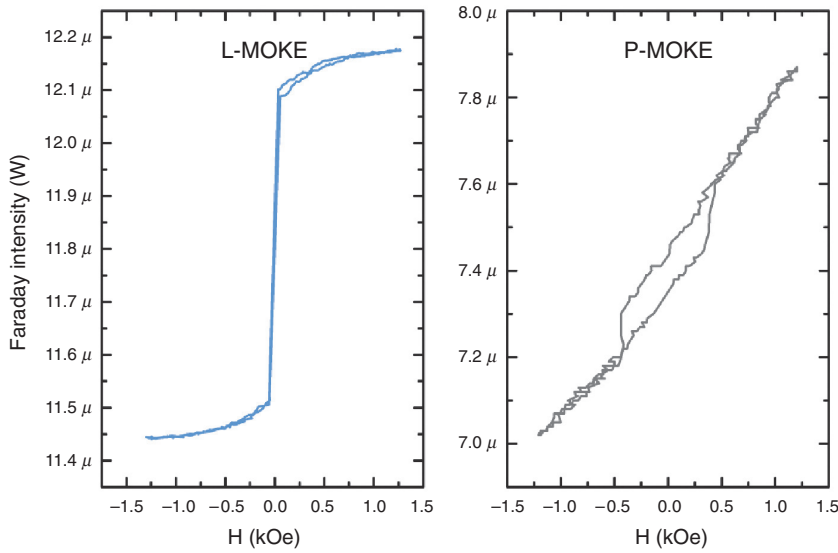


圖 25. Fe/Si 樣品 longitudinal (L) 與 polar (P) 方向 MOKE 曲線。

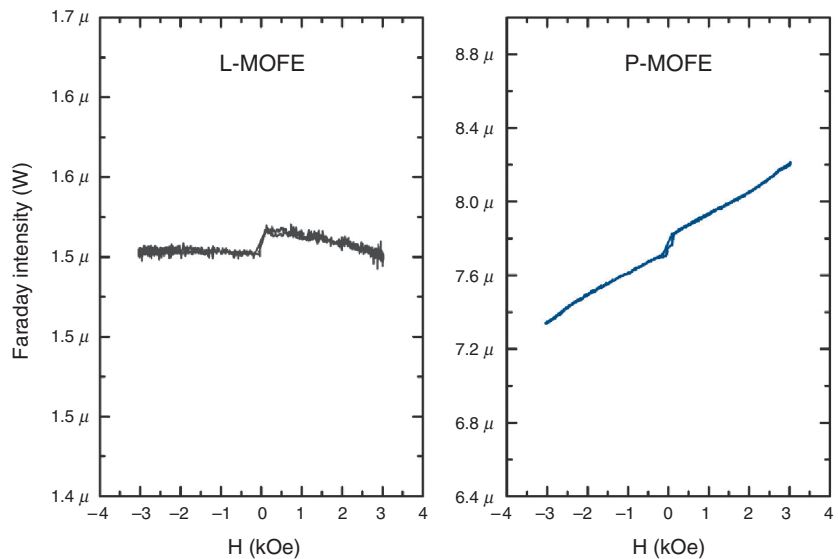


圖 26. Co/ZnO (002) 樣品 longitudinal (L) 與 polar (P) 方向磁滯曲線。

七、結語

在本文中筆者詳述利用既有的儀器加以改進設計，便能提升儀器系統的讀取範圍及性能，此說明自製儀器並非難事，一般若具備實驗室操作經驗，加上一些基本物理觀念，相信欲獲取基本物理性質的科學工作者都能實現自製量測儀器的夢想。

誌謝

首先要感謝國立台灣師範大學沈青嵩教授 (已退休) 在筆者求學期間之技術指導與學理相授，在 1990 年代初期若無沈教授領導研究群開始著手自

製臺灣第一台表面磁光效應儀系統，並將其應用於表面、介面與超薄膜磁性之研究，則該技術在臺灣亦無法生根茁壯，目前台灣在此系統之量測領域已趨成熟。另外，也感謝台灣師範大學蔡志申教授對於筆者不吝指導，並提供 Fe/Si 樣品與解答疑問。最後誠摯地感謝國科會同意撥款供筆者建立磁光材料實驗室，所獲補助之國科會計畫編號為 NSC 94-2112-M-415-003、94-2112-M-415-004、95-2112-M-415-001 及 96-2112-M-415-005-MY2，該研究歷經第一階段及第二階段初期經費之補助，目前方能有一定規模以進行相關實驗。在此筆者除了由衷地表達感激之外，亦堅持向精密儀器改進之路邁進，並懇請先進們持續予以筆者批評和指教。

參考文獻

1. E. R. Moog and S. D. Bader, *Superlattices Microstruct.*, **1**, 543 (1985).
 2. Z. Q. Qiu, J. Pearson, and S. D. Bader, *Phys. Rev. Lett.*, **70**, 1006 (1993).
 3. H. Y. Ho, Y. J. Chen, E. J. Hwang, S. K. Yu, and C. S. Shern, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 142505 (2007).
 4. J. Kerr, *Philos. Mag.*, **3**, 339 (1877).
 5. J. Kerr, *Philos. Mag.*, **5**, 161 (1878).
 6. R. J. Gambino and T. Suzuki, ed., *Magneto-Optic Recording Materials*, Wiley-IEEE press, 171 (1999).
 7. Z. Q. Qiu and S. D. Bader, *Rev. Sci. Instrum.*, **71**, 1243 (2000).
 8. Z. Q. Qiu and S. D. Bader, *J. Magn. Magn. Mater.*, **200**, 664 (1999).
 9. 蔡志申, 物理雙月刊, **25** (5), 605 (2005).
 10. 楊正旭, 輔仁大學物理研究所碩士論文, 42 (1999).
 11. 鄭文源, 鈷超薄膜在鈹 (111) 表面上的磁性研究: 成長與熱退火效應, 私立東海大學物理研究所碩士論文, 61 (2004).
 12. M. Faraday, *Trans. Roy. Soc. (London)*, **5**, 592 (1846).
 13. 金重勳主編, 磁性技術手冊, 中華民國磁性技術協會, 267, (2002).
 14. C. S. Arnold, M. Dunlavy, and D. Venus, *Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 4212 (1997).
 15. N. Mikuszeit, S. Pütter, R. Frömter, and H. P. Oepen, *J. Appl. Phys.*, **97**, 103107 (2005).
 16. J.-W. Lee, S.-C. Shin, and S.-K. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2458 (2003).
 17. J. Nogués and I. K. Schuller, *J. Magn. Magn. Mater.*, **192**, 203 (1999).
-
- 蘇炯武先生為國立台灣師範大學物理博士，現任國立嘉義大學應用物理系及光電暨固態電子研究所助理教授。
 - 張硯筑先生現為國立嘉義大學光電暨固態研究所碩士班學生。
 - 黃銘祥先生現為國立嘉義大學光電暨固態研究所碩士班學生。
 - 蔡宗軒先生現為國立嘉義大學光電暨固態研究所碩士班學生。
 - Chiung-Wu Su received his Ph.D. in physics from National Taiwan Normal University. He is currently an assistant professor of the Department of Applied Physics and Institute of Optoelectronics and Solid State Electronics at National Chiayi University.
 - Yen-Chu Chang is currently a M.S. student of the Institute of Optoelectronics and Solid State Electronics at National Chiayi University.
 - Ming-Siang Huang is currently a M.S. student of the Institute of Optoelectronics and Solid State Electronics at National Chiayi University.
 - Tsung-Hsuan Tsai is currently a M.S. student of the Institute of Optoelectronics and Solid State Electronics at National Chiayi University.