

測試光束斜入射之長條狀平板面精度量測

Oblique Incident Interferometric Measurement for Long-Stripped Flat

郭慧君、張勝聰、蔡和霖

Hui-Jean Kuo, Shenq-Tsong Chang, Ho-Lin Tsay

以干涉儀量測光學平板的面精度，必須提供與待測件尺寸相當的同調平行光束。目前在台灣，以國家實驗研究院儀器科技研究中心 Zygo 干涉儀光束口徑 12 吋為最大。近年來業界技術要求可量測 30 cm 以上長條型光學平板，以現有干涉儀平行光束正向入射到待測光學平板上，無法一次量測取得所有待測面的面精度。本文主要介紹針對測試光束斜入射之長條狀平板面精度量測的能量建立，說明光學原理、利用光學軟體 ZEMAX 模擬量測及實際測試結果。由斜向入射之干涉儀測量長條狀光學平板的面精度，量測誤差為 $1/10$ 波長以下，且調整斜向入射角度可使待測平板長度為量測干涉儀量測光束口徑的兩倍以上。

Peak-to-valley surface wavefront error of a long-stripped flat can be derived by oblique incident setup in case that dimension of the test flat is larger than the beam size of interferometer. Error of measurement in this setup was demonstrated to be lower than $(1/10)\lambda$. With proper choice of incident angle, test dimension can be up to more than twofold of beam size.

一、前言

菲佐 (Fizeau) 干涉儀為現今量測光學平板面精度的常用工具，此量測方式的前題為須提供與待測件尺寸相當的同調平行光束。目前在台灣，以國家實驗研究院儀器科技研究中心 (以下稱儀科中心) 現有之 Zygo 干涉儀光束口徑 12 吋 (相當於 30 cm) 為最大。而近年來業界技術要求可量測 30 cm 以上長條型光學平板之平面形狀精度，以傳統平行光束正向入射到待測光學平板上，無法一次量測取得所

有待測面的面精度。

欲解決此問題，有三種方式。一是更換更大系統，然而此法所費不貲，若將更換系統費用轉嫁到顧客上，檢測費用將相當驚人。二是採用多次部分量測，組合成一張完整干涉圖形後，再進行面精度分析，此法需熟悉 Zygo 干涉儀系統及分析軟體，並需建立相關分析機制，無法在短時間內完成此系統建置。第三種係針對待測件為長條狀光學平板的特點，利用斜向入射方式去取得待測光學平板的全部干涉圖，使用光學原理將原來真正的面精度還

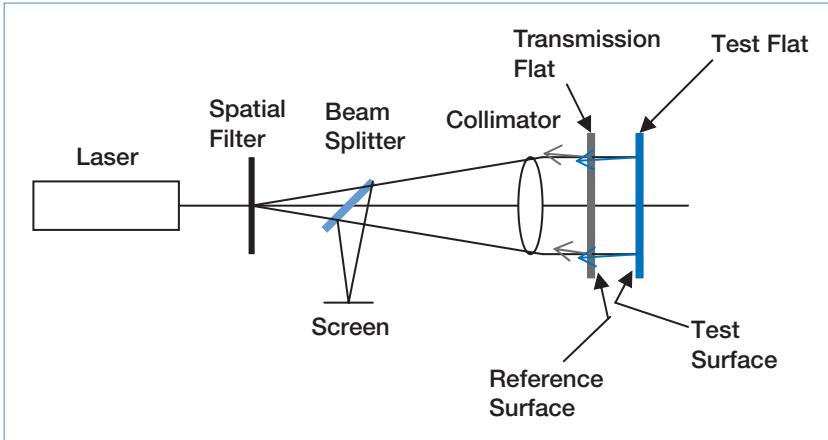


圖 1. 典型 Fizeau 干涉儀平面量測架構。

原，此法僅需進行簡單的數學運算，相當可行。

本文主要針對第三種測試方式，說明光束斜入射之長條狀平板面精度量測架構及其光學原理，並利用光學軟體 ZEMAX 模擬量測及實際測試結果。此外，亦探討第二種測試方式運用於量測上須注意的事項。

二、菲佐干涉儀平面量測

一般光學平板的量測方式常將待測光學平板架設在干涉儀前方，調整待測件的姿態，使干涉儀平行光束正向入射到待測件上，欲得到待測光學平板全部面精度訊息，其前提條件為干涉儀光束口徑須可涵蓋待測件口徑。本文中所量測之待測件為長條狀光學平板，寬度約為 2 公分，長度由 37 公分至 43 公分不等，期望量測整條光學平板面精度，超過現有儀科中心 12 吋 Zygo 干涉儀光束口徑。遇此情況一般直覺想法為採行分段量測方式，再以分段量測結果代表整條光學平板精度，此方法須將分段量測之干涉條紋整合成單一幅條紋再行分析，否則容易出現錯誤。以下簡略舉例說明容易發生錯誤之處。

Zygo 干涉儀基本架構是使用 Fizeau 干涉儀架構⁽¹⁾，圖 1 為 Fizeau 干涉儀平面量測示意圖，由標準鏡頭 (transmission flat, TF) 部分反射返回之光束為參考光束，再由待測平板之待測面反射返回之光束為待測光束，參考光束與待測光束在干涉儀內部產生干涉圖形，經由分析干涉圖形可得知兩光束間

之相位差，或對應於參考面與待測面之間的光程差 (optical path difference, OPD)。如圖 2 所示，假設待測面上有一處深度 t 的凹陷，則所造成參考光束與待測光束之間，即 A、B 兩點反射光程差 $2t$ ，

$$OPD = 2t \quad (1)$$

干涉儀顯示待測面波面像差 (P-V wavefront error, WFE) 為

$$WFE_{p-v} = t \quad (2)$$

此次量測的樣品共有 13 件，因無法一次量測，故每一樣品均分為二次量測。為識別起見，標以 A、B 兩段，量測結果如表 1 所示。

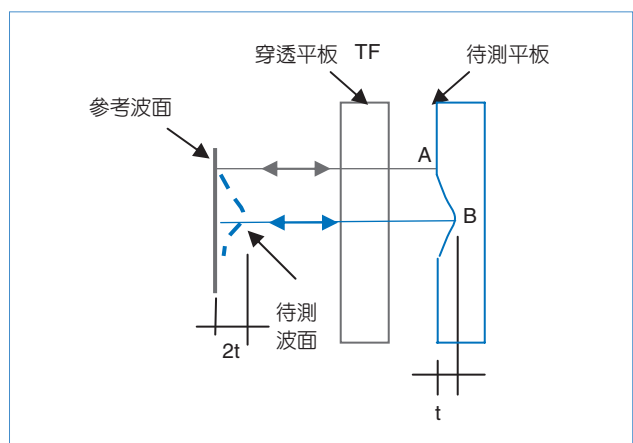


圖 2. 參考光束與待測光束間之光程差。

表 1. 分段量測結果。

編號	A 段 (λ)	B 段 (λ)
1	0.560	0.377
2	0.479	0.557
3	0.449	0.486
4	0.534	0.632
5	0.533	0.654
6	0.390	0.32
7	0.509	0.372
8	0.601	0.436
9	0.441	0.72
10	0.549	0.813
11	0.506	0.733
12	0.633	0.775
13	0.448	0.754

表 1 中待測樣品之允收標準為 1 波長 ($1\lambda_{p.v}$)，依據上表分段量測結果可推測大部分樣品應可符合規格。為確認量測結果正確，亦挑選其中第 1 號光學平板送至國外 50 公分口徑之干涉儀上重新進行量測，其結果為 $1.645\lambda_{p.v}$ ，如圖 3 所示，未達允收標

準，兩者比對結果不一致。由於採用全面積一次量測，其結果可代表該待測件真正面精度，故分段量測結果不可直接據以判斷待測樣品量測結果。

仔細檢視第 1 號光學平板全面積量測結果 (圖 3)，發現該光學平板表面並非完全平坦，而是有曲率的，故若採用分段式量測，將會延著待測件的圓弧表面取得該部分的區域面精度，如圖 4 所示。此分段量測結果並無法確實呈現整條光學平板，故分段量測結果需將分段量測之干涉條紋整合成單一干涉條紋再進行分析，始能作為最終結果。由於兩個干涉面之間的傾斜度不同，將造成干涉條紋密度不同，故此種分段量測干涉條紋拼接仍有技術問題待克服。

三、測試光束斜入射得出真正平面量測結果

參考波前誤差 double pass 量測架設方式⁽²⁾，並利用待測件為長條狀光學平板的特性，在某個方向干涉儀口徑遠大於待測件，僅另一垂直方向口徑不足而已，若能將待測件旋轉一個角度，使得干涉儀平

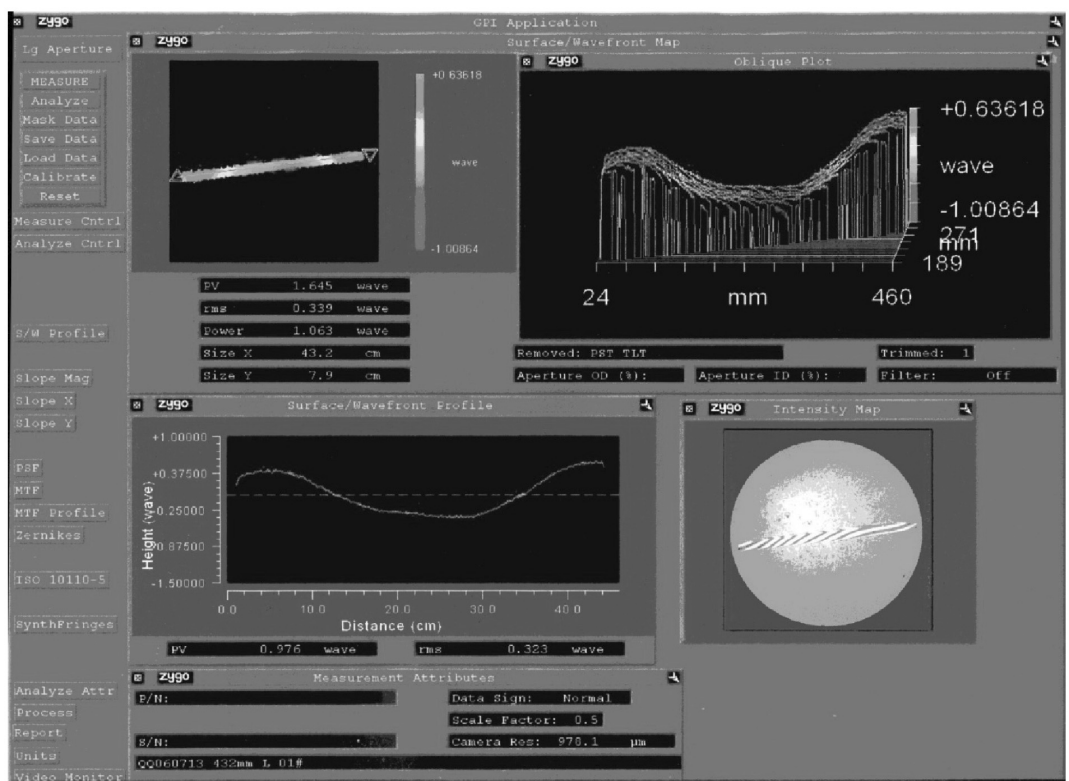


圖 3. 第 1 號光學平板全面積量測結果。

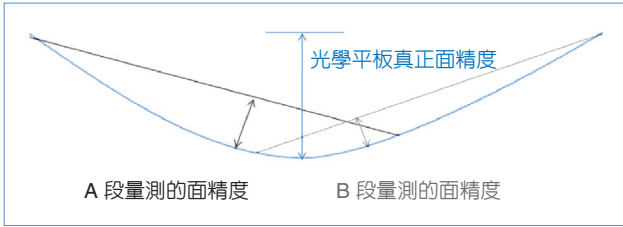


圖 4. 待測光學平板與分段量測區域。

行光束均能涵蓋待測件，應可算出真正光學平板面的精度。本文主要針對以上假設進行光學原理分析，並利用光學軟體 ZEMAX 模擬量測及實際測試。

1. 待測光束斜入射之 Fizeau 干涉儀的平面量測原理

待測光斜入射時 Fizeau 干涉儀平面量測架構示意圖如圖 5 所示，由標準鏡頭參考面所產生部分反射返回之光束成為參考光束，待測光束斜入射於待測平板之待測面後反射至參考平板 (reference flat, RF)，垂直反射沿著原路返回待測面，再由待測面反射回至干涉儀成為待測光束，因此待測光束經過待測面兩次反射。圖 6 為待測光束斜入射時參考光束與待測光束間光程差之示意圖，假設圖 6(b) 中 A、C 兩點在完美平面上，則經 A、C 兩點的光路長相等，因此 A、B 兩點反射光程差等於 B、C 兩點反射光程差。經由 B、C 兩點單次反射光程差，

$$\begin{aligned} \text{OPD}_{\text{single path}} &= \text{CB} + \text{BD} - \text{CE} \\ &= \frac{2t}{\cos\theta} - 2t \tan\theta \sin\theta = 2t \cos\theta \end{aligned} \quad (3)$$

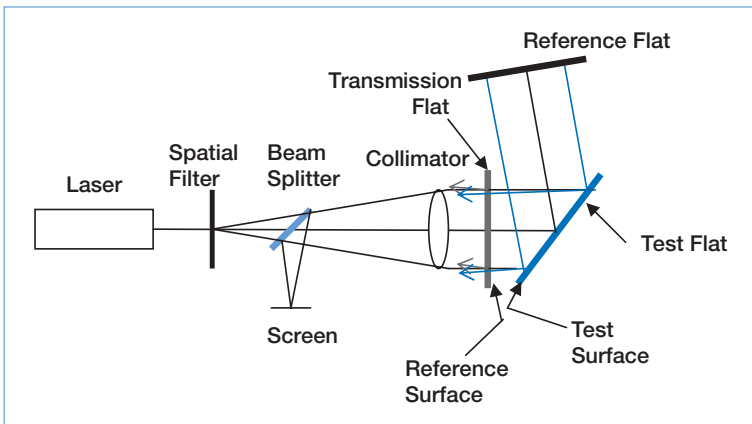


圖 5. 待測光束斜入射之 Fizeau 干涉儀平面量測架構。

如圖 1 所示，斜入射時待測光束經待測面兩次反射，因此總光程差為 (3) 式的兩倍。

$$\text{OPD}_{\text{total}} = 4t \cos\theta \quad (4)$$

故當待測光束於待測平板之入射角為 θ 時，由干涉儀量測顯示之波面像差 P-V 值為

$$\text{WFE}_{\text{p-v}} = 2t \cos\theta \quad (5)$$

由 (1) 式可知，實際表面之 WFE 為 t ，因此斜入射 θ 角干涉量測所得結果需經修正，即除以 $2\cos\theta$ ，才能得知正確的結果。

2. 以 ZEMAX 光學設計程式模擬平面之干涉量測

上述理論可以使用光學軟體 ZEMAX 模擬分析，須建立干涉儀光路及假設待測面之 WFE。

(1) 待測面建立

待測面建立以 ZEMAX 程式中 Irregular 的表面型態模擬不規則光學平面，其方程式為：

$$\begin{aligned} z &= \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + z_s\rho^4 + z_a\rho_y'^2 + z_c\rho^2\rho_y' \\ \rho_x &= \frac{x}{r_{\max}}, \quad \rho_y = \frac{y}{r_{\max}}, \quad \rho = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2} \\ \rho_y' &= \rho_y \cos\theta - \rho_x \sin\theta \end{aligned} \quad (6)$$

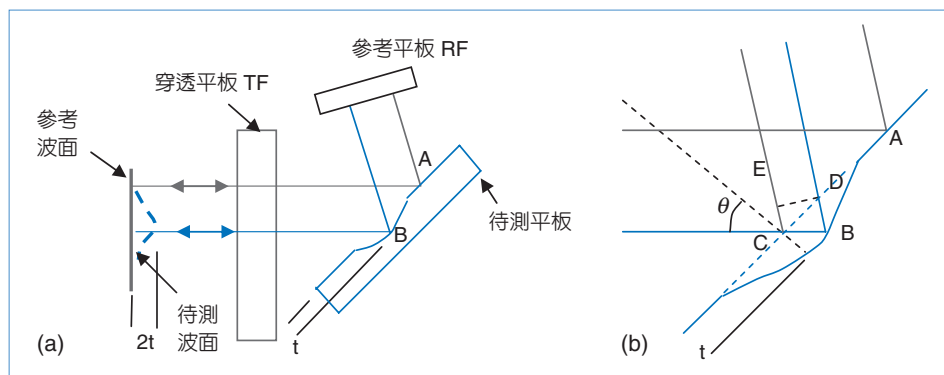


圖 6. 斜入射參考光束與待測光束間之光程差。

式中第一項代表平面、球面或圓錐曲面，模擬平面時， $c=0$ ，此項不存在。接著的項次分別為球差、像散及彗差， z_s 、 z_a 、 z_c 為這些像差的係數，代表最大口徑處之像差，單位與光學面幾何尺寸相同。 θ 為像散及彗差軸向與垂直軸 (y 軸) 夾角。圖 7 為本次模擬平面之波面圖， $r_{\max}=150\text{ mm}$ ， $z_s=z_a=z_c=(1/4)\lambda=0.0001582\text{ mm}$ ($\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$)， $\theta=30^\circ$ ，此建立之待測面最大波面誤差約 0.75λ 。

(2) 平面之干涉儀量測模擬

Fizeau 干涉儀量測平面時的 ZEMAX 模擬光路如圖 8 所示，在 ZEMAX 中以兩個組態 (configuration) 來模擬。組態 1 模擬干涉儀參考光束光路，點光源經準直/聚焦透鏡後以平行光束垂直入射穿透平板 TF，於 TF 的參考平面產生部分反射，此部分反射之平行光束回到準直/聚焦透鏡，成為干涉儀參考光束。組態 2 模擬干涉儀待測光束光路，組態 1 中的平行光束通過 TF 後垂直入射待測面，由待測面反射之光束再經 TF 回到準直/聚焦透鏡，成為待

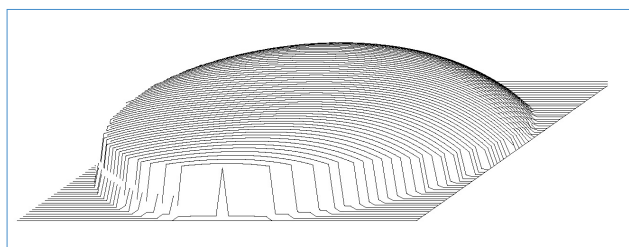


圖 7. ZEMAX Irregular 表面型態模擬不規則光學平面， $r_{\max}=150\text{ mm}$ ， $z_s=z_a=z_c=(1/4)\lambda=0.0001582\text{ mm}$ ($\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$)， $\theta=30^\circ$ ，最大波面誤差約 0.75λ 。

測光束。ZEMAX 計算待測光束與參考光束 (即兩組態) 返回波面間的相位差，產生模擬之不規則面的干涉圖形。

圖 9 為模擬本文欲探討之光束傾斜入射待測平

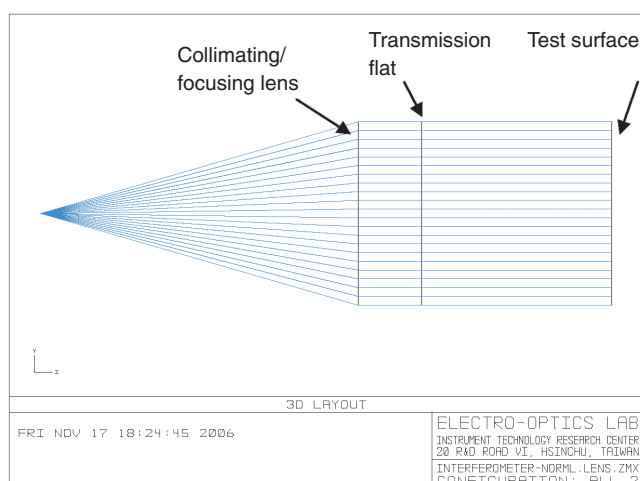


圖 8. 模擬平面量測時典型 Fizeau 干涉儀光路。

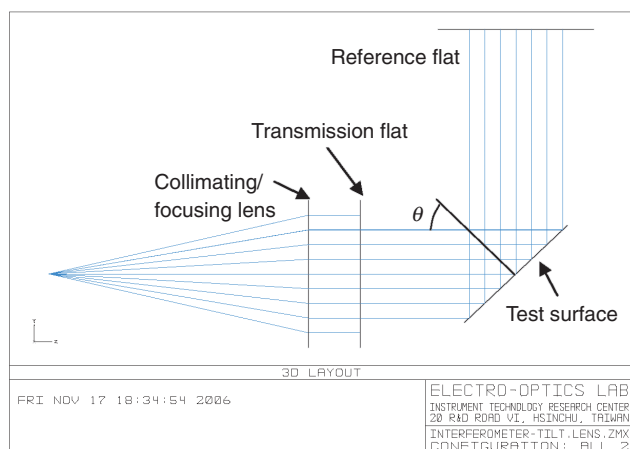


圖 9. 模擬待測光束斜入射待測面時干涉儀光路。

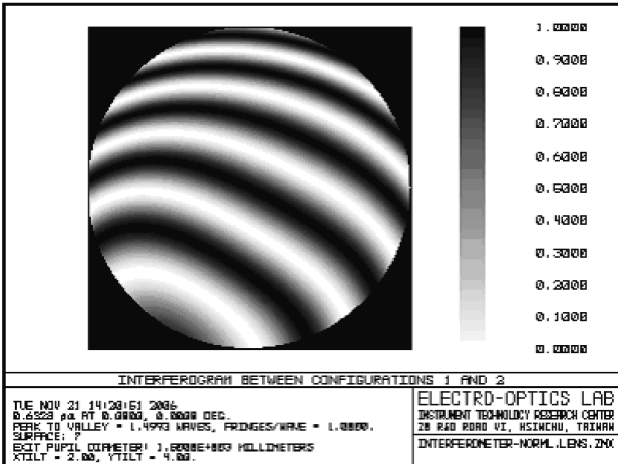


圖 10. 以圖 8 之 Fizeau 干涉儀架設測量圖 7 光學面之干涉圖形。

面的情況，同樣以雙重組態模擬參考光束光路與待測光束光路。組態 1 同樣模擬參考光束，且與圖 8 光路完全一樣。組態 2 模擬待測光束，則與圖 8 的情況不同，待測光束經待測面反射後，垂直入射於一參考平面，由參考平面垂直反射回待測面，經待測面再一次反射後，返回準直／聚焦透鏡成為待測光束。

(3) 模擬量測結果

ZEMAX 模擬干涉量測所顯示之最大波面像差 P-V 值為系統全部光程差 (等於 (1) 式及 (4) 式之 OPD)，對反射波面量測其值為實際面精度誤差 (等於 (2) 式及 (5) 式之 WFE) 的兩倍。以圖 8 之 Fizeau 干涉儀架設測量圖 7 之模擬光學面，其干涉圖形如圖 10 所示，顯示之最大波面像差 P-V 值約 1.5λ 因此光學面最大面精度誤差實際應為 0.75λ 與

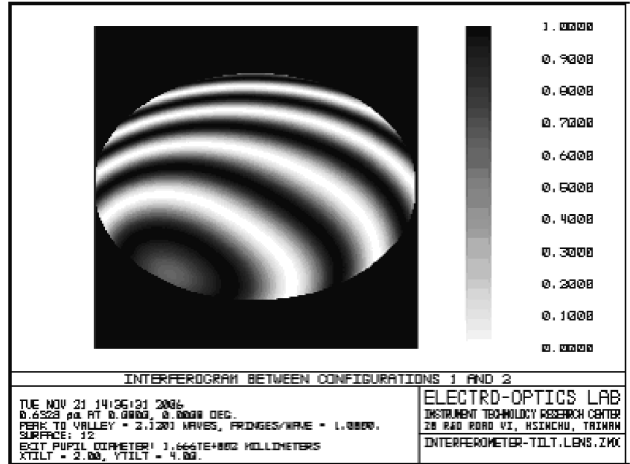


圖 12. 以圖 9 之干涉儀架設測量圖 1 光學面之干涉圖形， $\theta = 45^\circ$ 。

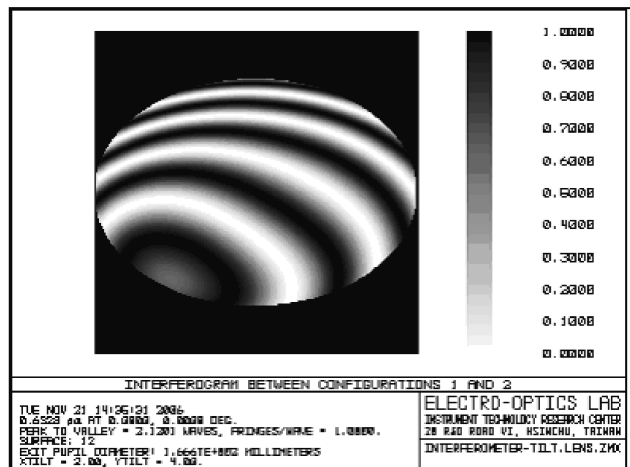


圖 13. 以圖 8 之干涉儀架設測量圖 1 光學面中心長方形區域 (40×280 mm) 之干涉圖形。

建立之待測面結果相同。ZEMAX 產生干涉圖形之參數設定如圖 11 所示。

相同之待測面以圖 9 干涉儀架設斜入射測量所得干涉圖形如圖 12 所示。同樣地，顯示之波面像差 P-V 值應先除以 2，而根據前述，需再除以 $2\cos\theta$ ，亦即實際之面精度等於顯示之 P-V 值除以 $4\cos\theta$ 。若只取中心部分長條狀區域，兩種干涉儀架設模擬所得干涉圖形分別如圖 13 及圖 14 所示。表 2 與表 3 為上述圖 1 模擬光學面全部口徑及中心長條形區域波面誤差之結果，顯示經理論修正後，若忽略波面計算造成的極微小誤差，不同 θ 角量測之表面精度可視為完全一致。

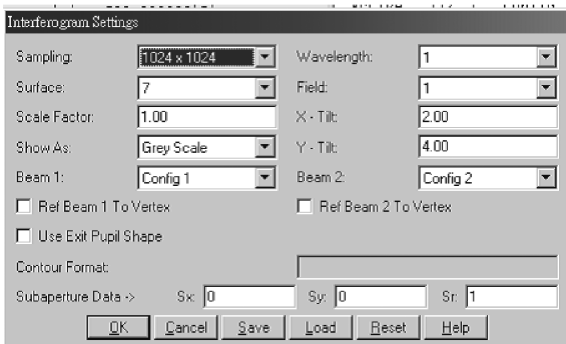


圖 11. ZEMAX 參數設定。

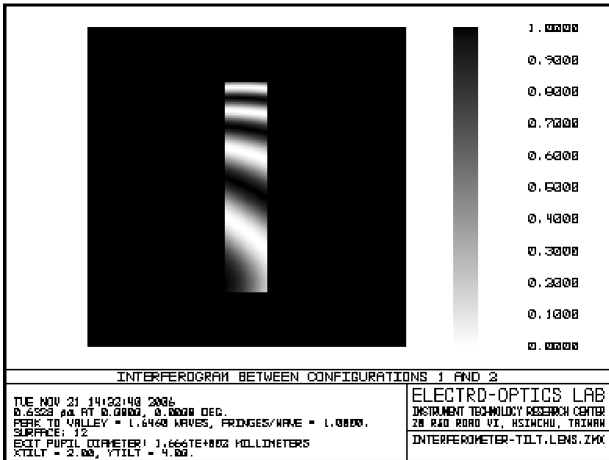


圖 14. 以圖 9 之干涉儀架設測量圖 1 光學面中心長方形區域 (40 × 280 mm) 之干涉圖形， $\theta = 45^\circ$ 。

3. 實際量測結果

(1) 入射光角度量測

入射光角度量測係採用儀科中心現有之經緯儀，其量測精度為 5 弧秒。在待測平板面精度量測完畢後，在原來位置置換成經緯儀，首先量測干涉儀的參考光束，再轉動經緯儀量測待測光束，得出兩束光之夾角為 94 度 25 分 32.8 秒，入射光角度則為該角之一半，即 47 度 12.5 分 16.4 秒。

(2) 量測結果

取用一條已鍍金屬膜之長條光學平板，由於其長度超過 30 cm，先進行適當遮蔽，使其長度與 12 吋干涉儀口徑相當。先進行正向干涉儀量測 (如圖

表 2. 全部口徑的面精度干涉量測結果。

干涉儀組態	Setup 1	Setup 2		
光束入射角 θ	0°	30°	45°	60°
量測 P-V 值 (λ)	1.4993	2.5947	2.1201	1.4986
理論修正值 (λ)	0.7497	0.7490	0.7497	0.7493
誤差 (λ)		-0.0007	0	-0.0004

表 3. 中心部分長方形開口的面精度干涉量測結果。

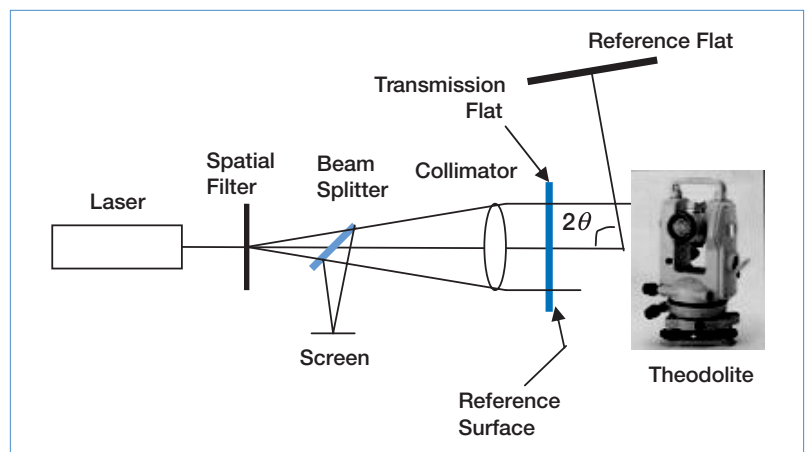
干涉儀組態	Setup 1	Setup 2		
光束入射角 θ	0°	30°	45°	60°
量測 P-V 值 (λ)	1.1599	2.0056	1.6460	1.1597
理論修正值 (λ)	0.5800	0.5790	0.5819	0.5799
誤差 (λ)		-0.0010	0.0019	-0.0001

2 所示光路架設)，其結果為 0.857λ ，如圖 16 所示，再將該平板旋轉 47 度，進行斜向干涉 (如圖 5 光路架設)，其結果為 1.159λ ，如圖 17 所示。根據第三節推論，再除以 $2\cos\theta$ 可推得面精度應為 0.850λ ，與正向量測結果一致。

四、結論

經由理論、模擬及實際量測結果，證實測試光束斜向入射可進行超過 30 cm 長度的長條狀平板面精度量測，精度可達 $(1/10)\lambda$ 以下，且調整斜向入射角度可使待測平板長度為量測干涉儀的量測光束口徑的兩倍以上。由於參考平面目前是 4% 反射，

圖 15. 以經緯儀量測入射光角度架構。



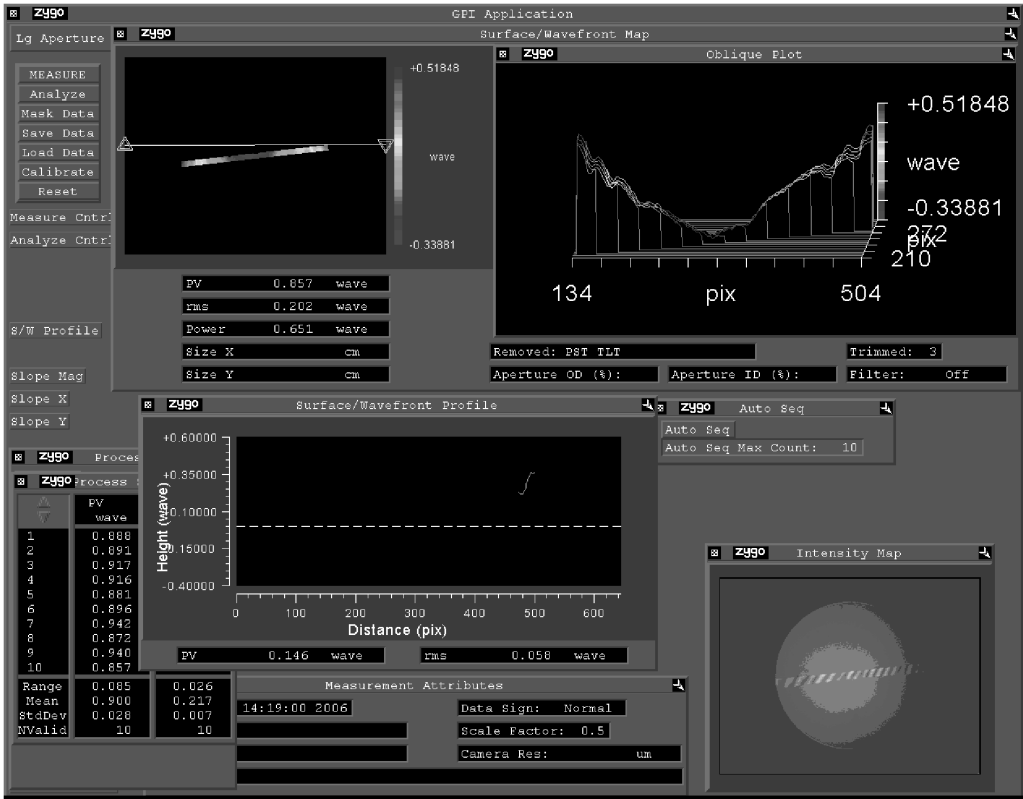


圖 16。
正向干涉圖。

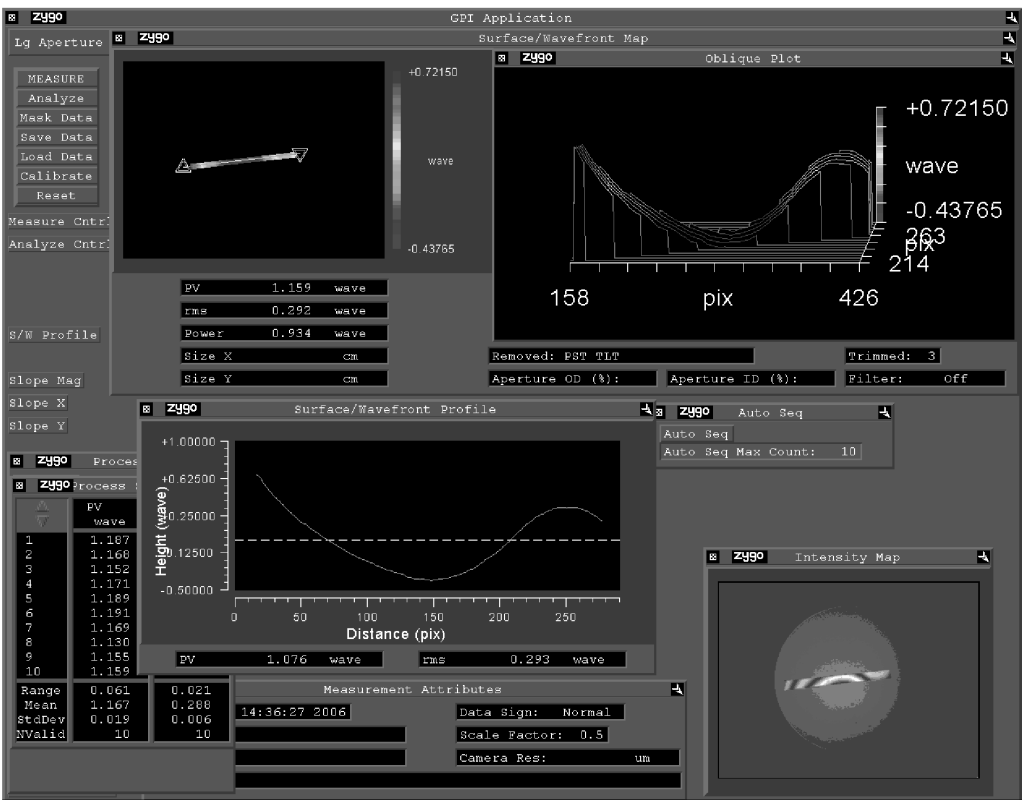


圖 17。
斜向干涉圖。

故此實驗架構目前僅能提供已鍍金屬膜長條狀平板之面精度量測；若待測件無鍍膜，則需再採購90% 參考反射面，或另行研發測試方式。以正向入射方式進行光學平板面精度量測，干涉儀光束口徑必須涵蓋待測件全部口徑，分段量測結果無法直接代表整條光學平板的面精度。

誌謝

筆者感謝弘愛玻璃股份有限公司洪賑堂先生參與討論及提供相關樣本作為本實驗之用，並同意將量測結果對外公開發表。

參考文獻

1. P. F. Forman, *Proc. SPIE*, **192**, 41 (1979).
2. D. Malacara, ed., *Optical Shop Testing*, 2nd. edition, New York:Wiley (1992).
3. ZEMAX, *Optical Design Program, User's Guide* (2001).
4. *MetroPro Reference Guide*, OMP-0386, Zygo Corporation (1996).

-
- 郭慧君小姐為國立中央大學天文碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 張勝聰先生為美國天主教大學物理碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
 - 蔡和霖先生為國立中山大學電機工程博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
 - Hui-Jean Kuo received her M.S. in astronomy from National Central University. She is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Shenq-Tsong Chang received his M.S. in physics from The Catholic University of America, USA. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Ho-Lin Tsay received his Ph.D. in electrical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.