

## Mirau 干涉術應用於超音波量測之研究

何展効<sup>1</sup>、施學兢<sup>2</sup>、李朱育<sup>3</sup>、劉育翔<sup>4</sup>、吳財福<sup>5</sup>

<sup>1245</sup>工業技術研究院量測技術發展中心，<sup>3</sup>中央大學光機電研究所

<sup>1</sup>新竹市光復路二段 321 號 16 館

電話：03-5732271 Fax：03-5726446

E-mail：JohnnyHo@itri.org.tw

### 摘要

相較於傳統的超音波，利用雷射超音波產生與偵測的非接觸特性存在許多優點。在雷射超音波的訊號偵測方面是採用光學干涉儀，利用干涉儀偵測超音波的主要優點是非接觸式的檢測。有別於傳統接觸式的超音波探頭，雷射光無需將探頭貼於待測物表面，可做遠距量測、高溫物體量測。此外量測頻寬亦較接觸式探頭為寬，縱向解析度達奈米或奈米以下，光學系統可用顯微鏡技術縮小偵測點，進一步將橫向解析度向下延伸至微米等級。用具有高解析度、高工作穩定度，架構簡單且成本比較低等特色的干涉儀作為超音波接收器是很重要的。本文主旨是介紹一種以 Mirau 干涉顯微鏡為基礎的超音波量測技術及其應用，其中包括其干涉的原理、穩定光程差方法、實驗架構與結果。

關鍵字：雷射超音波，Mirau 干涉顯微鏡，材料性質，楊氏模數

### 壹、前言

傳統的超音波非破壞檢測方法分為兩部份，一為超音波激發，一為超音波接收，這兩部份傳統上均以接觸式探頭達成。相較於傳統的超音波，利用雷射超音波產生與偵測的非接觸特性存在許多優點。在雷射超音波的訊號偵測方面是採用光學干涉儀，利用干涉儀偵測超音波的主要優點是非接觸式的檢測。有別於傳統接觸式的超音波探頭，雷射光無需將探頭貼於待測物表面，可做遠距量測、高溫物體量測。此外量測頻寬亦較接觸式探頭為寬，縱向解析度達奈米或奈米以下，光學系統可用顯微鏡技術縮小偵測點，進一步將橫向解析度向下延伸至微米等級。目前國內外已經提出多種不同光學干涉儀的方式接收，如 Michelson，Mach Zehnder[1]、Confocal Fabry Perot、干涉儀[2-5]，但是在使用上存在某些限制。用具有高解析度、高工作穩定度，架構簡單且成本比較低等特色的干涉儀作為超音波接收器是很重要的。本文主旨是介紹一種以 Mirau 干涉顯微鏡為基礎的超音波量測技術及其應用，其中包括其干涉的原理、穩定光程差方法、實驗架構與結果。

### 貳、Mirau 干涉儀原理

目前常見的干涉儀類型包括：白光干涉儀，都卜勒干涉儀，Fabry-Perot 干涉儀等。依據他們的特性，分別被應用在不同的量測領域。例如白光干涉儀可測量表面輪廓，都卜勒干涉儀

可測量振動量，Fabry-Perot 干涉儀則用來分析光譜或更為精密位移量測。我們研究目的是要利用表面超音波的波傳特性，量測試片的楊氏係數。而偵測超音波的方法是與都卜勒干涉儀類似的 Mirau 干涉技術。Mirau 干涉儀最主要的用途是階高、表面粗糙度、微小元件表面形貌量測等[6]。它的外型與一般的顯微物鏡類似。它通常是在顯微鏡的架構下工作，也就是說，它除了具有光學干涉儀的功能外，也可以有顯微放大的功能。它與一般的顯微物鏡最大的差別是在鏡頭內部的設計，如圖 1 所示。它的內部多了一個分光鏡與一個參考面鏡。光線經由顯微物鏡聚焦至試片表面，在途中，部分的光線被分光鏡反射至參考面鏡。由於參考面鏡與試片相對於分光鏡的距離相同，因此經由參考面鏡及試片反射的光線會重合在一起，然後產生干涉現象。在作表面粗糙度或階高量測時，通常會使用白光光源，也就是說，當干涉發生

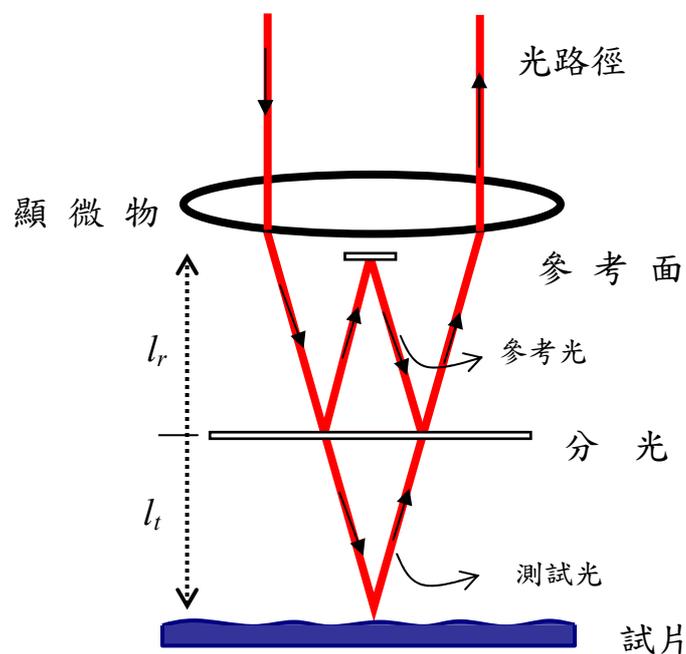


圖 1，Mirau 物鏡的內部結構

時，可以從目鏡觀察到彩色的干涉條紋。由於白光的同調長度很短（約  $2 \mu\text{m}$ ），因此干涉條紋出現的條件相當嚴格。在量測階高時，一般是利用壓電晶體推動試片的高度位置，當試片表面某個位置的高度滿足干涉條件時，則記錄當時推動壓電晶體的壓電值與試片表面位置。如此，可將試片的表面形貌量出來。

為了偵測超音波的波傳行為，我們以波長  $532 \text{ nm}$  的單頻雷射為 Mirau 干涉儀的光源，如圖 1 所示。當超音波傳遞到試片表面時，會使表面振動。一般而言，超音波的振幅約為幾個奈米，頻率則約為幾個 MHz 或更高。他的振動形式可寫為：

$$\delta = \delta_0 \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

其中  $\delta_0$  與  $f$  分別為超音波的振幅與頻率。Mirau 干涉儀中，分光鏡將光線分為測試光與參考

光。這兩到光線分別由試片與參考面鏡反射，反射後的光電場形式可寫為：

$$E_t = E_{t0} \exp(2kl_t + 2k\delta) \quad (2)$$

$$E_r = E_{r0} \exp(2kl_r) \quad (3)$$

其中 $E_{t0}$ 與 $E_{r0}$ 分別為測試光與參考光電場初始振幅， $k=2\pi/\lambda$ 為波數， $2l_t$ 與 $2l_r$ 分別為測試光與參考光在Mirau干涉儀中的光程。由於測試光是經由試片反射，試片表面的振動量將會調制測試光的相位。也就是試片表面的振動量被載在測試光相位項中。兩道光後重合並互相干涉，其光電場形式可寫為：

$$E = E_t + E_r = E_{t0} \exp(2kl_t + 2k\delta) + E_{r0} \exp(2kl_r) \quad (4)$$

光強度形式可寫為：

$$\begin{aligned} I &\propto |E|^2 \\ &= E_{t0}^2 + E_{r0}^2 + 2E_{t0}E_{r0} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda}(l_t - l_r + \delta)\right] \\ &= I_{DC} + I_0 \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda}(l_t - l_r + \delta)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

Mirau干涉顯微鏡中，參考光的光程是固定不變的。我們可以利用調整試片高度的方式，來控制測試光的光程，進而控制干涉訊號的相位。

一般而言，超音波振幅很小，約幾個奈米的尺度。小於光源波長的振動振幅，光學干涉儀輸出的訊號也很小。而且輸出訊號的大小除了跟雷射光源強度有關之外，干涉訊號的相位也是一項重要參數。考慮上式的交流項（AC），並將超音波的波動（式）代入，則干涉訊號可寫為：

$$I \propto I_0 \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda}(l_t - l_r + \delta_0 \cos(2\pi ft))\right] \quad (6)$$

考慮以下兩種狀況：

1. 光程差 $(l_t - l_r)$ 是四分之一光源波長的整數倍（ $m\lambda/4$ ， $m$ 為整數）時，干涉訊號可寫為：

$$I \propto I_0 \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda}\delta_0 \cos(2\pi ft)\right] \sim 0 \quad (7)$$

也就是說，當干涉儀光程差使干涉光強度處於最大或最小的情況時，由超音波引起表面振動

的訊號，無法由干涉訊號來表現。

2. 光程差( $l_t - l_r$ )是八分之一光源波長的奇數倍 ( $(2m+1)\lambda/8$ ,  $m$  為整數) 時，干涉訊號可寫為：

$$I \propto I_0 \sin\left[\frac{4\pi}{\lambda} \delta_0 \cos(2\pi ft)\right] \sim \frac{4\pi}{\lambda} \delta_0 \cos(2\pi ft) \quad (8)$$

此時的干涉光強度處於中間值 (或線性區)，由超音波引起表面振動的訊號可由干涉訊號來表現。

由以上兩種狀況可知，若要利用干涉儀偵測超音波的振動訊號，必須將干涉光強度鎖在強度的中間值 (或線性工作區)，才會有最大的偵測靈敏度。我們利用 PID 控制器配合 PZT actuator 達成此最佳化靈敏度的目地。

## 參、實驗架構與結果

採用穩定光路式Mirau干涉顯微儀，如圖 2 所示，雷射光射出後經由反射鏡 1 轉折，入射至分光鏡 1，進入Mirau顯微物鏡鏡頭，被Mirau物鏡內的分光鏡分為兩道，一道往上反射至一內建參考鏡，另一道往下入射至待測物表面，被待測物反射出Mirau物鏡，並回到分光鏡 1，再由反射鏡 3, 4 轉折方向進入光偵測器。光偵測器收到的光強AC訊號即為超音波訊號，可送至示波器觀察或以電腦類比數位轉換卡 (Analog to Digital converter card, A/D card) 記錄實驗數據。以上方式為Mirau干涉顯微儀的開迴路偵測，此方式不控制光程差變化。如果將光偵測器收到的光強DC訊號取出，此DC訊號表示即時的光程差( $L_2-L_1$ )的狀態。以PID控制器監控DC值的變化，推動高壓放大器把訊號放大使壓電致動器伸長或縮短，當光程差因PZT推動而有變化時，DC值也會再度變化，就這樣一直重複監控與推動的動作，直到收到的DC值固定在某一定值，即達到穩定光程差的效果。

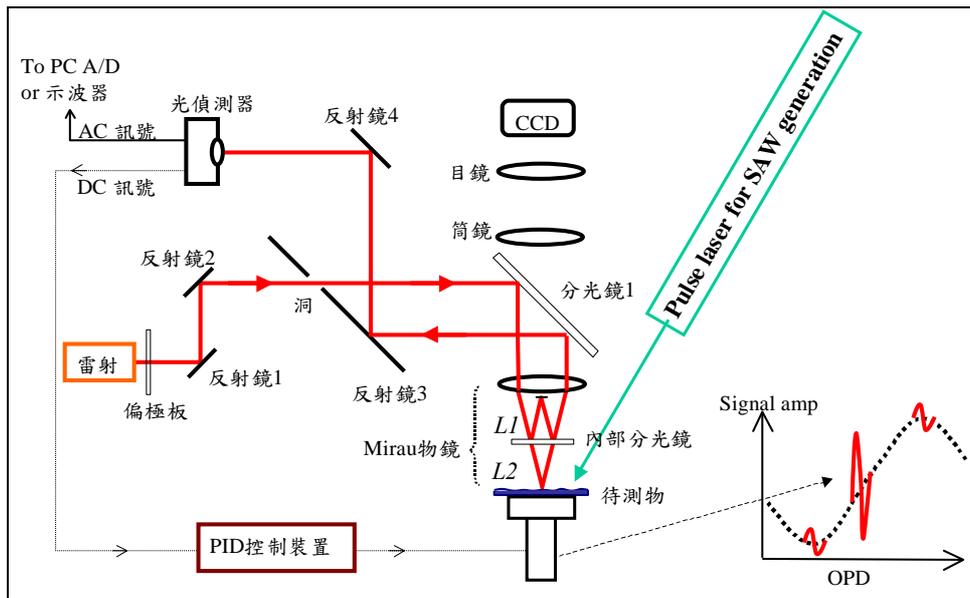


圖 2 Mirau 干涉儀與脈衝雷射激發裝置架構示意圖

為驗證此光學架構量測超音波訊號的可行性，用接觸式表面波探頭產生 5 MHz 之超音波訊號，可由 Mirau 干涉顯微鏡成功量得，然而當 PID 控制器穩定光程差裝置未開啟時，訊號振幅呈現忽強忽弱的不穩定狀態，開啟 PID 控制器後可得穩定之表面超音波，如圖 3 所示。

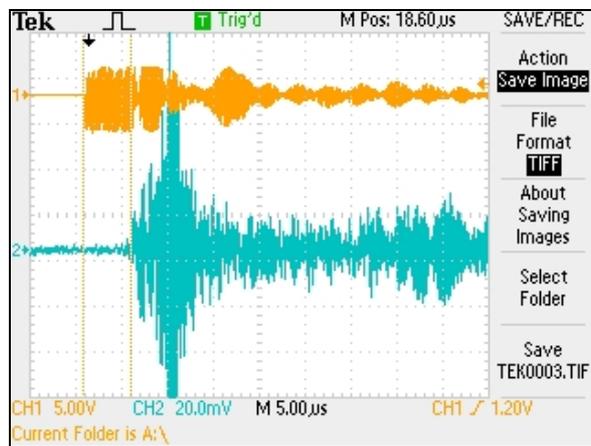


圖 3 Mirau 干涉儀量測得之波動訊號(以 5 MHz 探頭為激發源)

接著以脈衝寬度為 500 ps 之脈衝雷射在厚度為 100  $\mu\text{m}$  的銅試片上擊打，激發出 250 kHz~750 kHz 的超音波，同樣可由 Mirau 干涉顯微鏡量得訊號，如圖 4 所示，此為銅試片之波動訊號，高頻訊號抵達的時間在前，低頻訊號抵達時間較為延遲，有明顯的頻散現象。

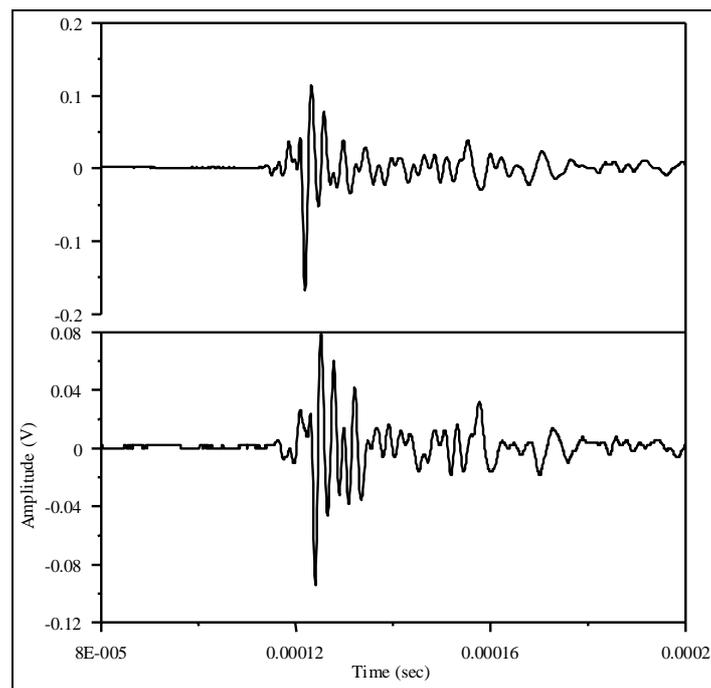


圖 4 干涉儀量測銅表面之波動訊號(以 500 ps 脈衝雷射為激發源)

## 肆、結論

實驗結果說明我們完成一種新式光學式超音波量測系統，可以接收傳統超音波探頭的訊號，亦可接收雷射激發之超音波訊號。由於雷射激發之超音波振幅與強度均很小，再加上傳遞過程中的損耗，此結果亦足以證明該系統的靈敏性。實驗結果證明，利用干涉儀接收之表面波訊號，訊號有清楚的頻散現象。我們將利用此新式光學式超音波激發與接收的系統，配合相位頻譜分析軟體可得實驗之頻散曲線，並配合反算程式得到材料的楊氏模數。

## 伍、誌謝

本文乃工研院量測中心執行經濟部技術處科技專案計畫之研究成果之一，於工研院之計畫編號為 C311AC2420。

## 陸、參考文獻

1. C. K. Lee, G. Y. Wu, C. T. Teng, W. J. Wu, C. T. Lin, W. H. Hsiao, H.C. Shih, J. S. Wang, S. C. Lin, C. C. Lin, C. F. Lee, and Y. C. Lin, "A high performance Doppler interferometer for advanced optical storage system", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38, pp. 1730-1741, 1999.
2. Q. Shan, C. M. Chen and R. J. Dewhurst, "A conjugate optical Fabry-Perot interferometer for enhanced ultrasound detection", Meas. Sci. Technol. Vol. 6, pp. 921-928, 1995.
3. Q. Shan, A. S. Bradford and R. J. Dewhurst, "New field formulas for the Fabry-Perot interferometer

and their application to ultrasound detection", Meas. Sci. Technol. Vol. 9, pp. 24-37, 1998.

4. J. P. Monchalin, "Optical detection of ultrasound", IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectric, and frequency control, Vol. UFFC-33, pp. 485-499, 1986.

5. 何展效，李朱育，施學兢，張文陽，“結合顯微鏡之雙波混合干涉術應用在 MEMS 元件振動量測”，奈米工程會議，2002.

6. Patrick Sandoz, Gilbert Tribillon, "Profilometry by zero-order interference fringe identification", Journal of modern optics, vol. 40, No. 9, page 1691-1700, 1993.