

# 光學式微／奈米表徵顯微量測術

## Optical Micro-to-Nanoscale Surface Profilometry

許華珍、涂鐘範、張中柱

Hua-Chen Hsu, Chung-Fan Tu, Calvin C. Chang

在許多熱門產業的製程中，皆需要應用到微／奈米 (micro-to-nanoscale) 等級的表徵顯微 (surface profiling) 量測，來確保不同階段半成品的品質，俾便能針對製程的瑕疵或缺陷，進行即時的修復或捨棄，以避免不必要的後續處理工作，讓製程發揮更大的效能，降低製造成本。本文僅就慣用的兩種光學式微／奈米表徵顯微量測技術，提出其原理說明並簡述其應用。

Throughout the manufacturing processes in many prominent industries, the micro-to-nanoscale surface profilometry is frequently resorted to for the assurance of the producing quality, so that manufacturing flaws or defects can be noticed and rectified and the semi-finished product can be reworked or abandoned before any unnecessary post-process get executed. With this in-process inspection, the manufacturing process can be more efficient and the producing cost can be further reduced. In this article, two types of optical micro-to-nanoscale surface profilometry are presented and their applications are briefed.

### 一、前言

自動光學檢測技術 (automatic optical inspection, AOI) 在多數大量製造的產業中，已經成為一個大家耳熟能詳的名詞，在機械、電子、半導體、光電、影像顯示器、航太及生醫等領域都有廣泛的應用，例如：機械元件或加工尺寸檢查、印刷電路板 (printed circuit board, PCB) 線路檢查、表面黏著技術 (surface mount technology, SMT) 接點檢查、模組卡或主機板 IC 料號檢查、球格陣列 (ball grid array, BGA) 錫球高度檢查、晶圓雷射標記辨別、黃光微影製程中的疊對量測、發光二極體 (light emitting

diode, LED) 立體光輪廓檢查、光纖陶瓷套圈 (ferrule) 形態精度檢查、濾光片或微光學透鏡缺陷檢查、顯示器照度色度檢查、彩色濾光片間隔柱 (color filter spacer, CF-spacer) 尺寸和形貌檢查、各式各樣生物晶片抗體抗原檢測等等。這些檢測從 2D 影像辨識、2D 形態辨識和尺寸量測、2D 光強分析、2D 色譜分析、2D 光譜分析，一直到 2.5D 形貌和尺寸量測等都有。

在各產業不同階段的製程中，仰賴這些自動化檢測技術來取代人工的檢測，以更客觀、更一致、更穩定的方式，來確保製程的正確性，掌握製程參數偏離的趨勢，並能依檢測的結果和分析，判定製

程中所發生的瑕疵或缺陷產生的原因，來進行製程修正或停機修復，讓良率提升，減少不必要的後續處理所衍生的人力和資材浪費。

台灣的儀器設備商在前述的 2D 檢測領域已鑽研多年，產品步入成熟穩定期，並已建立本土化完整的新產品研發和系統客製化能力；然而在 2.5D 檢測領域，卻尚處於起步成長期，需仰賴政府的政策支持和扶植性的研發投資，才能建立完整的產業體系，也才能對終端產業有長期的助益，提供長期的國際競爭力。在 2.5D 檢測領域中，對於不同的應用其檢測精度的需求也各不相同，本文針對兩項在政府科技專案資助下投入研發，在微／奈米等級慣用的兩種光學式表徵顯微量測技術，提出概略的原理說明和應用描述，期能對儀器界同業和終端使用者有所助益。

此 2.5D 指的是在一個試件表面感興趣的區域，每一個數位化的二維資料點 (pixel) 上，給出其幾何高度的描述；也就是說對於試件表面每一個數位化的 (x,y) 座標點，給出其 (z) 座標，來描述該區域的表面形貌 (topography)。表面形貌量測在媒合性 (mating) 製程中特別重要，不論是結構性 (structural) 媒合或黏著性 (adhesive) 媒合。在結構性媒合中，必須要檢測個別結構的絕對尺寸或是個別結構尺寸之間的一致性；在黏著性媒合中，一般感興趣的是表面形貌的平均效應，最普遍的就是表面粗糙度。表面形貌量測方法有許多種，如三角法 (triangular)、聚焦法 (focusing)、共焦法 (confocal)、條紋法 (fringe-projecting) 及干涉法 (interferometric) 等，各自適用於不同解析度或精度的要求，包括縱向 (vertical; z) 的解析度或精度，以及空間 (spatial; x, y) 的解析度或精度。在幾個熱門產業的製程中，對解析度或精度的要求都已經到了微／奈米的等級，在這方面除了造價高昂的共焦法之外，應用最廣泛的是條紋法和干涉法，下面就針對這兩個方法分別論述之。

## 二、條紋法表面形貌量測術

### 1. 條紋法概述

雲紋輪廓法 (moire topography, MT)<sup>(1)</sup>、相移雲

紋輪廓法 (phase shifting moire topography, PSMT)<sup>(2)</sup>、相位量測法 (phase measuring profilometry, PMP)<sup>(3-5)</sup> 及傅立葉轉換條紋法 (Fourier transform profilometry, FTP)<sup>(6-9)</sup> 等為適用於高度變化範圍、在數微米至數十公分之非接觸式三維光學檢測方法。相較於干涉儀，它們可以量測的範圍較大且不需要很嚴苛的工作環境，但是解析度不及干涉儀。上述方法中，條紋或光柵的投影方式可分為兩類：一為雲紋投射法 (moire projection)，利用參考光柵把另一光柵的扭曲程度解調放大；另一類為條紋投射法 (fringe projection)，僅投射一個光柵條紋即可。傳統的 moire topography 所得之 moire 圖形，無法由演算法自動判斷檢測面為突起或凹陷，且靈敏度低，後來發展的 PSMT 可以有效地提高準確度，但是相移的裝置很複雜。PMP 是利用正弦條紋的相移，計算得待測物的三維形貌。FTP 檢測方法則為投射條紋被物體高度扭曲，經由傅立葉轉換及其他數學運算，重建待測物之三維形貌。在電子製造業中 PMP 與 FTP 是兩個主要的方法<sup>(10)</sup>，缺點為對於過度陡峭的表面不適用。FTP 方法的優點為不需要精密的機械位移裝置，然而其解析度不及 PMP 方法。

PMP 與 FTP 方法計算得到的相位分布介於  $-\pi$  至  $\pi$  間，因此，待測面上的相位分布有不連續的點而成鋸齒狀，此相位分布稱為未重建相位圖 (wrapped phase map)。至今有多種相位重建演算法 (phase unwrapping algorithm) 被提出來<sup>(11-13)</sup>，相位重建演算法得到待測物表面的絕對相位正比於高度，但物體表面的形貌若太複雜，如有陡峭的突出或非常不規則的變化，則會造成局部陰影、條紋圖形不連續或條紋過密或過疏，而在這些區域無法得到正確的相位資訊。

以下說明在科專計畫下，所建立的傅立葉轉換三維形貌自動光學檢測系統，將明暗呈正弦變化之條紋以遠心鏡頭投影於待測物表面，物體表面的高低起伏變化使得條紋被扭曲，或可解釋為正弦條紋的相位被改變，以 CCD 相機在正面取像，把扭曲條紋利用演算法經傅立葉轉換及特殊濾波函數，取出空間頻域中的主頻率。再由反傅立葉轉換得到待測物表面正弦條紋的相位，則可求得物體表面的高度。

## 2. 傅立葉轉換條紋法原理

一般有兩種裝置型式：(1) 投影與取像鏡頭的光軸互相平行 (parallel-optical-axes) 及 (2) 光軸相交 (cross-optical-axes) 型式<sup>(7)</sup>，本實驗裝置採取後者。如圖 1(a) 所示，明暗呈正弦變化週期為  $P$  之條紋，以遠心鏡頭投影於平面  $R$ ， $\theta_i$  為條紋投影角度，CCD 相機在正上方取像  $\theta_r = 0$ ，假設投影與取像之鏡頭倍率皆為 1，強度分布之數學式可以表示如下：

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y) \cos\left(\frac{2\pi}{P_0}x\right) \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{P}{\cos\theta_i}$$

其中  $a(x,y)$  為背景雜訊； $b(x,y)$  為局部振幅。若待測物表面較  $R$  高  $\Delta h$ ，如圖 1(b) 所示，則正弦變化之條紋被扭曲成

$$I(x,y) = r(x,y) \{ a(x,y) + b(x,y) \times \cos[2\pi f_0 x + \Phi(x,y)] \} \quad (2)$$

$$= a'(x,y) + c(x,y) \exp(i2\pi f_0 x) + c^*(x,y) \exp(-i2\pi f_0 x)$$

公式中，

$$f_0 = \frac{1}{P_0} \quad (3)$$

$$a'(x,y) = r(x,y)a(x,y)$$

$$c(x,y) = \frac{1}{2}r(x,y)b(x,y)\exp[i \cdot \Phi(x,y)]$$

而  $r(x,y)$  為待測物表面之反射率， $f_0$  為載頻 (carrier frequency) 或頻域中之主頻率，\* 表共軛複數。

把條紋的空間頻率當做載頻，物體表面高度變化所造成的條紋扭曲當相位調變。高度可由相位  $\Phi(x,y)$  求得，其關係式為

$$\Phi(x,y) = 2\pi f_0 \Delta h(x,y) \tan\theta_i \quad (4)$$

把公式 (2) 對變數  $x$  做一維傅立葉轉換可得到

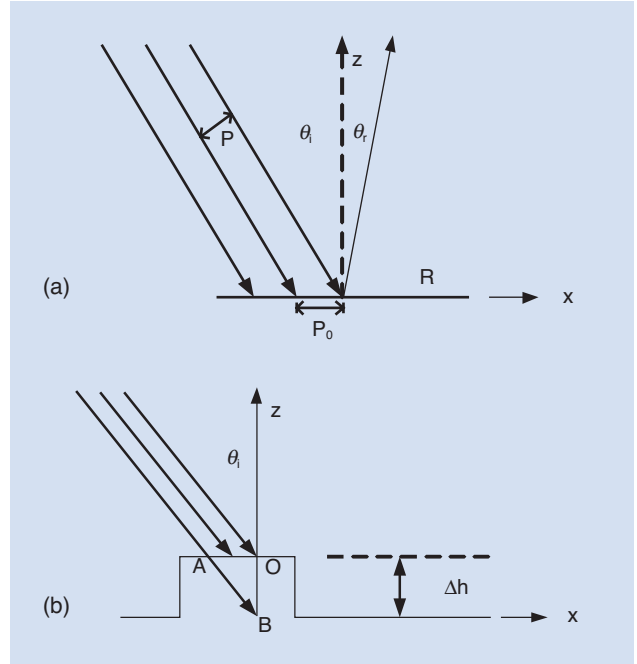


圖 1. (a) 明暗呈正弦變化週期為  $P$  之條紋，以遠心鏡頭投影於平面  $R$ ， $\theta_i$  為條紋投影角度，CCD 相機在上方取像角度為  $\theta_r$ 。(b) CCD 相機在正上方取像  $\theta_r = 0$ ，待測物表面較  $R$  高  $\Delta h$ 。

$$F(f,y) = A(F,y) + C(f - f_0,y) + C^*(f + f_0,y) \quad (5)$$

大寫字母表示傅立葉轉換後的函數，其於空間頻域的分布如圖 2 所示，在一般狀況， $a'(x,y)$ 、 $r(x,y)$ 、 $b(x,y)$  及  $\Phi(x,y)$  的變化較  $f_0$  緩慢，故可視為三個獨

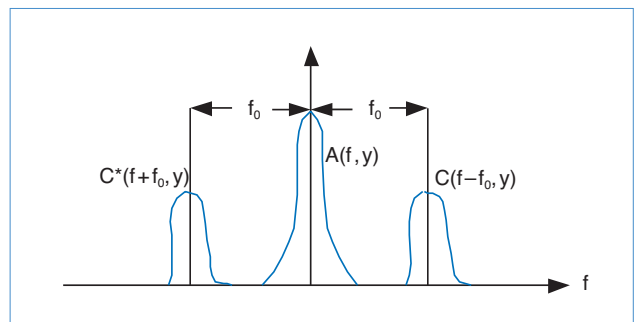


圖 2. 空間頻域的分布， $f_0$  為載頻或頻域中之主頻率。在一般狀況， $a'(x,y)$ 、 $r(x,y)$ 、 $b(x,y)$  及  $\Phi(x,y)$  的變化較  $f_0$  緩慢，故可視為三個獨立之分布函數。

立之分布函數。

利用 Bone 等人<sup>(14)</sup> 及 Juergen 等人<sup>(15)</sup> 所提之方法來決定載頻並濾出函數  $C(f - f_0, y)$ ，所使用之濾波函數數學式如下

$$h(f) = \begin{cases} 1 & |f - f_0| < r_1 \\ 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{|f - f_0| - r_1}{r_2 - r_1} \times \pi\right) & \text{when } r_1 \leq |f - f_0| \leq r_2 \\ 0 & |f - f_0| > r_2 \end{cases} \quad (6)$$

其圖形如圖 3 所示，中心水平，兩側為餘弦函數變化。式子中  $r_1$  及  $r_2$  是隨待測物形式而變之參數，因為此函數一次微分變化平緩，所以其反函數之震盪變化小。將函數  $C(f - f_0, y)$  平移至原點再做反傅立葉轉換得到複數  $c(x, y)$ ，相位  $\Phi(x, y)$  可表為

$$\Phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]} \quad (7)$$

實際探頭設計需克服的關鍵技術包含：

- (1) 光源的投光效率與穩定度：設計採鹵素光源搭配光纖將均勻光投射至光柵上，提高光源強度均勻性與穩定性，同時光纖可使熱源遠離探頭。
- (2) 選擇適當之投光角度：投光系統與取像系統夾角太小，將造成所投射條紋於  $z$  軸投射條紋數目不足，降低  $z$  軸解析度；夾角太大於待測物

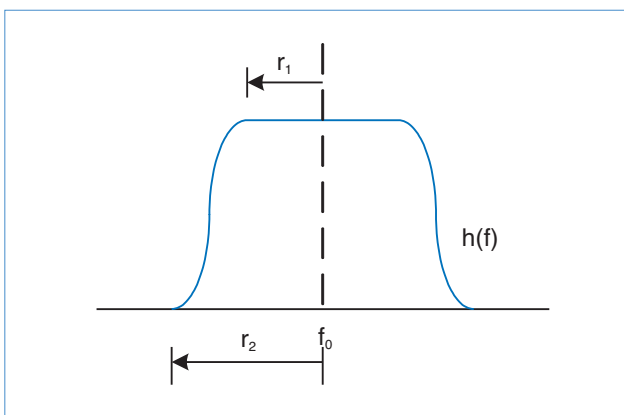


圖 3. 選用之濾波函數圖形，中心水平，兩側為餘弦函數變化。

上產生陰影，陰影部分無法顯現干涉條紋，因此陰影區域內高度無法計算，本技術根據廠商提供樣品設計最佳投光角度。

- (3) 降低鏡頭產生之失真：選取低失真之離心鏡頭 (telecentric lens)，降低鏡頭橫向與縱向失真。
- (4) 提高光柵設計品質：光源經光柵投射至待測物，光柵設計需有高對比與較高之穿透率。

### 3. 實驗裝置與結果

圖 4 與圖 5 為本實驗的裝置圖與實體，150 W 鹵素燈泡經透鏡組照光在正弦光柵上 (其週期為 8 lp/mm)，經由焦距 55 mm 之遠心投影鏡頭把條紋

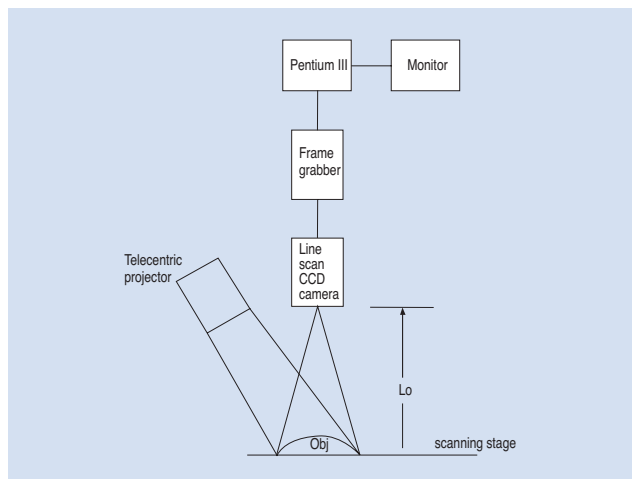


圖 4. 本實驗的裝置圖，正弦光柵經由遠心投影鏡頭把條紋投影在待測物表面，線形 CCD 相機在待測物正上方取像，待測物置於一軸平移台上，移動物體完成二維取像。

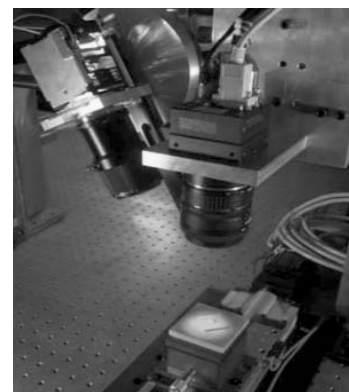


圖 5. 本實驗的裝置實體圖。

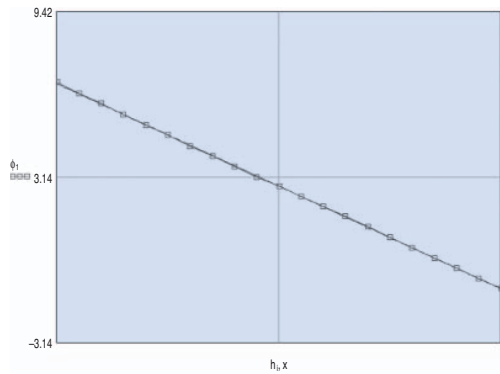


圖 6. 垂直方向每移動  $100 \mu\text{m}$  對應之相位。

投影在待測物表面，線形 CCD 相機 (Balsar L100 series,  $2048 \times 1 \text{ pixel}$ ) 在待測物正上方取像，鏡頭焦距為  $50 \text{ mm}$ 。待測物置於一軸平移台 (parker) 上，移動物體完成二維取像，使用線形 CCD 相機可以減少或避免大面積上正弦光柵週期的誤差。另外，Pentium III 1-GHz 個人電腦及影像擷取卡 (EPIX) 做影像擷取與處理。把一均勻散射平面架在一精密平移台上，量測垂直方向每移動  $100 \mu\text{m}$  對應之相位。圖 6 為其關係圖，以線性關係模擬其斜率，此值為相位轉換成高度的參數。自製一等邊梯形柱樣本，其上截面為  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  之正方形，下截面為  $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$  之正方形，高度為  $1 \text{ mm}$ ，圖 7 為明暗呈正弦變化之條紋投影在等邊梯形柱上之結果。掃描取像後，計算物體上相位未重建時的分布，如圖 8 所示，以灰階強弱代表相位大小。圖 9 為相位重建後之分布，同樣地，以灰階強弱代表相位大小。圖 10 為以灰階強弱表示高度在  $x$ - $y$  平面之分布圖，其正比於圖 9 之相位。至於重複性之驗

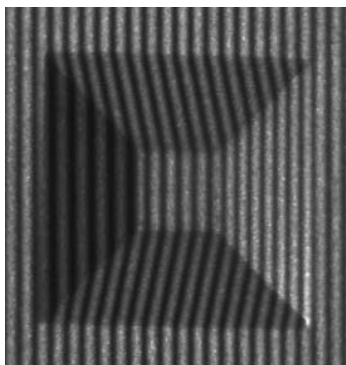


圖 7. 明暗呈正弦變化之條紋投影在等邊梯形柱上。

證：重複測量此樣本 25 次並計算其高度，高度之平均值為  $1.006 \text{ mm}$ ，標準偏差為  $1.1 \mu\text{m}$ 。所以，此三維量測系統以 3 個標準差保守計算重複性約  $5 \mu\text{m}$ 。

#### 4. 產業應用

由於 IC 晶片 (chip) 的接腳數逐年增加，而體積卻日漸縮小，為有效地將 IC 晶片焊接在 PCB 板上，各種封裝焊接方式如 BGA、 $\mu\text{GA}$ 、flip-chip、CSP 逐漸取代傳統的導線架，而新一代的焊接技術對於 PCB 板上的銲錫高度及晶片上的錫球高度要求很高，其共面度將會決定過錫爐時的焊接，若銲錫或錫球過高過大，將導致錫球溶解焊接時黏接到鄰近的接腳，造成短路，若銲錫或錫球太少或太低將導致 PCB 與晶片無法有效接合，造成斷路，此一應用領域所需的空間解析度要求高，且檢測速度要求快，產業界需求甚殷。

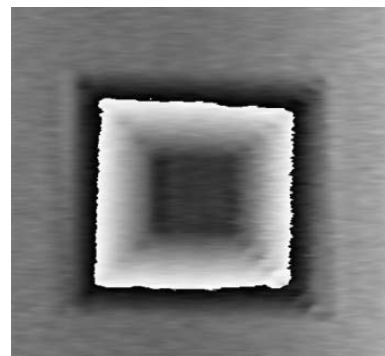


圖 8. 相位未重建時的分布，以灰階強弱代表相位大小。

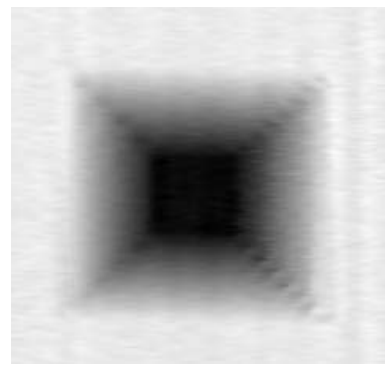


圖 9. 相位重建後之分布，以灰階強弱代表相位大小。

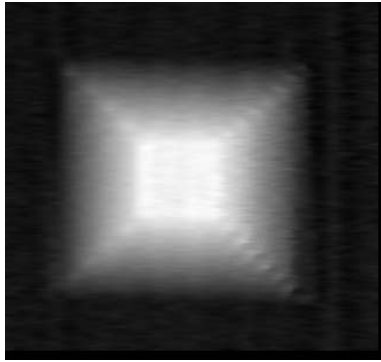


圖 10. 以灰階強弱表示高度在  $x$ - $y$  平面之分布圖，其正比於圖 9 之相位。

### 三、干涉法表面形貌量測術

#### 1. 干涉法概述

光干涉表面形貌量測術是用於解析度要求較高的量測上，分為單頻光干涉量測、多頻光干涉量測和白光掃描干涉術 (white-light scanning interferometry, WLSI) 等。其中，單頻光干涉量測可以得到較高的解析度，但是因為在解相分析過程中會遭逢相位不明問題 (phase-ambiguity problem)，因此受限於階高小於四分之一波長的量測<sup>(16)</sup>。而多頻光干涉量測<sup>(17-18)</sup>則因為可以產生等效波長的效應，階高量測可以擴展到等效波長的四分之一，但是卻犧牲了可貴的量測精度。隨著各項產業的發展，漸漸地更大階高量測的需求也慢慢出現，因而誕生了 WLSI<sup>(19-21)</sup>，徹底迴避了相位不明的問題，使階高量測可以更往上延伸，達到一個精密驅動器可及的行程範圍，一百甚至數百微米。

除了階高量測能力和量測精度的考量之外，表面形貌解析的計算時間也是一個重要的考量因素，如何在這三者之間取得平衡，以得到令人滿意的量測結果，則是一項工程上的藝術。針對不同的情況，則有許多不同的解析法被開發出來<sup>(22-26)</sup>，以下將說明一種在科專計畫中所發展出來的解析法則。基本上白光垂直掃描所得干涉圖譜 (interferogram) 被視為一系列單頻相移干涉圖譜的組合，將擷取到的「光強 vs. 掃描軸」函數空間經由傅立葉變換轉到「相位 vs. 波數」函數空間，再利用多頻光干涉相位重建的技術還原出物體表面形貌來。

#### 2. 白光干涉圖譜的擷取和轉換

WLSI 使用的是低同調長度的寬頻光源，基本的 Mirau-type WLSI 架構如圖 11 所示。低同調光自左而右入射在第一片分光鏡上，反射到 Mirau 物鏡，Mirau 物鏡內有一片參考鏡和第二片分光鏡，白光在此分為一道參考光和一道物光，兩者分別經參考鏡和物體表面反射後，再一同向上通過第一片分光鏡，最後記錄在 CCD 上。依據白光低同調的特性，只有當兩道光的光程差 (optical path difference, OPD) 為零時，才會有干涉條紋產生。接著當圖中的精密位移驅動器載著 Mirau 物鏡在垂直方向上做掃描，在物鏡視野內每一個資料點的干涉條紋封包 (fringe envelope) 都會被記錄下來，物體的表面形貌就可以由求解這些封包最大值發生的地方來得出。

這些干涉圖譜可以視為一系列單頻相移干涉圖譜的組合，表示為

$$\begin{aligned}
 I(x, y, z) &= \int_{\sigma_L}^{\sigma_H} I_0(\sigma; x, y) \cdot [1 + V(\sigma; x, y) \cdot \cos \phi(\sigma; x, y, z)] d\sigma \\
 &= \int_{\sigma_L}^{\sigma_H} I_0(\sigma; x, y) d\sigma + \int_{\sigma_L}^{\sigma_H} I_0(\sigma) \cdot V(\sigma; x, y) \cdot \cos \phi(\sigma; x, y, z) d\sigma \\
 &= I_{DC}(x, y) + I_{INT}(x, y, z)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

其中  $\sigma = 1/\lambda$  是波數、 $V(\sigma; x, y)$  是相對於每一個波

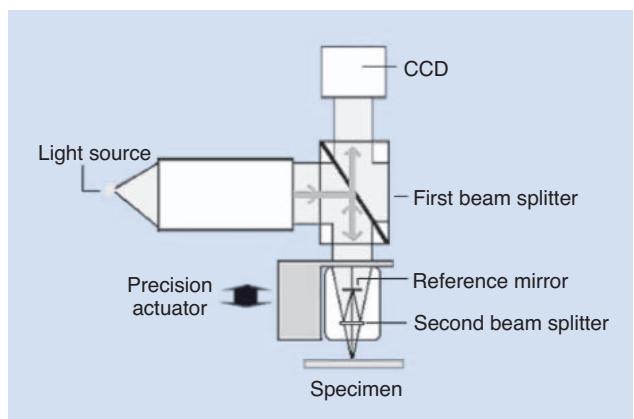


圖 11. 基本的 Mirau-type WLSI 架構。

數的同調函數 (coherence function) 、 $\phi(\sigma; x, y, z) = 2\pi \cdot \sigma \cdot z + \phi_0(\sigma; x, y)$  是指干涉相位 (phase interference) 、 $z$  是兩道光 OPD，而  $\phi_0(\sigma; x, y)$  是兩道光的起始相差。

式中的 DC 項  $I_0(\sigma; x, y)$  代表光源的光強頻譜分布 (power spectrum)，可以將它延伸定義  $I_0(\sigma; x, y) = 0, \sigma \notin [\sigma_L, \sigma_H]$ ，而 AC 項  $I_{INT}$  可以重寫成

$$\begin{aligned} I_{INT}(x, y, z) &= \int_{\sigma_L}^{\sigma_H} I_0(\sigma) \cdot V(\sigma; x, y) \cdot \cos(\phi(\sigma; x, y, z)) d\sigma \\ &= \int_0^{\infty} I_0(\sigma) \cdot V(\sigma; x, y) \cdot \cos(\phi(\sigma; x, y, z)) d\sigma \\ &= \text{Re} \left\{ \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\sigma; x, y) \exp(-j2\pi \cdot \sigma \cdot z) d\sigma \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $A(\sigma; x, y) = I_0(\sigma; x, y) \cdot V(\sigma; x, y) \exp[-j\theta_0(\sigma; x, y)]$  是起始相差  $\phi_0(\sigma; x, y)$  的複變函數， $I_{INT}(x, y, z)$  是  $A(\sigma; x, y)$  的傅立葉變換。

因此，起始相差  $\phi_0(\sigma; x, y)$  可以由下式求得

$$\phi_0(\sigma; x, y) = \arctan \left[ \frac{\text{Im}(A)}{\text{Re}(A)} \right] \quad \pm \frac{\pi}{2} < \phi_0(\sigma) < \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

### 3. 多頻光干涉相位重建

物體的表面形貌可以由上述得到的起始相差和多頻光干涉相位重建技術求得，如前所述，利用選定的兩個或多個波長來進行表面形貌的解析，可以求得具有較大階高的形貌。波長的選擇是依據光源的光強頻譜分布狀況和物體實際形貌的範圍來決定，主要是為了一方面可以提高量測的訊噪比，另一方面讓等效波長的效果可以涵蓋實體的形貌範圍。等效波長可以用下式表示：

$$\lambda_{eq} = \frac{\lambda_a \lambda_b}{|\lambda_a - \lambda_b|} \quad (11)$$

另外，因  $\phi_a = (2\pi/\lambda_a)OPD$  以及  $\phi_b = (2\pi/\lambda_b)OPD$ ，所以  $\phi_{eq} = (2\pi/\lambda_{eq})OPD = \phi_a - \phi_b$ ；又因為  $1/\lambda_a \leq 1/|\lambda_a - \lambda_b|$  以及  $1/\lambda_b \leq 1/|\lambda_a - \lambda_b|$ ，所以等效波長同時滿足  $\lambda_{eq} \geq \lambda_a$  和  $\lambda_{eq} \geq \lambda_b$ 。

物體表面每一個資料點  $(x, y)$  的形貌值則可以用下式表示：

$$H(x, y) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\phi_{eq}(x, y) \cdot \lambda_{eq}}{2\pi} \right] \quad (12)$$

其中的二分之一是因為物光經物體表面反射而回，物體表面的高度變化會造成兩倍的光程差變化。

上式同時說明了量測誤差也會隨著等效波長的效應放大，這個問題可以藉由融合單頻和多頻的計算來避開它。因為物體表面的形貌值也可以表示為：

$$H(x, y) = (m + \varepsilon)\lambda \quad (13)$$

其中  $m = \text{int}[H(x, y)/\lambda]$  代表整數部份， $\varepsilon = 1/2[\phi(\lambda, x, y)/2\pi]$  代表小數部份，整數部份可以用等效波長的計算結果來決定，小數部份則用較短波長的計算結果來決定，這樣就可以同時兼顧到較大階高的量測需求和較佳解析度的量測需求。

### 4. 初步測試結果

應用上述的解析法則和一台 Mirau 式白光干涉儀，針對 Taylor Hobson 公司製作的兩片階高標準片來做初步測試，兩片標準片的校正值分別是  $331 \pm 5 \text{ nm}$  及  $2,125 \pm 5 \text{ nm}$ 。根據圖 12 所示光強頻譜分布，選擇 580 nm 和 600 nm 兩個波長，將白光干涉圖譜轉換到「相位 vs. 波數」空間，如圖 13 和圖 14 所示，值得注意的是 y 軸的相位資訊是不連續的，因為試片傾斜和相位不明的問題所造成。最後的量測結果是 329.7 nm 和 2,123 nm，如圖 15 所示。

### 5. 產業應用

光干涉的表面形貌量測術在縱軸方向可以得到很高的解析度，通常都可以達到 1 nm，甚至是 0.1 nm，可應用於許多高科技產業，例如晶圓的表面粗糙度和平面度的量測、雷射標記深度的量測、覆晶製程中金球凸塊的尺寸和共面度的量測、液晶平面顯示器中新式彩色濾光片上間隔柱 (spacer) 尺寸和高度的量測、光纖端面和微光學元件表面形貌的量測等，是一個重要的表面形貌量測工具。

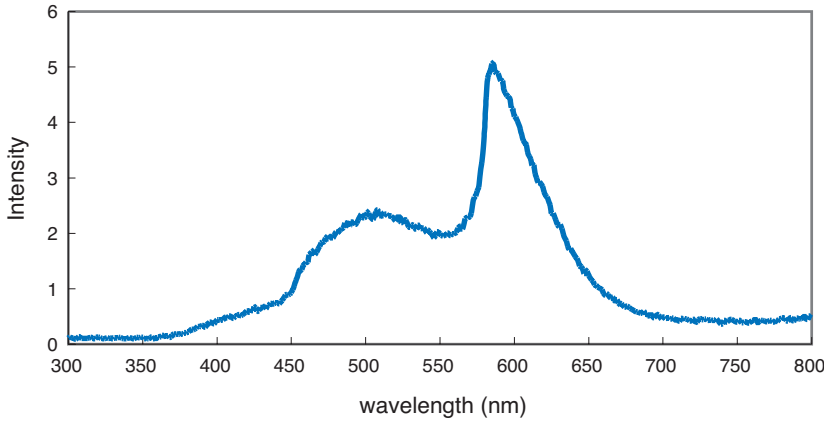


圖 12.  
光源的光強頻譜分布。

#### 四、總結

條紋法和干涉法表面形貌量測技術在政府科專計畫的支持下，已經建立了良好的基礎，希望能夠繼續借重產、官、學、研的力量，一方面在技術上尋求更多的突破和創新，一方面在應用上獲得更大的支持和迴響。在國內，自動光學檢測設備聯盟 (Automatic Optical Inspection Equipment Association,

AOIEA) 於今年 3 月 29 日正式成立，就是希望能結合產、官、學、研及使用者，共同發展國內主流產業—半導體、光電、寬頻通訊、電子製造、生技、微機電、奈米等產業之製程檢測設備及系統技術，以加速推動國內自動光學檢測設備產業的發展，同時提升台灣儀器產業整體技術水準與產值，並且使台灣在成為製造王國的同時，也能在製程設備和檢測設備上占有一席之地。

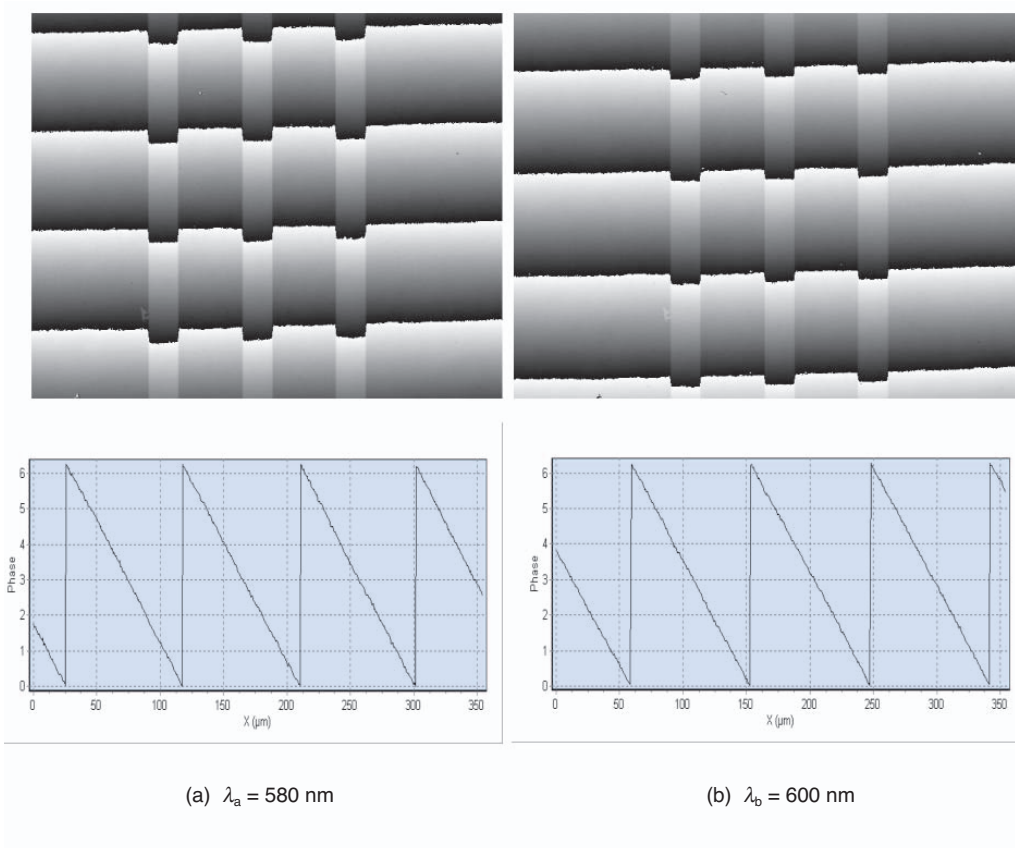


圖 13.  
331 nm 階高標準片量測所得白光干涉圖譜和傅立葉轉換後的相位分布。

圖 14.  
2,125 nm 階高標準片  
量測所得白光干涉圖  
譜和傅立葉轉換後的  
相位分布。

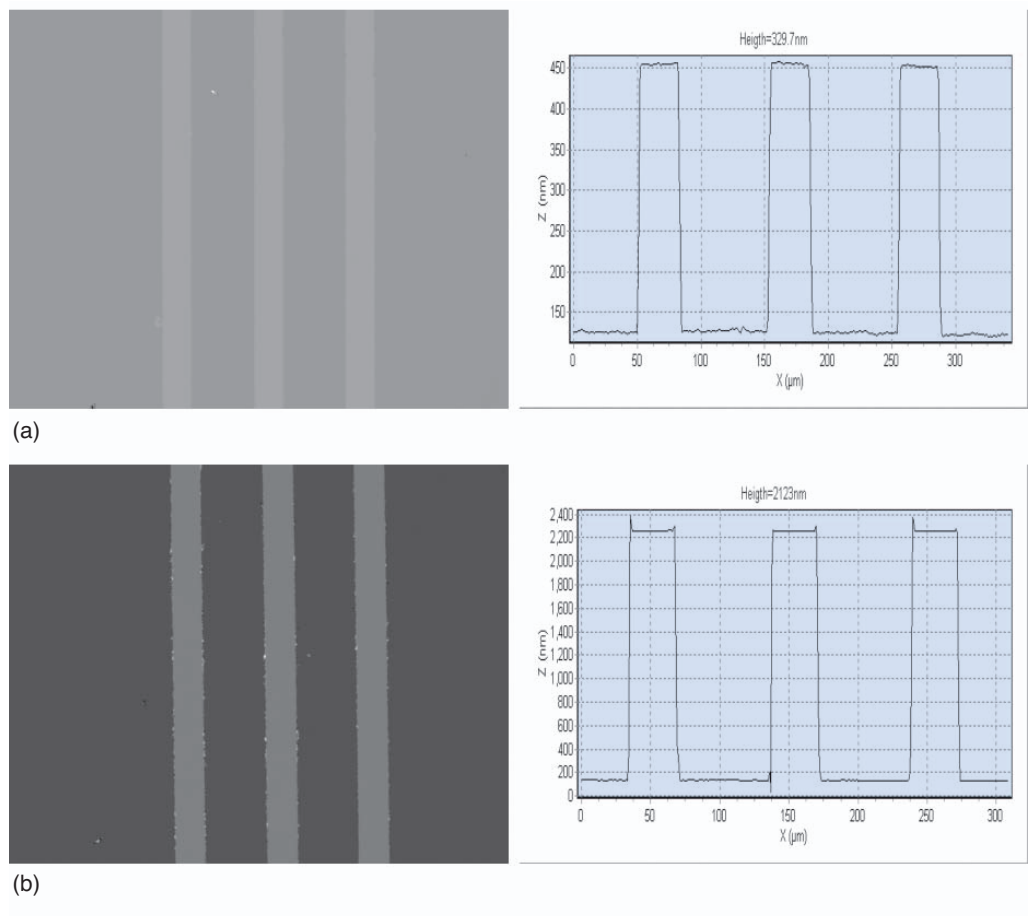
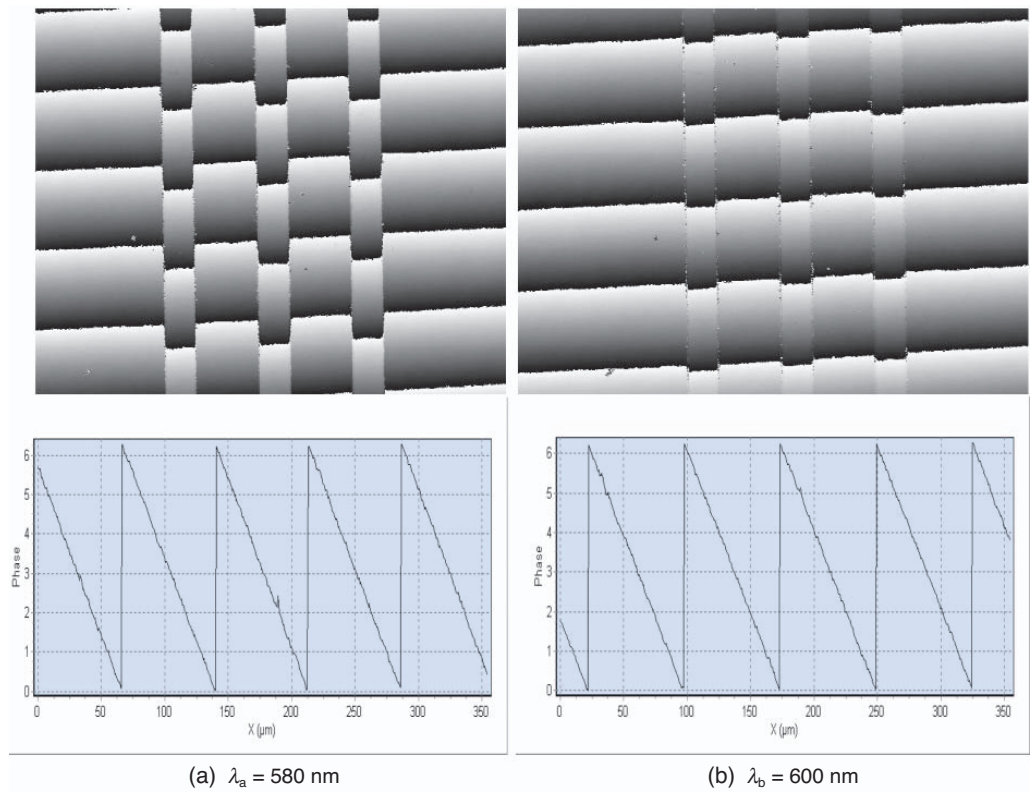


圖 15.  
(a) 331 nm 階高標準  
片量測結果，(b)  
2,125 nm 階高標準片  
量測結果。

## 參考文獻

1. H. Takasaki, *Appl. Opt.*, **9**, 1457 (1970).
  2. T. Yoshizawa and T. Tomisawa, *Opt. Eng.*, **32**, 1668 (1993).
  3. V. Srinivasan, H. C. Liu, and M. Halioua, *Appl. Opt.*, **23**, 3105 (1984).
  4. X.-Y. Su, W.-S. Zhou, G. von Bally, and D. Vukicevic, *Opt. Commun.*, **94**, 561 (1992).
  5. M. Chang and C. S. Ho, *Experimental Mechanics*, **33** (2), 117 (1993).
  6. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, *J. Opt. Soc. Am.*, **72**, 156 (1982).
  7. M. Takeda and K. Mutoh, *Appl. Opt.*, **22**, 3977 (1983).
  8. J. Li, X.-Y. Su, and L.-Rong, *Opt. Eng.*, **29**, 1439 (1990).
  9. M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita, H. Takai, and Y. Takahashi, *Appl. Opt.*, **36**, 5347 (1997).
  10. J. D. Pearson, F. Lilley, D. R. Burton, J. T. Atkinson, S. Kshirsagar, D. J. Search, and C. A. Hobson, *SPIE*, **2183**, 238 (1994).
  11. D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software*, John Wiley & Sons (1998).
  12. T. R. Judge and P. J. Bryanston-Cross, *Opt. and Lasers Eng.*, **21**, 199 (1994).
  13. X. Su and L. Xue, *Opt. Eng.*, **40**, 637 (2001).
  14. D. J. Bone, H. A. Bachor and R. J. Sandeman, *Appl. Opt.*, **25**, 1653.
  15. J. H. Massig and J. Heppner, *Appl. Opt.*, **40**, 2081 (2001).
  16. D. Malacara, *Opt. Shop Testing*, 501 (1992).
  17. Y. Y. Cheng and J. C. Wyant, *Appl. Opt.*, **23**, 4539 (1984).
  18. K. Creath, *Appl. Opt.*, **26**, 2810 (1987).
  19. G. S. Kino and S. S. C. Chim, *Appl. Opt.*, **29**, 3775 (1990).
  20. S. S. C. Chim and G. S. Kino, *Appl. Opt.*, **31**, 2550 (1992).
  21. P. J. Caber, *Appl. Opt.*, **32**, 3438 (1993).
  22. P. Sandoz and G. Tribillon, *J. Modern Optics*, **40**, 1691 (1993).
  23. K. G. Larkin, *J. Opt. Soc. Am.*, **13**, 832 (1996).
  24. A. Hirabayashi, H. Ogawa, and K. Kitagawa, *Appl. Opt.*, **41**, 4876 (2002).
  25. J. Schwider and L. Zhou, *Opt. L.*, **19**, 995 (1994).
  26. P. de Groot and L. Deck, *J. Modern Optics*, **42**, 389 (1995).
- 
- 許華珍小姐為國立中央大學光電所碩士，現任工業技術研究院量測技術發展中心副工程師。
  - 涂鐘範先生為國立海洋大學通訊與導航工程所碩士，現任工業技術研究院量測技術發展中心工程師。
  - 張中柱先生為美國德州大學澳斯汀校區工程力學博士，現任工業技術研究院量測技術發展中心正工程師。
  - Hua-Chen Hsu received her M.S. in optical sciences from National Central University. She is currently an associate engineer at the Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute.
  - Chung-Fan Tu received his M.S. in communication and guidance engineering from National Taiwan Ocean University. He is currently an engineer at the Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute.
  - Calvin C. Chang received his Ph.D. in engineering mechanics from the University of Texas at Austin, Texas, USA. He is currently a senior engineer at the Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute.