

# 可調式共焦系統應用於透明物件厚度量測

## Thickness Measurement of Transparent Target Using A Confocal Sensor

盧柏榕、范振亮、鄭璧瑩、翁俊仁

Bo-Rong Lu, Chen-Liang Fan, Pi-Ying Cheng, Chun-Jen Weng

本研究為可變焦透鏡運用在共焦測距系統上，進行透明物件的厚度量測。將待測物放置在測量範圍內，再利用可變焦透鏡可以快速改變焦距的特性進行厚度的量測，因為待測物是透明的，所以探測光在穿透待測物的過程中會經過兩次介質的轉換，而當光線聚焦在待測物的表面時會反射回相對大能量的反射線，光功率計會偵測到反射光的峰值，在利用功率計以及 LabVIEW 程式，建立電流以及反射能量的關係圖，並從數據中分析到兩個峰值後，找出當時的對應電流以及對應到的位置，即可透過這些資訊分析出物體的厚度。

The work shows a confocal displacement sensor with a varifocal lens, which is driven through different current to change its focal length. The study shows the measuring results of the thickness of transparent object. With power meter measuring the power and LabVIEW program recording the power-current graph, which with two peak powers are presented and the current gap between two peaks could be transferred to two displacements to what the spacing is between is the thickness.

### 一、前言

至今已有多數共焦感測器運用於距離量測的研究被發表，共焦感測器搭配光纖的應用，可以使整體的架構更輕便體積更小，而且此方法可以避免對待測物造成接觸式的傷害，共焦雷射測距系統是基於共焦顯微鏡的技術發展出來的，一般的進行單點位置的掃描是搭配馬達進行 XY 軸以及 Z 軸的移動，並且透過 Z 軸移動偵測不同位置的反射信號，再透過分析這些信號以達到距離量測的目的，

由於 Z 軸方向的對焦需要配合 Z 軸馬達的移動，因此速度上並不算快速。近期也有許多可變焦透鏡運用在距離量測的論文被提出<sup>(1-4)</sup>，可變焦透鏡的特色為透過一些方法使得透鏡達到快速變焦的效果，例如一種方式是用電流驅動使得透鏡曲度改變得到變焦效果。變焦透鏡利用此特性取代 Z 軸馬達，可以使量測速度大幅提升。而與傳統的接觸式探針方法比較，傳統方法透過探針與待測物的表面接觸取得表面形貌及距離等資訊<sup>(5)</sup>，但此方法可能會對物體的表面造成接觸式的破壞，所以此方法並

不適合脆弱、昂貴的待測物。相較之下共焦感測器配合可變焦透鏡所組成的距離量測系統，不但不會對物體造成接觸式的傷害，而且還有更高的穩定性、精度以及更小的體積。光在通過不同介質時，會有折射角度的變化使得路徑改變，所以第二組反射光的數據必須經過校正，才能在兩個表面間測量到精確的厚度<sup>(6)</sup>，一樣運用光學量測，有一種獨特的數值分析方法可以應用在透鏡鏡心厚度的量測<sup>(7)</sup>，也有一種儀器稱做 ConoPoint-3R，它可以測量距離以及透明物體厚度<sup>(8)</sup>，也有一種方式運用兩個感測透鏡及雙共焦原理，搭配光纖測量物體厚度<sup>(9-10)</sup>，此共焦量測技術，可以運用在探測晶圓孔洞的相對深度，或是單純掃描出物體的形貌，文獻上亦有配合反射光譜術 (spectral reflectometry) 量測孔洞輪廓的形貌<sup>(11-12)</sup>。本篇文章是基於我們所發表之文獻並外加一些新的實驗數據所整理分析撰寫而成<sup>(13)</sup>。本研究我們建立了共焦感測器搭配可變焦透鏡的測距系統，當雷射光通過可變焦透鏡以及物鏡，且聚焦在待測物表面時，光功率計會觀察到能量最大的反射信號。另一方面，如果焦點距離待測物表面較遠，那麼偵測到的能量會變小，且顯示的光點也會比較大。可變焦透鏡的焦距會隨著輸入電流大小 0 mA 到 290 mA 而產生改變，在一個共焦訊號中，反射能量及電流的關係曲線呈現高斯曲線分布，而曲線的峰值代表著光點與可變焦透鏡的距離。接著我們將待測物替換成透明待測物，當光通過待測物正反表面時，由於傳遞介質改變分別會被反射一次較大能量的反射光，因為此關係，感測器會感測到兩組共焦訊號，將反射光強度與輸入電流做成圖，可以看出兩個呈現高斯分布的曲線合併在一起，我們將數值較高的曲線峰值對應到的位置減去數值較小的曲線峰值對應到的位置並分析他，即可得到物體的厚度。

## 二、原理及系統架設

### 1. 共焦測距的原理

根據共焦理論，探測光通過透鏡時因介質不同傳遞速度也會不同而產生折射現象，利用此現象將光聚焦在一個點，在那個點它的能量密度會是最大

的，接著探測光通過聚焦點並開始發散。以我們的架構為例，探測光沿著 Z 軸通過可變焦透鏡接著到達平台上的探測物，光線在 Z 軸不同位置時，其能量密度是不同的，在共焦的位置上，其能量密度是最大的，當待測物表面在來到共焦點上時，功率計會讀取到最大的讀值如圖 1(a) 曲線的峰值。我們將鏡面待測物放置在平台上，且同時也位在焦點上看出光點最小且中央點的能量密度最大 (最亮) 的一張圖，如圖 1(b)，當我們把焦點遠離鏡面待測物較遠，不管向上或向下的方向移動待測物去遠離焦點，可以看出光點會變大，且其中央的能量密度也較小，它的能量密度隨著離焦點越遠變得越小，符合下列方程式，並且可由方程式繪製出圖 1(a)。

$$I(z) = I_0 \left( \frac{\sin(2\pi\lambda z(1 - \cos\alpha))}{2\pi\lambda z(1 - \cos\alpha)} \right)^2 \quad (1)$$

$$\text{FWHM} = 2z_{1/2} = \frac{0.443\lambda}{1 - \cos\alpha} \quad (2)$$

圖 1(b) 的光源波長為 488 nm 的藍光雷射，並使它穿過可變焦透鏡，將待測物放置在可變焦透鏡輸入電流為 0 mA 時的焦點下，可以看出此時的光點最小亮度也最高，我們在待測物不動的情況下使驅動電流增大，此會改變可變焦透鏡的焦距，使得聚焦位置離待測物表面越來越遠，如圖 1(b) 的 50 mA 與 200 mA 所示，可以看出電流越大光點也隨著變大，而光點中央的亮度也隨之減少。入射光接觸到待測物時會反射，光功率計可讀取反射回來的光，當入射光與待測物表面為垂直關係時，光會沿著入射路徑反射回去。決定反射光強度有兩個因素，分別為有多少量的光反射回感測器以及光圈孔徑的大小，光圈面積的大小會限制光通過的數量。由圖 1(b) 可以看出光的能量會分布在光點的大小中，由於偵測到的反射光幾乎是由光點中央點反射回來，而光點中央的光量會是整個光點的一小部分，由圖 1(b) 可以看出物體位於輸入電流 0 mA 時的焦點上，所以可以偵測到強度最高的反射光，而電流隨之增大光點也會增大使得光點中央的反射光量會下降，所以偵測到的反射光強度也會較小。

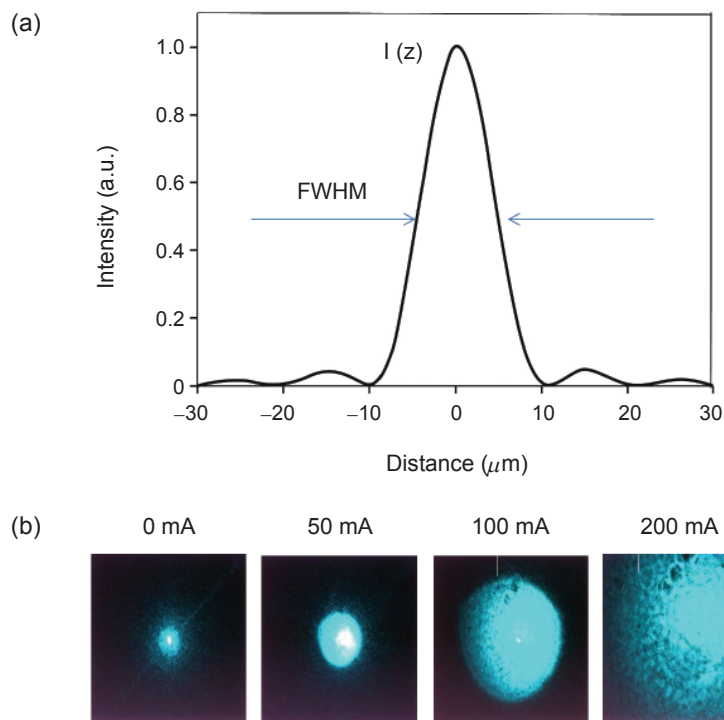


圖 1. (a) 共焦信號位置－能量圖、(b) 在不同輸入電流下，以藍光雷射作為輸入光源，並由可變焦透鏡聚焦後呈現的光點變化圖。

一般的共焦位置感測器運作方式為，探測光通過透鏡及物鏡並到達待測物表面上，但此種方式的焦距是固定的，所以必須透過  $Z$  軸馬達移動，才能偵測到不同數值的反射光並分析他的位置，而本研究所使用的系統可以透過可變焦透鏡取代  $Z$  軸的馬達，透過輸入至可變焦透鏡的電流從  $0-290$  mA 改變，焦距也會不斷的改變，其電流增量的最小值為  $0.1$  mA，接著蒐集反射光的數值並分析，透過這種方式，只要在量測範圍內，即使不用移動  $Z$  軸平台也可以達到測距或測量厚度的目的。透過程式控制輸入電流，再使用光功率計以固定頻率的速度接收反射光，最後用程式分析數據並作圖，只要待測物表面在量測範圍內，可以看出反射光的數據呈現高斯分布，而曲線峰值代表著最大反射能量，而此時電流所對應到的焦距代表著透鏡與待測物表面的距離，如果待測物是透明的，探測光會在待測物上下表面分別反射一次垂直方向的反射光，所以總共

會偵測到兩組反射光數值，也會呈現兩組高斯分布的曲線，強度較高的曲線是接近透鏡那一側的表面，而強度較小的是離透鏡較遠的表面，將兩組共焦電流對應位置的數值相減並經過式子校正即可量測出透明待測物厚度。然而，在介質不同的面上光的路徑會發生改變，此現象為 Snell's law 造成，如圖 2 所示，光波通過不同的介質，由於傳遞速度不同，因此產生偏差角，而此偏差角由物體的介質決定，待測物介質不同聚焦在第二個表面的點也會不同，通常我們定義空氣的折射率為 1，而玻璃的折射率為 1.5，因此在光從空氣進入玻璃的傳遞中，光的路徑會偏向法線，此會使得光的焦聚聚焦在更遠的地方，因此在待測物第二面的反射光所顯示的位置數據通常會比實際位置近，量測過程中焦距會減少使得探測光可以聚焦在第二個表面，這意味著位置感測器會偵測到較大的輸入電流。因此我們推導以下式子來做透明待測物量測的校正確方程式。

校正公式需要由一個相同介質的待測物做一個起始待測物，以下以蓋玻片為一個起始待測物，我們要先知道起始待測物的真正厚度，藉由電子游標卡尺測得其厚度為 0.13 mm，我們藉由起始待測物的真正厚度來算出以下推導式子中的  $Z$  值，藉由得到  $Z$  值，我們就可以以此量出同一個介質下不同厚度待測物的厚度值，而  $Z$  值中式子假設介質相同以及假設入射角  $\theta_1$  與折射角  $\theta_2$  相同。我們由幾何光學的折射率公式可知道：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3)$$

由於  $n_1$  為空氣的折射率，因此其值為 1， $n_2$  為待測物的折射率，由圖 2 中的  $x$  值可以觀察出  $x$  同為兩個三角形角度  $\theta_1$  與  $\theta_2$  的對邊，用其來表示  $d_1$  與  $d_2$  的關係，最後要推導出與之間的關係式，推導如下：

$$x = d_1 \times \tan \theta_1 = (d_1 + d_2) \times \tan \theta_2 \quad (4)$$

從這個式子可以推導出

$$d_2 = d_1 \times \left( \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} - 1 \right) \quad (5)$$

根據三角函數代入公式則可得：

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1}}{\frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2}} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \times \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} = n_2 \times \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} \quad (6)$$

帶入 (6) 可得

$$d_2 = d_1 \times \left( n_2 \times \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} - 1 \right) \quad (7)$$

我們令  $n_2 \times \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} = Z$ ，並帶入式子 (6) 可得出  $d_1$  與  $d_2$  之間的關係式，

$$d_2 = d_1 \times (Z - 1) \quad (8)$$

最後可以得到物體厚度為  $d_1 + d_2$ 。

## 2. 系統配置

圖 3 為共焦距離感測器的示意圖以及變焦透鏡的照片，以多波長雷射作為雷射光源並通過光纖、可變焦透鏡以及物鏡。變焦透鏡的焦距隨著輸入電流的增大而隨之減小，在物鏡方面，可透過選擇不同的物鏡來改變聚焦的範圍與精度。藉由變焦透鏡

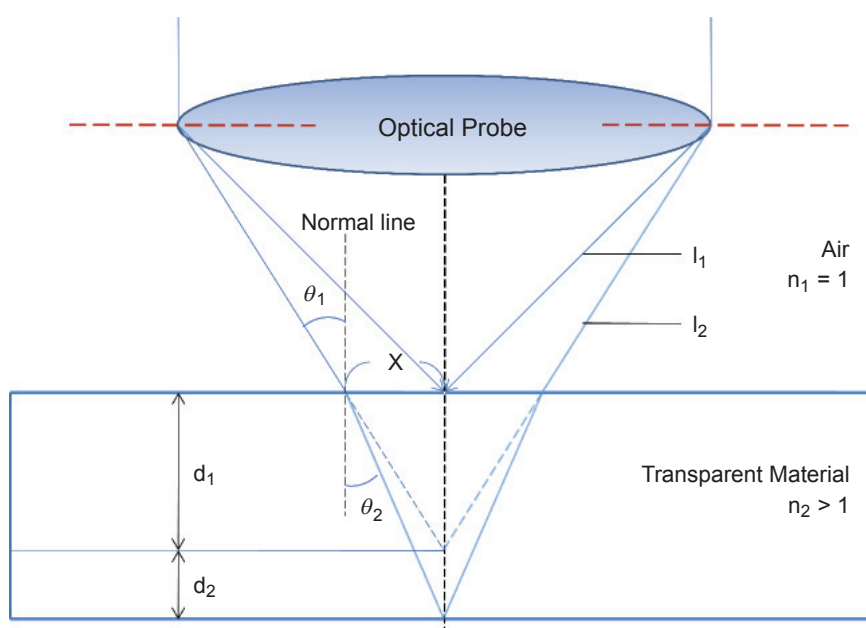


圖 2. 透明物件折射示意圖。

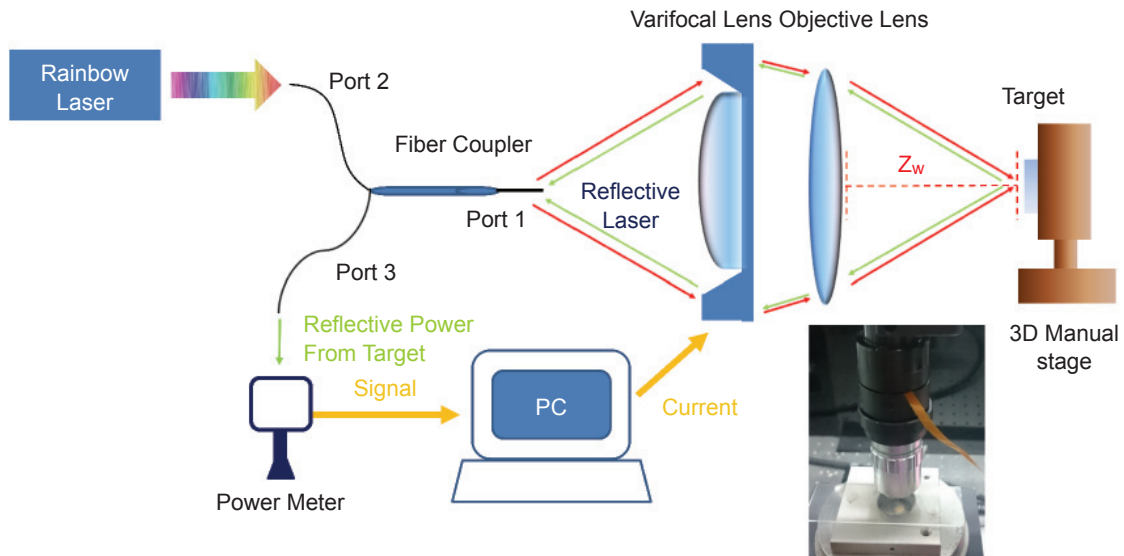


圖 3. 系統配置與共焦距離感測器。

與適合的物鏡搭配，我們先手動把透明待測物放在可量測的範圍內，因此在進行量測時可以明顯的觀察到兩組不同的共焦訊號，反射光分別進入光纖的 port2 以及 port3，而 port3 連接到功率計可以取得反射光能量讀值，能量讀值會傳給電腦端，電腦端利用 LabVIEW 程式記錄能量讀值與對應的電流，並分析數據找出其共焦信號。

### 3. LabVIEW 介面

在此系統，我們 LabVIEW 控制這個光量測系統的所有硬體，包括可變焦透鏡及功率計，使用 LabVIEW 可以使整個量測系統自動化，程式介面如圖 4(a)。在程式端，我們必須設定好適當的起始電流、終止電流、電流的增長間隔與電流的驅動次數這些參數。可變焦透鏡的光焦度與焦距為反比關係，焦距與輸入電流成反比關係，所以光焦度與輸入電流為正比關係，光焦度的範圍為 8 dpt 到 22 dpt，透鏡的反應時間為小於 15 毫秒，但光功率計的接收頻率為 10 Hz，因此可變焦透鏡的輸入電流由 0 mA – 290 mA 並以每次增長 1 mA 的單點掃描過程總共所需時間為 2.9 秒。在量測的一開始，我們需要手動把待測物移動至 z 軸上可量測的範圍之內，我們先設定輸入電流的範圍為 0 mA – 290 mA 以及比較寬的電流增量，進行全域掃描並偵測是否得到兩個高斯分布曲線，如圖 4(a) 所示，如

果沒有量測到兩個高斯分布曲線，那麼就要不斷調整待測物位置直到偵測到兩個共焦訊號的出現，當成功量測到兩個共焦訊號時，我們再將電流的增長間隔設定為每次 1 mA，這樣做可以確保得到更好的準確度。整個量測過程可以分為五個步驟，如圖 4(a) 所示，第一步我們將透明待測物放置在平台上，第二步將待測物位置調整至量測範圍內，第三步我們執行程式送出驅動電流，光功率計會讀取反射光能量並傳值給程式端，程式端對共焦訊號做出圖形，第四步找出兩者共焦訊號峰值的對應電流，並找出其對應的位置，第五步將較大的位置值減去較小的位置值，可以得出粗略的厚度，另外，我們運用校正曲線校正待測物的二面的位置值使其量次的厚度更為精確。

### 三、實驗結果與討論

步階掃描線為每沿著 Z 軸移動 20  $\mu\text{m}$  記錄一個點，共記錄 50 個測量點，並記錄每個點所對應到的共焦電流，位置與共焦電流的關係圖如圖 5 黑色線所示，我們把黑色線做擬合得出紅色擬合線，擬合線會是本篇研究上共焦電流取得對應位置值的函數。圖 5 的步階掃描線以及擬合曲線可以看出焦距與輸入電流呈現接近線性的關係，我們利用反射光的共焦訊號配合擬合曲線可以找到曲線峰值所對

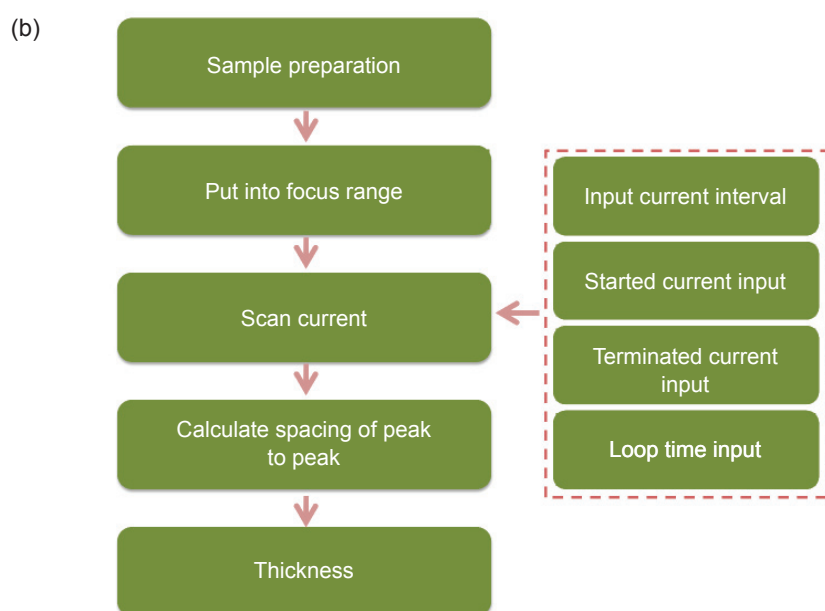
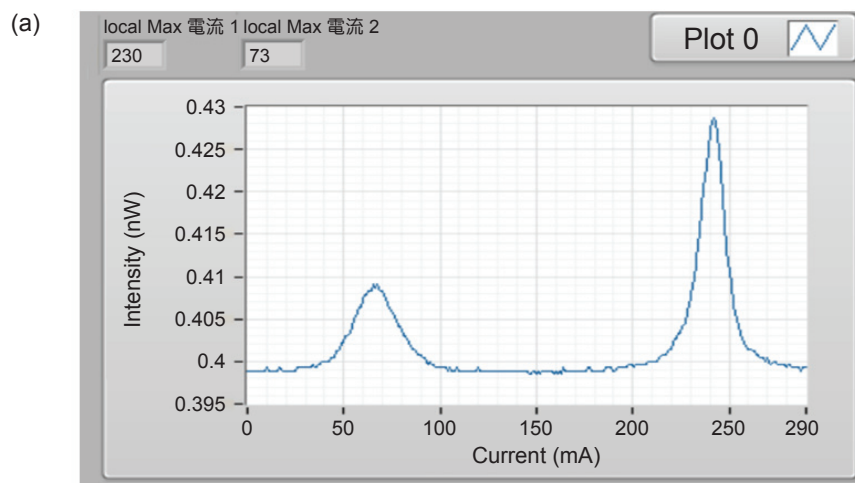


圖 4. (a) Lab VIEW 介面圖、(b) 厚度測量流程圖。

應到的位置並且推測出物體厚度。

實驗上我們選擇兩個待測物體進行量測，分別為載玻片 (slide glass) 與蓋玻片 (cover glass)，首先我們利用電子游標卡尺測量，這兩個物體厚度分別為 1.01 mm 與 0.13 mm，這兩者量測值將是我們實驗的對照組。我們運用光功率計當作接收能量的接收器，藍光雷射為光源，驅動電流上我們以離散電流的方式來驅動變焦透鏡達到焦距上線性的變化。我們第一個量測物為載玻片，設定輸入電流從 0 mA 開始每次增長 1 mA 增長至 290 mA 做一次電流遞增的變焦掃描，測量結果如圖 6(a) 所示，圖中可以看出我們得到兩組高斯分布的曲線分別有兩

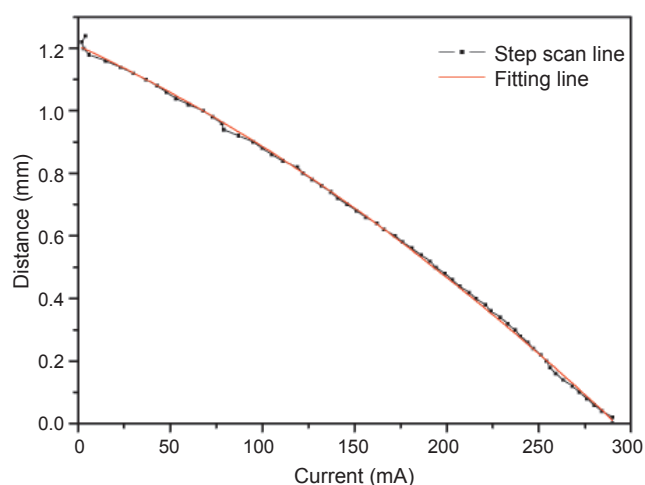


圖 5. 步階掃描曲線與擬合線。

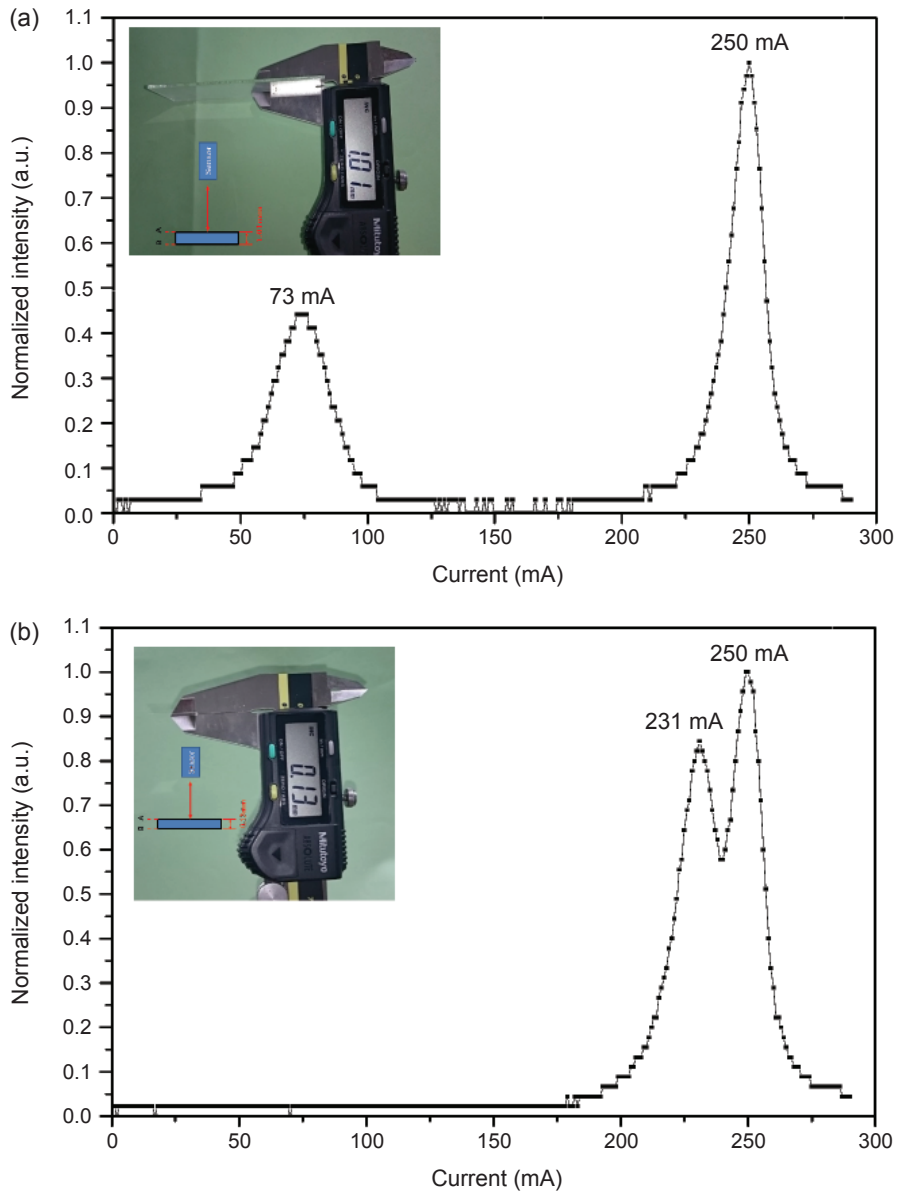


圖 6. (a) 載玻片的厚度及其實驗數據、(b) 蓋玻片的厚度及其實驗數據。

個峰值，而其峰值對應到的共焦電流分別為 73 mA 以及 250 mA，在擬合線上對應到的位置分別為 0.98 mm 以及 0.22 mm，再經由校正函式校正折射造成的誤差可得出量測厚度為 1.03 mm，與電子游標卡尺測量出 1.01 mm 的結果相比誤差為 2.04%。接著我們將待測物換成厚度為 0.13 mm 的蓋玻片後重複先前的步驟，測量結果如圖 6(b) 所示，可以看出兩組的高斯分布曲線有部分疊合以至於難以明顯觀察出兩個完整的高斯曲線，但仍然可以觀察到兩個峰值，其對應到的共焦電流分別為 231 mA 及 250 mA，在擬合線上對應到的位置分別為 0.319

mm 及 0.223 mm，再經由校正函式校正折射造成的誤差可得出量測厚度為 0.127 mm，與游標卡尺測量出的 0.13 mm 的結果相比誤差為 2.0%，誤差來源推測可能跟系統架設傾斜有關，未來續進一步調校，改善量測誤差。

#### 四、結論

本研究建立起共焦距離感測器搭配可變焦透鏡以及物鏡的厚度量測系統，根據共焦理論，我們在載玻片及蓋玻片的測量上都可以偵測到呈現高斯曲

線分布的兩組反射光數據，並可以觀察到兩個曲線的峰值與對應的位置，由兩個位置相減可得出待測物的粗略厚度值，兩組實驗有些微誤差，但是兩組誤差百分比都很相近，我們歸納可能的因素，誤差來源推測可能跟系統架設傾斜有關，未來將持續進一步調校，改善量測誤差。

## 參考文獻

1. H.-J. Jordan, M. Wegner, and H. J. Tiziani, *Meas. Sci. Technol.*, **9**, 1142 (1998).
2. Dong-Ryoung Lee, Suin Jang, Min Woo Lee, Hongki Yoo, *Applied Optics*, **55** (27), 7631 (2016).
3. K. Noda, N. Binh-Khiem, Y. Takei, T. Takahata, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Multi-axial confocal distance sensor using varifocal liquid lens," *IEEE Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, June 16-20 (2013).
4. Joey M. Jabbour, Bilal H. Malik, Cory Olsovsky, Rodrigo Cuenca, Shuna Cheng, Javier A. Jo, Yi-Shing Lisa Cheng, John M. Wright, and Kristen C. Maitland, *Biomedical Optics Express*, **5**, 652 (2014).
5. Garry Berkovic, Ehud Shafir, "New Algorithm of measuring the cone section with the coordinate machine measurement," *IEEE International Conference on Optoelectronics and Microelectronics*, Aug 23-25 (2012).
6. Matthias Kunkel, Jochen Schulze, Precitec Optronik GmbH, Rodgau, *Glass Science and Technology*, **78** (2005).
7. Chia-Yen Chan, Po-Han Huang, Yu-Cheng Cheng, Shenq-Tsong Chang, Ting-Ming Huang, and Chien-Liang Lin, "A Novel Nondestructive Determination of Refractive Indices and Thicknesses of Transparent Lenses," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, May 10-12 (2011).
8. ConoPoint-3R Laser distance sensor. *Optimet: Non contact measurement systems*. Retrieved from <http://www.optimet.com>
9. Ilko K. Ilev, Ronald W. Waynant, Kimberly R. Byrnes, Juanita J. Anders, *Optics Letters*, **27** (19), 1693 (2002).
10. Garry Berkovic, Ehud Shafir, *Advances in Optics and Photonics*, **4**, 441 (2012).
11. Yi-Sha Ku, Kuo Cheng Huang, Weite Hsu, *Optics Express*, **19** (7), 6006 (2011).
12. Yi-Sha Ku, Fu Shiang Yang, *Optics Express*, **18**, 7280 (2010).
13. C. J. Weng, B. R. Lu, P. Y. Cheng, C. H. Hwang, C.Y. Chen, "Measuring the thickness of transparent objects using a confocal displacement sensor," *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 978-1, May 22-25 (2017).

## 誌謝

感謝科技部計畫 MOST 106-2622-E-492-004-CC3 之經費補助。



盧柏榕先生為國立交通大學機械所碩士，現為欣銓科技股份有限公司工程師。

Bo-Rong Lu received his M.S. in mechanical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an engineer in Ardentec Co., Ltd..



范振亮先生現為國立交通大學機械所碩士生。

Chen-Liang Fan is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at National Chiao Tung University.



鄭璧瑩先生為國立成功大學機械研究所博士，現任國立交通大學機械系副教授。

Pi-Ying Cheng received his Ph.D. in mechanical engineering from National National Cheng Kung University. He is currently an associate professor in the Department of Mechanical Engineering at National Chiao Tung University.



翁俊仁先生為國立交通大學光電工程研究所博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Chun-Jen Weng received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at the Instrument Technology Research Center of National Applied Research Laboratories.