雙軸式光學雷射振動儀之研製

童景賢*、黃元瑞、彭偉彰、張哲魁

南亞技術學院 機械工程系

摘要

DVD 雷射頭是 DVD 光碟機中的重要元件，由於系統穩定價格便宜，因此利用 DVD 雷射頭來發展一套精密的振動量測系統是可行的。DVD 雷射頭是由雷射二極體(LD)、分光鏡、物鏡、光檢測元件、繞射光柵與圓柱透鏡等六個元件所組成的。具有體積小、重量輕、消耗的功率小、單一的輸出光譜等特點，非常符合發展測量振動的需求。DVD 雷射頭內部有一個四象限感測器(Quadrant photo-detector)，主要是接受待測物上反射鏡之反射光的受光強度，藉以量測個別不同受光的訊號 ABCD，而將四個訊號相加減，(A+C)-(B+D)，可形成 S-curve 線性，以其直線部分(約 7μm)之中點作為參考點，來判斷微小振動量的大小。

因振動產生的方向不可能是單一向，所以本研究設計可量測雙軸(X 軸及 Y 軸)的振動量的振動儀，以接收振動的訊號。機構部分是以兩片呈九十度角之彈簧鋼片相連接，以量測上下(Y 軸)與左右(X 軸)兩方向之振動量，片狀彈簧可使振動方向朝向 X 與 Y 軸運動，並且避免產生旋轉之現象。實驗結果顯示，本研究之雙軸式光學雷射振動儀可量測的最大振幅為 15μm，頻率最高為 2Hz。

關鍵字： DVD 雷射讀取頭、振動儀、四象限感測器、S 曲線

*Email : jstorng@nanya.edu.tw ;　Tel : 03-4361070 ext 6302;　Fax : 03-4384670

DEVELOPMENT OF A BIAXIAL OPTICAL LASER VIBROMETER

Jingsyan Torng*, Yuan-Ruey Huang, Wei-Chang Peng and Che-Kuei Chang

Department of Mechanical Engineering, Nanya Institute of Technology

Abstract

Laser pickup head is a key component in DVD players. With six components, a laser head includes laser diode(LD), objective lens, collimator, quadrant photodiode, diffraction grating and cylindrical lens. For being stable and inexpensive, using laser pickup head to develop a vibration measurement system is feasible. The structure of the laser head has a quadrant photo-detector, which receives the light intensity from the reflected mirror on the measured object. The formation of the S-curve is from the signal ABCD of quadrant photo-detector by (A + C) - (B + D). The linear part of S-curve is about 7μm. The midpoint of S-curve is regarded as a reference point to determine the range of vibration amplitude.

Because the direction of vibration is not able to be in one direction, this study designed to measure the vibration in biaxial direction (X-axis and Y-axis). The mechanical part is jointed with two pieces of spring steel plates at a 90 degree angle to measure the vibration in two directions of up and down (Y axis) and left and right (X axis). The leaf spring can make the vibration direction toward X and Y axis and prevent the phenomenon of rotation. After experiments, the results showed that the biaxial optical laser vibrometer is able to measure the maximum amplitude of 15μm and the maximum frequency of 2Hz.

Keywords: DVD optical pickup-head, Vibrometer, Quadrant photo-detector, S-curve

*Email : jstorng@nanya.edu.tw ;　Tel : 03-4361070 ext 6302;　Fax : 03-4384670

壹、緒論

一、研究動機

近年來，精密機械或半導體等相關的產業，都趨向精密化及細微化，因此對於奈米量測精度之要求亦日漸提昇。我國的半導體製造業之製程設計與技術，早已由微米級導入奈米等級，亦即在實際製程上已要求達到奈米等級的量測與製造精度。在 2016 年時，”十奈米製程”已是主流技術；而所謂”十奈米”是指電晶體的線寬，亦即單位面積所能容納之電晶體數。依據半導體『摩爾定律』：每隔兩年，半導體製程可將單位晶圓之電晶體數增一倍。依照此定律，兩年後的線寬要再縮小至 0.7 倍，於 2018 年時，製程技術將可提升至 7 奈米，而精密量測作為半導體製程中重要的支援技術，將更凸顯其重要性。

非接觸式量測具有效率高及不會刮傷工件等優點，尤其是對於大量資料處理具有時間優勢，最能符合高速量測的需求，所以非接觸式已成為精密量測之主流優勢。市面上之非接觸式光學量測儀，尤其是微奈米等級之光學量測儀之售價極為昂貴，較難使用於一般較低成本微量測系統上。但若考慮低成本因素，DVD 讀寫頭之應用，將是另一種選擇。 DVD 是利用光學讀取頭(Optical pickup-head)來讀取光碟片上之資料。雷射光學讀取技術經過多年來的演進，讀取範圍已進步到 DVD 的 0.74 微米軌距，而目前 DVD 之售價可低於仟元台幣，於低成本量測之發展具有很大利基。

二、研究目的

精密量測技術是所有精密機械的基礎，而其應用方面之實現之一項為「雷射量測」。因此，本計畫擬專注於應用雷射光學讀取頭於『雙軸式光學雷射振動儀』之研究，以使用於極微小振動量之測量應用上。

由於本研究是利用 DVD 光碟機上的雷射讀取頭，來研製這一套精密的雙軸式光學雷射振動儀量測系統，因此要對雷射讀取頭其運作的原理，以及讀取頭內部各個元件的功能，都要完全的深入探討與瞭解。自從光碟機開始發展以來，其內部之光學雷射讀取頭(Pickup head)技術就不斷往上延續發展，到目前為止雷射讀取頭的技術已經相當的成熟了。雷射讀取頭為 DVD 光碟機裡的重要元件，從雷射光源、光路設計以及光感測器等，其系統整合的完整度及其聚焦的特性，都適合應用雷射讀取頭於本研究所研製的振動儀上來量測微小振動量，因此是相當實用的一項元件。

三、本研究之重要性

精密工業所生產的高科技產品，在其製造的過程中，無法承受較大的環境振動。超過容許範圍的振動量，對於生產製程以及產品品質有很大的影響，尤其是半導體產業對於環境振動的要求，更為嚴格。以實例來說，台灣高鐵當年在興建時，因為車速是以三百公里行進，所以會使軌道與地面摩擦形成強烈且快速的振動，這對於南部科學園區內知名的半導體和光電大廠影響很大，因此要做「高鐵環境影響評估」。在環境評估報告中有提到：「振動之高頻部分以距高鐵中心線兩百公尺處四十五點八分貝做為振動標準，低頻部分以六十八分貝為標準」。由於高鐵公司放棄歐規系統改採日本系統，國科會擔心振動問題更嚴重，開始研究減振方案。後來華邦電子以振動過高為由，宣布撤離南科，引起震撼，國科會隨即正式提出將橋墩跨距由卅公尺縮短為六公尺的建議。由此可見，微小的振動量對半導體業的製造程序、流程及產品品質之影響是非常大。所以本研究就構想以雷射光學讀取頭研製一套量測微小振動量的系統，即雙軸式光學雷射振動儀。此自行研製之振動儀，將可大為降低成本，以使應用更為普及。

貳、文獻探討

雷射光學讀取頭與多重光學鏡片組件技術由於不斷的更新與發展，截至今日已相當成熟。從雷射讀取頭系統之整合度特性，將其應用於精密量測上是可行的，其相關之研究文獻評述於下：林威自(1999)研發表面粗度儀，使用 CD 讀取頭再加上 PD 控制器控制聚焦，當切入 S 曲線時，即可進行待測物體表面的粗度變化量測，其量測精度可達 0.2 μm [1]。陳柏廷(2002)利用 DVD 讀取頭發展表面輪廓量測儀，利用自動聚焦曲線與位移的線性關係，進入 S 曲線，配合磁滯補償，可得出物體表面高度變化。量測範圍達 1.4 mm 解析度達 40 nm [2]。Benschop 等(1991)雖然不使用 CD 讀取頭的雷射源而以大功率雷射及光纖作為新光源，但仍利用讀取頭的四象限光感測器及自動聚焦特性來量測待測物表面的變化；另外再增加一共焦感測器於雷射光源處，來量測表面反射光的相位變化，轉換為物體表面狀況的掃瞄訊號[3]。Chao 等(2003)以滑動控制模式（Sliding mode control）對四弦型聚焦驅動系統進行精密定位，其結果改進了無偏擺(Tilting)聚焦精度，並達到資料擷取之高效率[4]。Hong (2001)等研發聚焦系統並使用於線圈懸吊式（Wire Spring Suspension Type）驅動器上，以流程方式分析驅動力，其目的為減少於薄型讀取頭應用時，

其共振所產生之相位擾動現象（Phase Disturbance），並消除偏擺所引起之誤差量[5]。Lee 等(2003) 研製電磁場及線圈來降低彈性模態之產生，並產生極佳的抑制效果[6]。Han 等(2000)提出具有不同方向雙透鏡之致動器且研製出原型機，由於高頻中運轉之動件會產生彈性模態（Flexible Mode）例如音圈馬達之驅動力即是如此，此論文應用高速運轉及高儲存密度之 DVD/CD 雙系統上，具有良好改善效果[7]。He 等(2004)製作具有三軸之微小聚焦透鏡驅動器，並使用控制器補償音圈馬達之左右偏擺（tilt）方向所產生之誤差，其結果顯示穩定系統振動現象獲得改善，精確度可提高[8]。

上述研究中採用非接觸式量測法，能夠在不破壞工件的情況下，達到高精度的位移量測。且一般市售 DVD 光碟機之光學讀取頭，內含雷射二極體且光路中之鏡片模組、光檢測 IC、四弦型聚焦系統及聚焦物鏡都已模組化，因此適合應用於本研究上。

參、研究方法

一、研究方法

具有低成本、小體積等優點，本研究是使用市售的 DVD 讀取頭（Pickup head）來研製雷射探頭。DVD 讀取頭其內部除了含有讀取 DVD 所使用的雷射二極體光源（波長約為 650 nm）之外，其他的相關光學元件及結構，如圖 1 所示。應用自動功率控制電路使雷射二極體發射約 0.5mW 的 650nm 波長的紅雷射光束，經光柵衍射後形成三束檢測光，再經分光鏡、準直透鏡，將雷射光束變成準直光束，準直光束經過聚焦透鏡後彙聚在被測件上、經被測件反射的光再分別經過聚焦透鏡、準直透鏡、分光鏡和像散透鏡後，投射到四象限感測器 (four-quadrant photo detector) 上。四象限感測器會根據光點在四個象限上的分佈，輸出一個聚焦誤差電壓信號 FES (Focus Error Signal) (A+C)- (B+D)。這個聚焦誤差信號經過運算放大、補償處理，驅動音圈電機 VCM (Voice Coil Motor)並帶動聚焦透鏡一起沿光軸方向運動，直到聚焦點恰好反射面重合，從而達到自動鎖焦的目的。

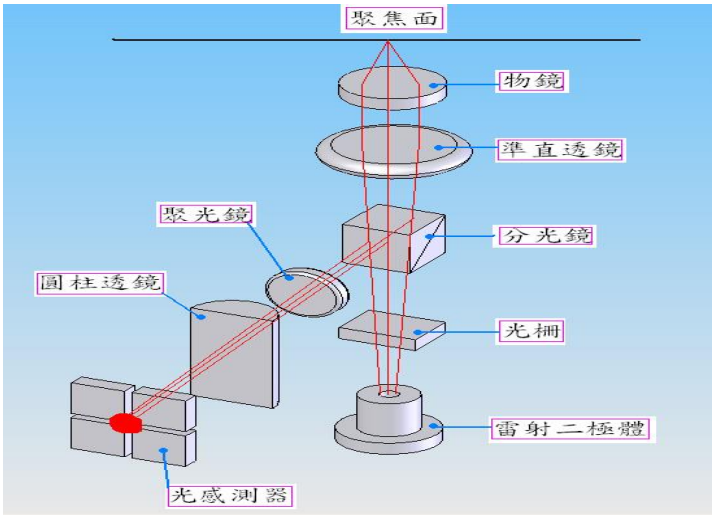

圖 1 光學讀取頭之光路構造圖

二、原理與電路

由於雷射探頭在本計畫中主要作為振動量測儀之位移測距，其重要性實為量測準確度之關鍵；因此，將雷射探頭之研究重要部分並詳述於後。

（一）APC 電路

穩定功率的雷射光源在雷射探頭系統研發時是非常重要的，APC （Automatic Power Control）電路的設計原理為: APC 電路在初始狀態下，先提供一個基準的參考電壓源，而在系統作動的同時將當時 PD 所接受的訊號與此進行比較。兩個訊號相減之後經過放大電路進而推動 LD 的驅動電路，驅動電路本身是利用一電晶體作類似開關的動作，來控制 LD 電流大小。因此在任何情況之下經由此 APC 電路的監視之下，雷射都能夠得到穩定的功率供給。本研究所製作之 APC 電路板，請參閱圖 2 及圖 3。

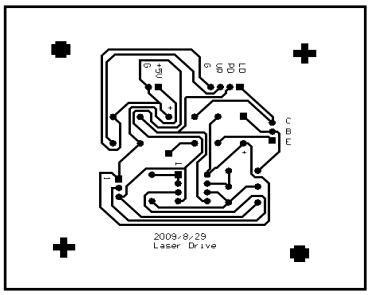

圖 2 雷射 APC 線路圖

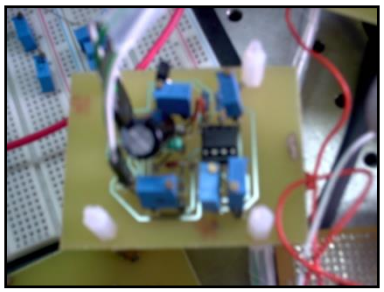

圖 3 雷射 APC 電路板

（二）光偵測器

光偵測器（Photo-detector）是將光訊號轉換為電壓訊號的感測器。其原理為檢

測入射光的光強訊號，轉換成光電流的形式，搭配適當的阻抗，可以將之轉換成電壓值。因此光偵測器可以藉著電壓訊號的強弱，判斷出入射光的位置。

在本研究中，雷射探頭內部的感測器是為四象限感測器（Quadrant detector），如圖 4。其材料為矽，感測範圍約為 12μm,當雷射光點打在檢測器上時，落在四象限檢測元件的能量不一，故訊號輸出也不一，利用光感測器訊號處理電路，比較各元件之輸出，就可獲知光點聚焦位置。

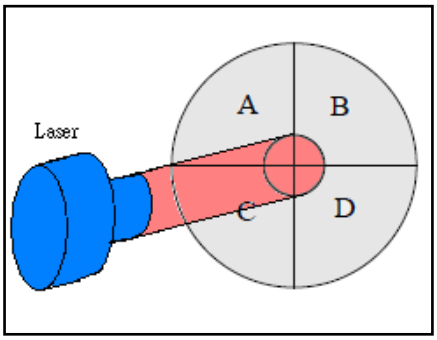

圖 4 四象限感測器位置與光點之關係

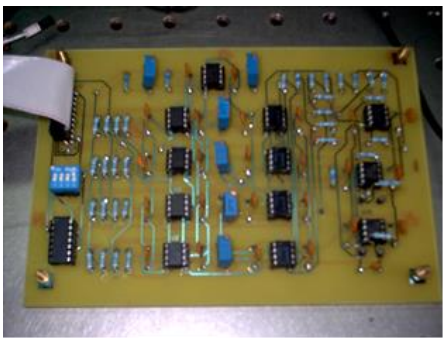

圖 5 光感測器訊號處理電路

若四象限感測器中所接收到光強訊號分別為 A，B，C 與 D，則利用四象限感測器來偵測四個象限分別的受光強度，再經後續的電路處理訊號，來計算失焦訊號(A+C)－(B+D)，其值即稱為 FES（Focus Error Signal）。而若移動聚焦位置，FES 在特定範圍可得到 S 曲線的電壓-位移之特性圖。至於光訊號處理電路測試板，則如圖 5 所示。

（三）S-曲線

若將 DVD 光學讀取頭中的音圈馬達固定，使聚焦透鏡固定不動，則系統輸出的聚焦誤差信號與聚焦點偏離反射面的距離在一定範圍內呈線性關係，又稱為 S-曲線，如圖 6 所示。

S-曲線之直線部分其電壓-位移量之比值為 1volt /1μm，而 S-曲線直線部分總位移量為 15μm。由於聚焦誤差信號具有高解析度與高精度的特性，適合用來發展奈米級的振動量測系統。

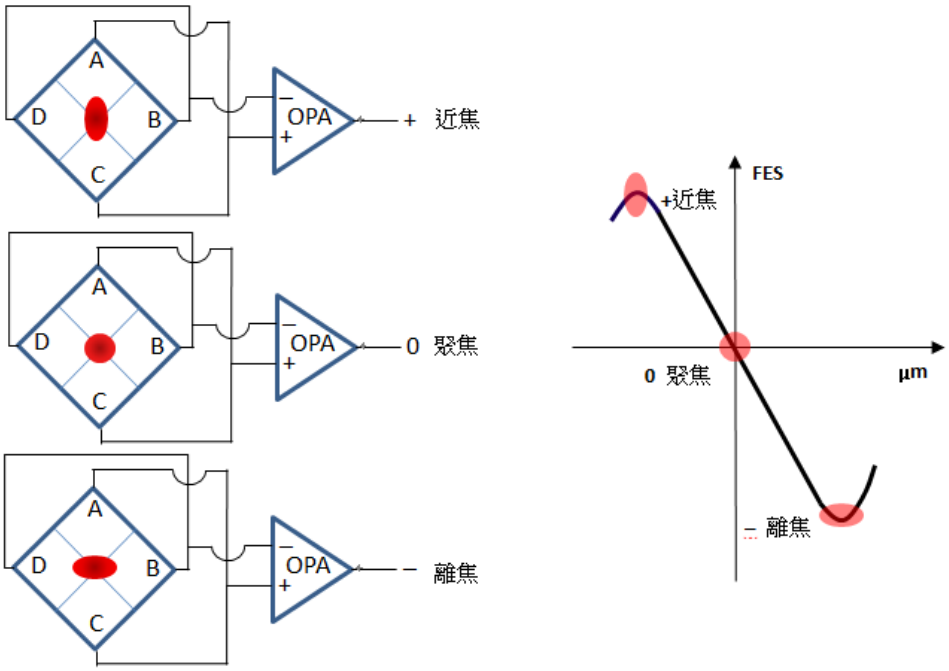

圖 6 自動聚焦雷射探頭量測範圍曲線圖

（四）資料擷取方式：LabView 程式配合 DAQ 卡

LabView程式配合DAQ卡之功能是將真實世界轉換成物理訊號。在將訊號”導入”電腦之前，先透過感測器來轉換成電子訊號(如電流和電壓)，然後透過DAQ卡來擷取傳送電腦中處理。本研究中對於四象限感測器所感測的訊號(電壓)，先用電路板將訊號放大，經由DAQ卡接收光感測器發出的訊號，再透過USB線將資料傳入電腦，由Labview圖控式語言來進行訊號擷取分析與量測，如圖7所示。、

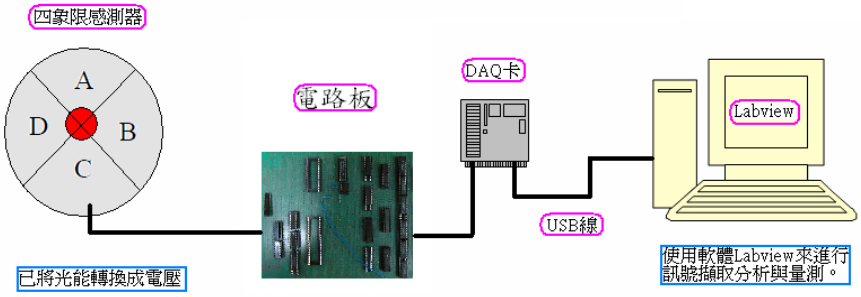

圖 7 資料擷取方式示意圖

肆、機構與光路設計分析

一、振動量測系統之機構設計

振動儀之機構是由彈簧鋼、導桿、定位螺絲及配重塊所組成，並達成二個自由度之運動，經由彈簧鋼與量測機構連接，就可組成振動儀的主要運動機構部份，其量測機構是由兩組光學讀取系統所組成。其機構與量測系統之初始設計圖，如圖 8 所示。

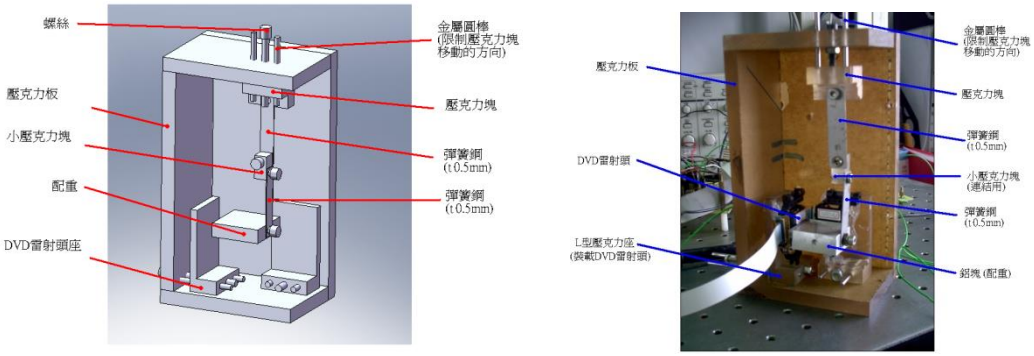

圖 8 振動儀之機構設計與實體架構圖

圖 8 為本研究之外觀機構，除了中間兩片彈簧鋼片、配重(鋁塊)以及限制壓克力(座)移動方向的金屬圓棒之外，其餘材料大部分都是使用壓克力製作。

二、量測光路設計分析

振動儀是由多種光學元件所組成，其原件主要為斜方稜鏡(RHP)、四分之一波板(Quarter Waveplate)、直角稜鏡(RAP)、無偏振分束器(NPBS)和偏振分束器(PBS)所組成。因為奈米光學尺採用全對稱設計，且利用光學軟體 lighttool 模擬其光學元件擺放的容許誤差，所以在調整上有極大的容許誤差。因為本設計的光學元件固定在調整板上再經由螺絲去進行調校，不會遇到使用膠水黏合光學元件時，發生黏合劑硬化收縮而導致鏡片偏位的問題，因此在製作與組裝上，較為簡易方便且能快速的製作成。其光路設計架構如圖 9 所示。至於光路行程之分析，則如下所示：

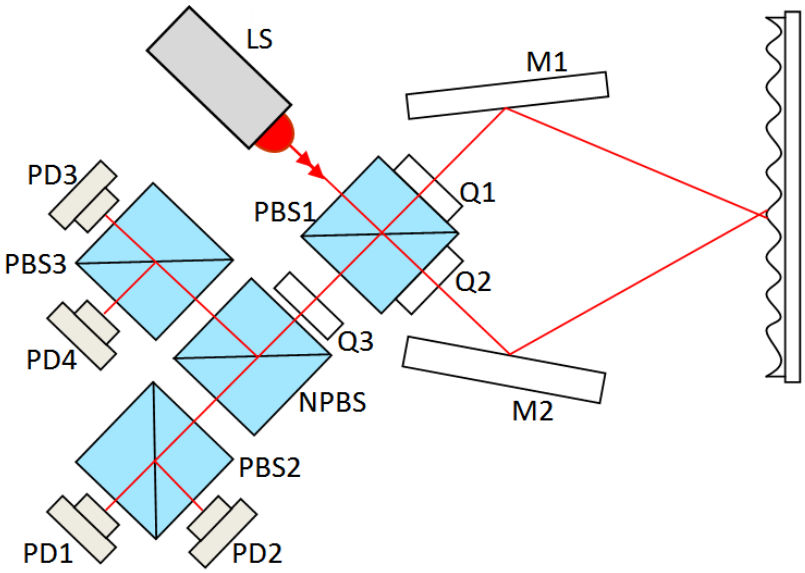

圖 9 量測光路設計圖

左光路: LS→PBS1→Q1→M1→G→M1→Q1→PBS1→Q3 (1)

右光路: LS→PBS1→Q2→M2→G→M2→Q2→PBS1→Q3 (2)

可用 Jones Vector 組成，因公式冗長不再此細列。

由 Q3 出來的光場分別為：

左光路: $$E_{Q3}^{L} = \frac{a}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

右光路: $$E_{Q3}^{R} = \frac{-a}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \tag{4}$$

再經由 NPBS 及 PBS2 與 PBS3 射到四顆光感應器(PD)的輸出電流分別為：

$$I_{PD1} = 2A^2[1+\cos(\Delta\omega t)] \tag{5}$$

$$I_{PD2} = 2A^2[1-\cos(\Delta\omega t)] \tag{6}$$

$$I_{PD3} = 2A^2[1+\sin(\Delta\omega t)] \tag{7}$$

$$I_{PD4} = 2A^2[1-\sin(\Delta\omega t)] \tag{8}$$

上述各式中的 Δω 和光柵尺的運動速度有關，濾除直流(A)後的四個訊號理論上具有正交性，可以用一般光學尺解碼原理的 Up/down counter 及細分割技術來算出位移量(Δ*x*)。

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi m}{d}\Delta x \tag{9}$$

伍、結果與討論

DVD 雷射頭在使用時須注意雷射的驅動電流量，若超過 50 毫安培，雷射頭很容易燒壞失去作用，所以雷射 APC 電路的設計是很重要的。本研究在雷射 APC 電路的修改上花了不少的時間，最後在電阻值的更換中，發現有一個電阻值會直接影響所流過的電流大小，將其換成可變電阻後，才完成這組雷射 APC 電路。微振動儀系統外觀與光感測電路整合圖，詳見圖 10。

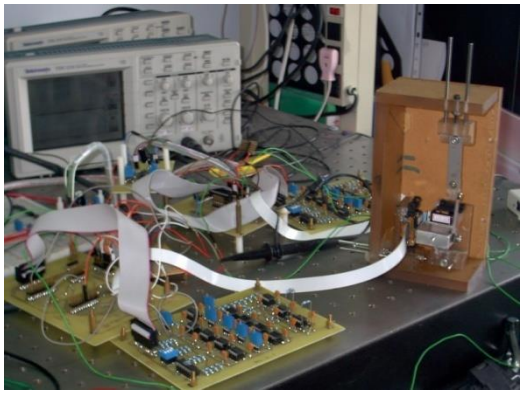

圖 10 外觀與光感測電路整合圖

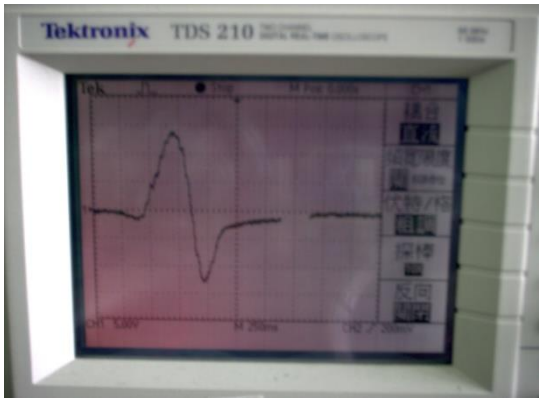

圖 11 S-曲線實際測量結果

圖 11 為光感測電路訊號處理後，所得到的失焦訊號(FES)，也就是 S-曲線。由於光感測電路板是自製的，雜訊可能會比較多，也會影響 S-曲線的能見度，所以在電路中進行濾波，可得完整的 S-曲線。

當 DAQ 卡將訊號傳入電腦後，經由 Labview 的虛擬儀表顯示。當施以外力輕碰振動儀左右方向的實驗平台上六次時，Labview 的儀表介面會及時的反應，如圖 12、圖 13 所示。以振動儀正面為基準，左右方向為 X 軸，前後方向為 Y 軸。

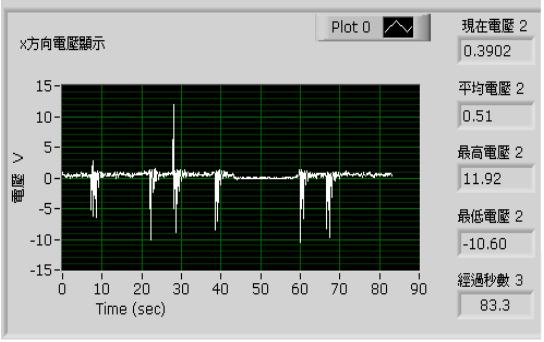

圖 12 X 軸方向電壓顯示圖

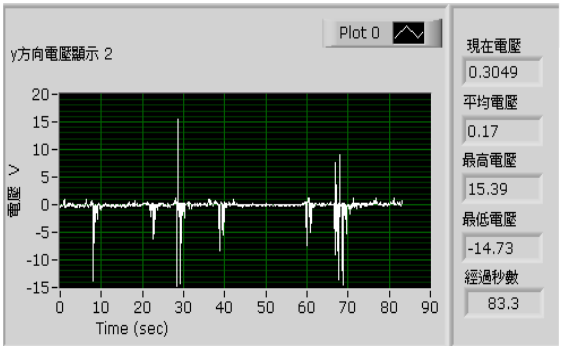

圖 13 Y 軸方向電壓顯示圖

Labview 虛擬儀表所顯示的電壓與振幅之間的關係為 1 volt=1 μm。圖 14 顯示在第 8 秒時,施予一次振動所量測的數據,Y 方向所量測到的最大振幅為 5.87 μm。在第 8 秒到第 10 秒之間共產生三次振動，經過計算，所得到能量測到的頻率為 1.5Hz。X 方向所量測到的最大振幅為 3.73 μm。在第 8 秒到第 10 秒之間共產生三次振動，經過計算，所得到能量測到的頻率為 1.5Hz。

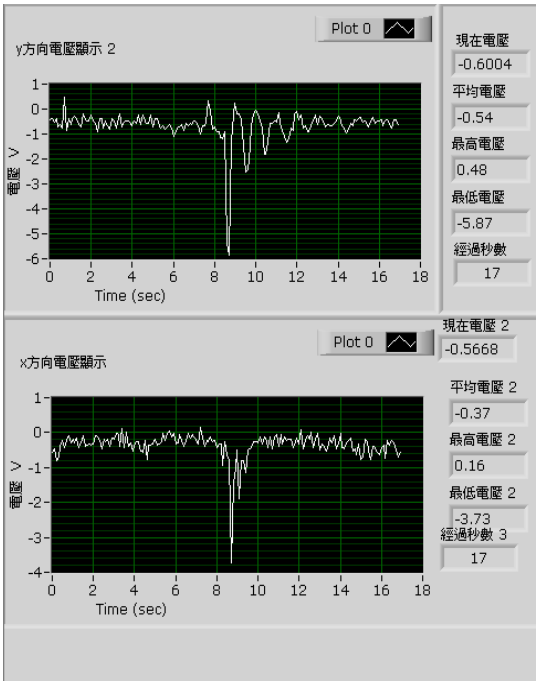

圖 14 雙軸方向電壓顯示圖

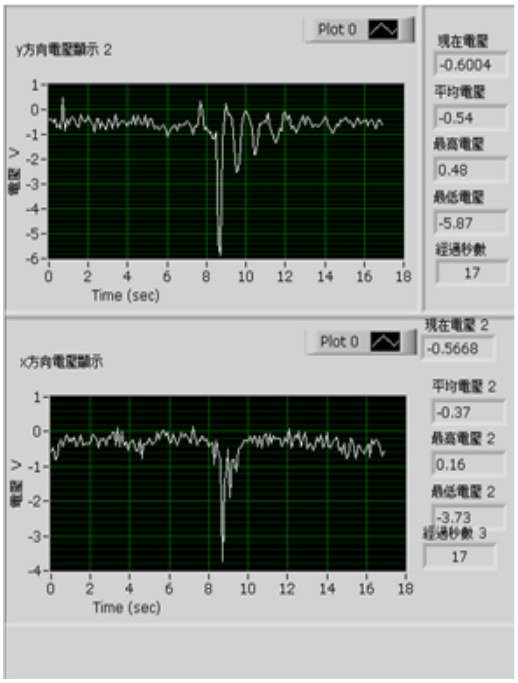

圖 15 雙軸方向電壓顯示圖

圖 15 為第 5 秒到第 10 秒之間，給予五次(一秒一次)振動所量測之數據。Y 方向所量測到的最大振幅為 14.43 μm。在第 5 秒到第 10 秒之間共產生十次振動，計算後

所得到能量測到的頻率為 2 Hz。X 方向所量測到的最大振幅為 13.25 μm。在第 5 秒到第 10 秒之間共產生四次振動，少於研究中所給予的振動次數。

關於此問題，經由數次測試後發現，X 軸方向所量測的數據會比 Y 軸所量測的減少，甚至會和研究中所給予的振動次數有差距。在經過多次測試後，發現此差距是由機構設計上所產生。在多次測試的結果觀察，證明 X 軸方向的彈簧片較不易於產生和 Y 軸一樣靈敏的振動，故在機構的設計部分還是有再修改的空間。

實務上，S-曲線太過靈敏也有缺點，因為在實驗室裡走動的腳步，也會使 S-曲線作動；以及在調整 S-曲線的時候，手若抖動，會出現一點雜訊。所以實驗的過程中，需要控制周遭環境周會產生振動的原因，進而確保本研究的精準度。最後由量測數據統整的結果顯示，本研究之雙軸式光學雷射振動儀可量測的最大振幅為 15 μm，頻率最高為 2 Hz。

陸、結論

本研究『雙軸式光學雷射振動儀系統』裡的 DVD 雷射頭是從 DVD 光碟機裡拆解的，在成本上差不多壹千元，如果能夠直接廠商購買 DVD 雷射頭零件，成本可大為降低。此『雙軸式光學雷射振動儀』精度高達 15μm，雖然比不上市面上售價昂貴之光學振動儀，若考量研製的低成本卻能量測出高精度，則本研究之成果的確能夠符合工業界之需求。

參考文獻

[1] 林威自(1999)《超精密雷射自動聚焦探頭及系統之研製》，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文。

[2] 陳柏廷(2002)《DVD 光學自動聚焦探頭非線性系統之研究》，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文。

[3] Benschop, J.; Rosmalen, G.V., (1991) “Confocal compact scanning optical microscope based on compact disc technology”, *Applied Optics*, April 1, Vol. 30, No. 10, pp.1179-1184.

[4] Chao, P.C.P.; Lai, C-L; Huang, J-S; (2003) ”Nonlinear dynamic analysis and actuation strategy for a three-DOF four-wire type optical pickup”, *Sensors and*

Actuators, A.105 , pp.171-182.

[5] Hong, S-N; Choi, I-H; Kim, Y-J; Suh, M-S and Kim, J-Y; (2001) ”Force Characteristics of Slim Pickup Actuator to Improve Actuating Performances”, *Journal of the Japan Society of Applied Physics*, Vol. 40, pp.1771-1774.

[6] Lee, K.T.; Kim, C.J.; Park, N.C.; Park, Y.P. (2003) ”Improvement of dynamic characteristics for optical pickup actuator by magnetic circuit”, *Microsystem Technologies*, Vol.9, pp.232-242.

[7] Han, C.S.; Lee, J.; Kim, S.; (2000) ”Digital Versatile Disc/Compact Disc-Compatible Pickup Head with Dual-Lens Lever Actuator for Next-Generation Applications”, *Journal of the Japan Society of Applied Physics*, Vol. 39, pp.2630-2634.

[8] He, N; Jia, W.; Yu, D.; Huang, L.; Gong, M.; (2004) ”A novel type of 3-axis lens actuator with tilt compensation for high-density optical disc system”, *Sensors and Actuators*, A.115,pp. 126-132.