

第三章 以垂直入射方式及移相干涉術測量二維高度分佈

3.1 引言

一般而言，使用單波長移相干涉術來測量物體的高度變化時，大多用來測量高度變化小於 $\lambda/2$ [16] (λ 為波長) 的物體。當高度變化大於 $\lambda/2$ 時，則無法判斷干涉條紋的階數，為了測量高度變化較大的物體，我們選擇使用兩較短波長合成一等效合成波長去測量，此技術就是所謂的雙波長相位移干涉術 [17]。在本章中，我們將使用單波長移相干涉術測量物體細微的二維高度變化，以及使用雙波長相位移干涉術測量物體大階高的高度變化，結合此兩種技術可以同時達到高靈敏度以及大階高範圍測量等優點。內容包括待測物結構的介紹，移相干涉術的實驗原理及其實驗架構、結果，最後討論其誤差。

3.2 實驗原理

本節中會詳細介紹待測物，以及單波長移相干涉術測量待測物細微的二維高度變化，再以雙波長移相干涉術測量待測物大階高的高度變化，如此可以達到高靈敏度以及大高度範圍測量等優點。



3.2.1 待測物

本論文研究的主要目的即利用光以垂直入射的方式，來觀察待測物體的二維高度變化以及二維折射率分佈。為了達到此一目的，我們在待測物上選擇三片高度不同且材質不同的樣品做為我們的待測物，分別為厚度 2mm 的壓克力板、厚度 1mm 的 PVC 板以及厚度為 1.2mm 的 BK-7 玻璃板作為我們的樣本，我們分別將三塊樣本編號，如圖 3.1 所示。虛線部份為我們測量的範圍，大小約為半徑為 1cm 的圓。實驗中我們先利用單波長移相干涉術分別測量待測物每一面細微的高度變化，再利用雙波長移相干涉術測量兩兩之間大階高的高度分佈，在分析大階高相位分佈時我們只需從每一面樣本中選取一 pixel 出來做分析比較即可，再配合分析出的細微的二維高度分佈圖，即可精確的求出待測物體二維高度分佈圖。由於我們選取的樣本厚度皆小於 5mm，所以為了避免樣本底層面的反射光干擾實驗結果，我們將樣本的底層皆噴上均勻的黑漆，如此可以避免上下兩

層反射光互相干涉影響實驗結果。

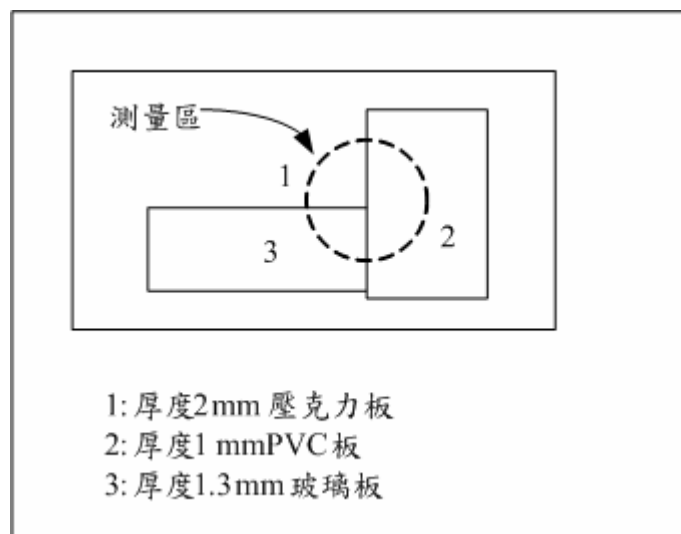


圖 3.1 待測物結構圖

3.2.2 移相干涉術

本實驗的架構為一 Twyman-Green 干涉儀，如圖 3.2 所示，首先我們將利用單波長移相干涉術，測量樣本細微的高度變化。雷射為可調波長雷射，先選取波長 λ_a 作為我們波長，接著利用 PZT 推動 M 改變參考光束的光程而達成移相的功能，每一次改變一已知相位 $\alpha=\pi/2$ ，重覆四次，這四個強度的分佈如下式所表示：

$$I_0(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y)], \quad (3.1)$$

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \pi/2], \quad (3.2)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \pi], \quad (3.3)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2], \quad (3.4)$$

其中 $a(x, y)$ ， $b(x, y)$ 以及 $\phi(x, y)$ 皆為未知數，由上列四式可以解得

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_0} \right); \quad (3.5)$$

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi OPD(x, y)}{\lambda}; \quad (3.6)$$

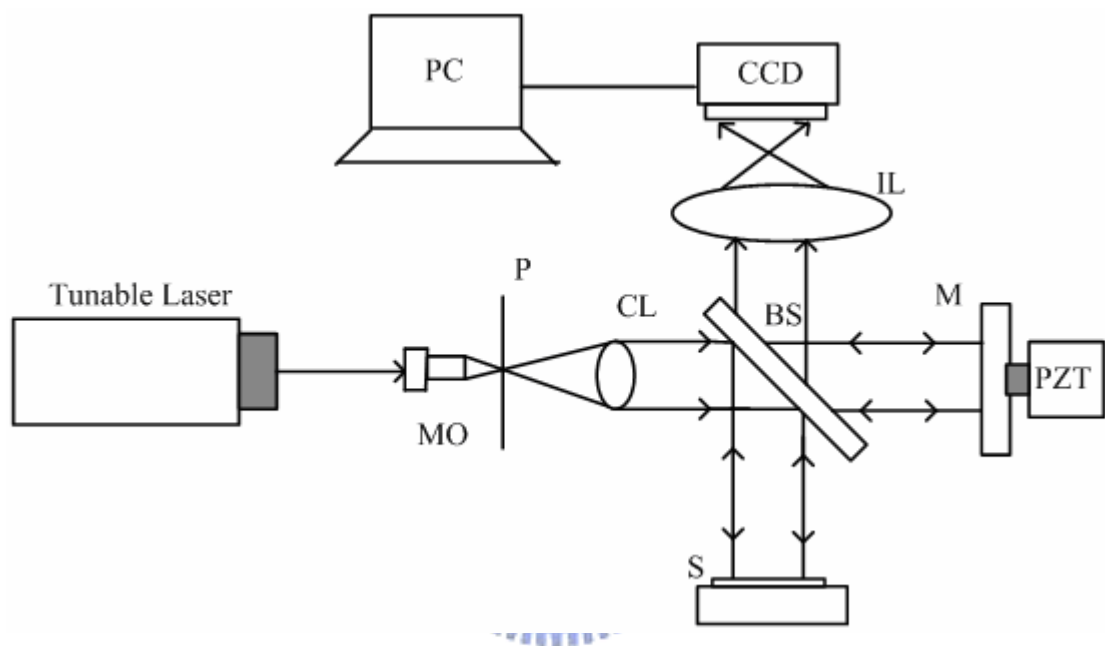


圖 3.2 雙波長測量二維高度變化的光學裝置

利用(3.6)式，可以求得樣本二維高度分佈為

$$H(x, y) = \frac{1}{2} OPD = \frac{1}{2} \left[\frac{\phi(x, y)\lambda}{2\pi} \right], \quad (3.7)$$

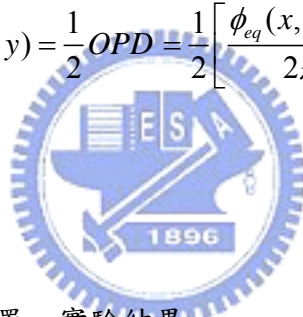
我們利用此方法測量樣品每一面細微的高度變化。接著利用雙波長移相干涉術，測量待測物體兩兩之間大階高的分佈。調整雷射波長，使用另一波長 λ_b 重複上面之測量；假設 $\phi_a(x, y)$ 以及 $\phi_b(x, y)$ 分別為波長 λ_a 與 λ_b 所求出的相位，則由雙波長干涉術可得其合成相位[18]為：

$$\phi_{eq} = \frac{2\pi OPD(x, y)}{\lambda_{eq}} = \phi_a(x, y) - \phi_b(x, y); \quad (3.8)$$

$$\text{其中合成波長為 } \lambda_{eq} = \frac{\lambda_a \lambda_b}{|\lambda_a - \lambda_b|}, \quad (3.9)$$

由式子(3.8)可以求得待測物的厚度為

$$H(x, y) = \frac{1}{2} OPD = \frac{1}{2} \left[\frac{\phi_{eq}(x, y)\lambda_{eq}}{2\pi} \right]. \quad (3.10)$$



3.3 實驗與結果

本節中將介紹實驗系統裝置、實驗結果。

3.3.1 量測系統架構與架設

實驗架構如圖 3.2 所表示，為一 Twyman-Green 干涉儀，由可調波長雷射出來的光束經顯微鏡物鏡 MO、針孔 P 及準直透鏡 CL 擴束成為平行擴束光，再經分光鏡 BS 分為反射的測試光與透射的參考光等兩部分；參考光經由一 PZT 推動的面鏡 M 反射之後回到 BS，在另一方面測試光經待測物 S 後，垂直反射的光束再回到 BS，與參考光一起經過成像透鏡 IL 而於 CCD 形成干涉條紋，並以 CCD 擷取條紋資料，調整 zoom lens 可以改變影像的放大率，拍攝影像時所對準的是帶測物的表面。

實驗中，由於反射光強度太弱，以致於我們選用高功率的雷射光源。在調校光路部分，雷射通過空間濾波器後，放置一透鏡使其成為平行光，而我們再調整

平行光時，利用可調式光圈將雷射光射在同心圓紙片形成一個固定的大小，之後使同心圓紙片前後移動約三公尺的距離，調整透鏡使得雷射光在三公尺內保持平行。為了確定雷射光束垂直入射樣品表面，實驗時，當雷射光束通過 BS 時，測試光先經過一可旋轉的平面鏡，再將平面鏡旋轉 45° ，此時雷射光會垂直往下，待測物放在雷射光下，調整樣品傾斜角使其雷射光反射回原點，如此可以確定雷射光束垂直入射樣品表面，利用這些方法可以提高系統的穩定度及精確度。

3.3.2 實驗參數

為了驗證此方法的可行性，我們利用三種具有不同高度變化的樣品，作為我們的待測物，分別為 1.2mm 的 BK-7 玻璃板、1mmPVC 塑膠板以及 2mm 的壓克力板，如圖 3.1 所示。我們使用的雷射為可調式的雷射，使用的 CCD 為 PULNiX Inc. 生產的 TM-545，為 510×492 pixels 以及 8bits 的解析度，影像擷取卡為 Matrox 公司生產之 Meteor-II/Standard，最後實驗資料擷取與分析是使用 Engineering Synthesis Design Inc. 的 IntelliWaveTM 軟體，以及 MathWork 公司的 Matlab 軟體。

3.3.3 使用單波長移相干涉術測量結果

圖 3.3 為在一般情形下所見待測物體的外觀，接著我們利用垂直入射的方式以及使用單波長移相干涉術，分別測量每一面待測物體的高度變化。選用的單波長為 $\lambda_a = 632.6 \text{ nm}$ 。圖 3.4a-b 為 PVC 塑膠板的相位分佈及高度變化分佈圖，圖 3.5a-b 為 BK7 玻璃板的相位分佈及高度變化分佈圖，圖 3.6a-b 為壓克力板的相位分佈及高度變化分佈圖。其中二維相位圖的單位為波長，二維高度變化圖的單位為 μm 。



圖 3.3 待測物在日光燈下的外觀

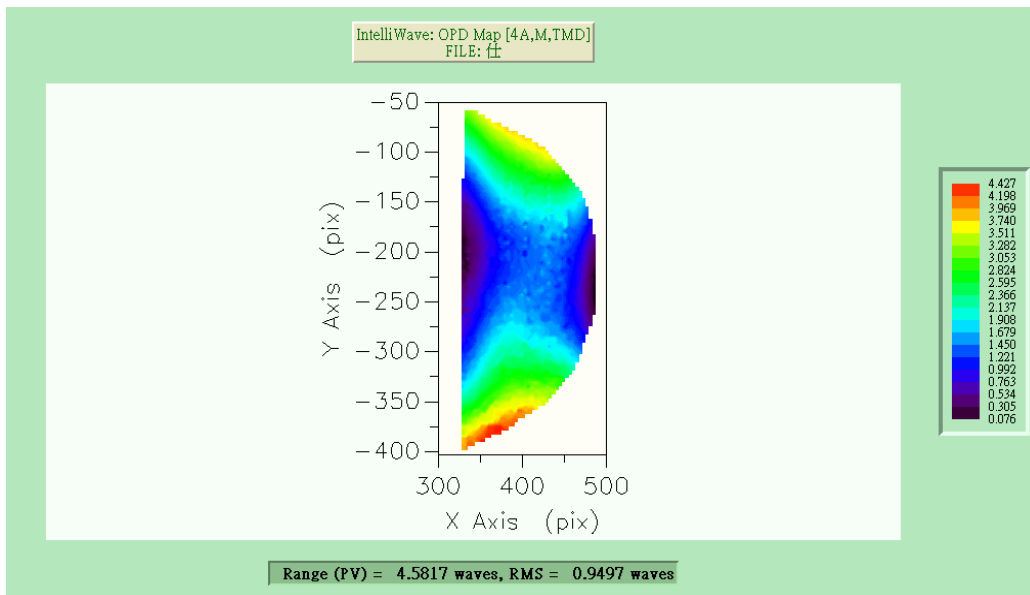


圖 3.4a PVC 塑膠板二維相位分佈圖

(單位:波長)

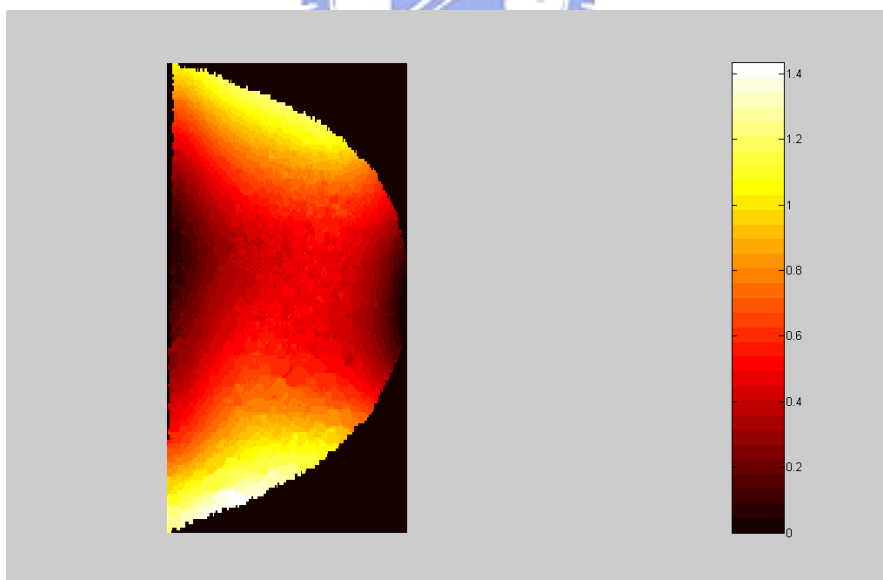


圖 3.4b PVC 塑膠板二維高度分佈圖

(單位: μm)

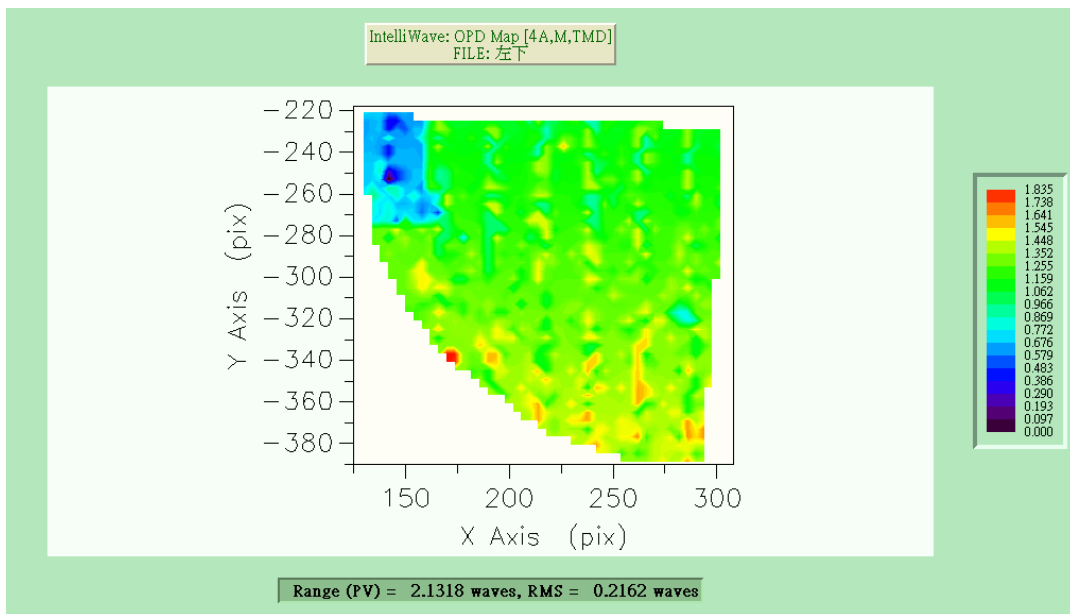


圖 3.5a 玻璃板二維相位分佈圖
(單位:波長)

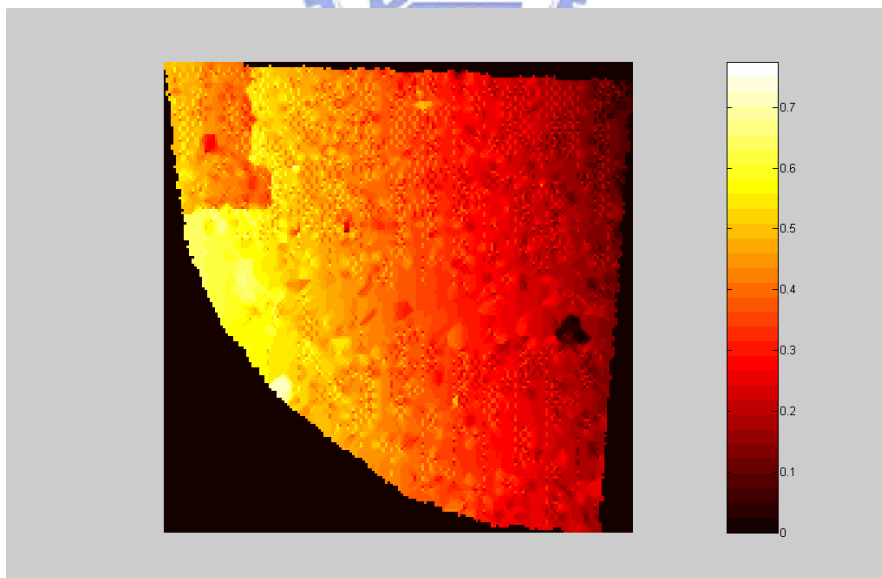


圖 3.5b 玻璃板二維高度分佈圖
(單位: μm)

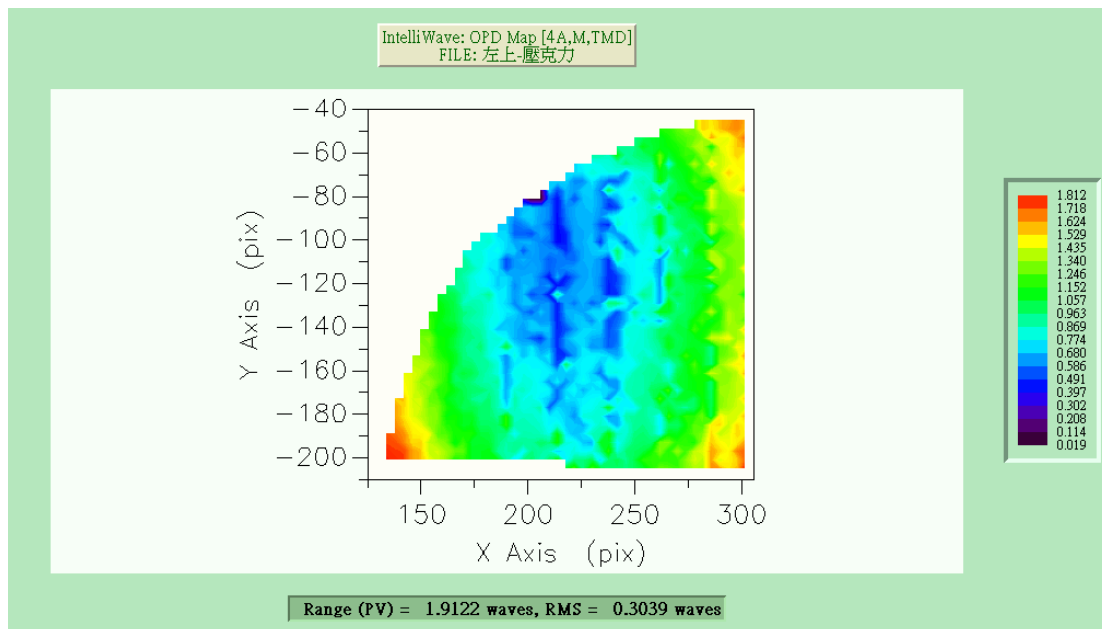


圖 3.6a 壓克力板二維相位分佈圖

(單位:波長)

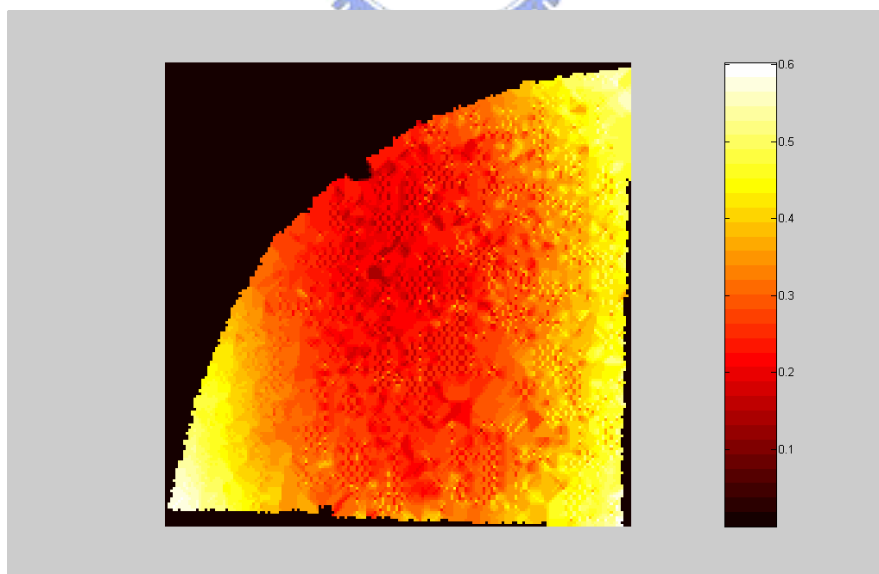


圖 3.6b 壓克力板二維高度分佈圖

(單位: μm)

3.3.4 使用雙波長移相干涉術測量結果

本節將利用雙波長移相干涉術測量樣本兩兩之間高度的變化，由於兩兩之間的高度變化皆為大階高，所以在 Twyman -Green 干涉儀架構中，不容易使得干涉條紋同時出現在三面樣本中，這樣會使得我們利用 IntelliWave™ 軟體解相位時，較不精準。為了準確的量出大階高的高度變化，我們分兩次去測量，首先先測出 BK-7 玻璃板與壓克力板間的高度差，其次再測量出 BK-7 玻璃板與 PVC 塑膠板的高度差。

測量 BK-7 玻璃板與壓克力板之間高度差時，分別選取 $\lambda_a = 632.6nm$ 及 $\lambda_b = 632.65nm$ ，為我們的雙波長此時 $\lambda_{eq} = 8.004mm$ ，符合 $H < \lambda_{eq}/2$ 的條件。接著利用 λ_a 及 λ_b 兩波長求出相位 $\phi_a(x, y)$ 與 $\phi_b(x, y)$ 的圖，如圖 3.7a-b 所示，再將此兩圖代入 Matlab 軟體中由公式(3.8)求得 ϕ ，將 ϕ 以及 λ_{eq} 帶入公式(3.10)中，即可得高度差分佈圖 $H(x, y)$ ，如圖 3.8 所示，圖 3.9 為高度分佈的縱向剖面圖。由縱向剖面圖可以得知，測量出的高度變化約為 1.1mm。

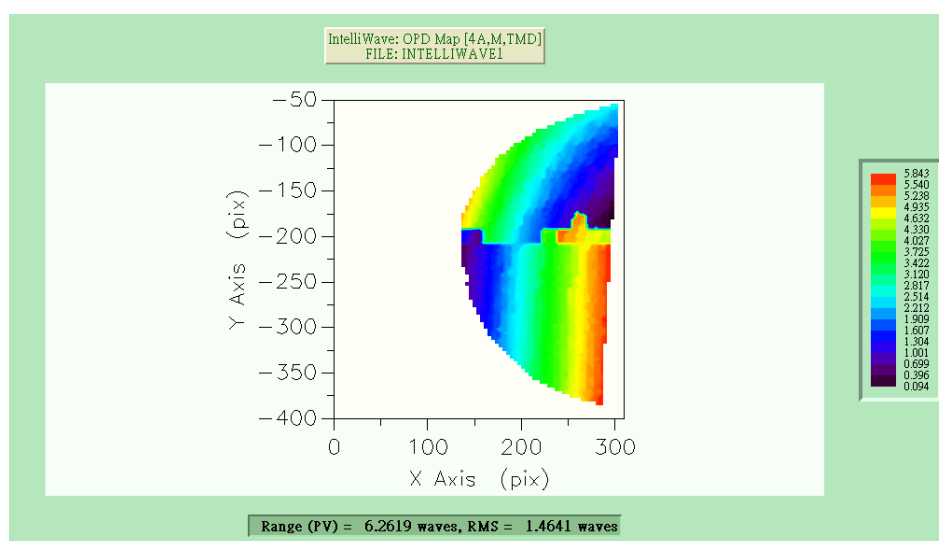


圖 3.7a $\phi_a(x, y)$

(單位:波長)

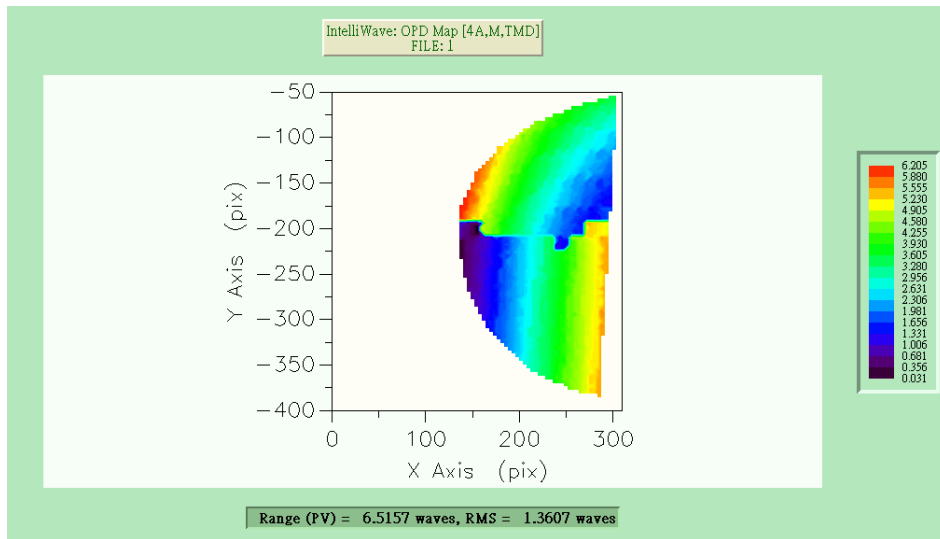


圖 3.7b $\phi_b(x, y)$

(單位: 波長)

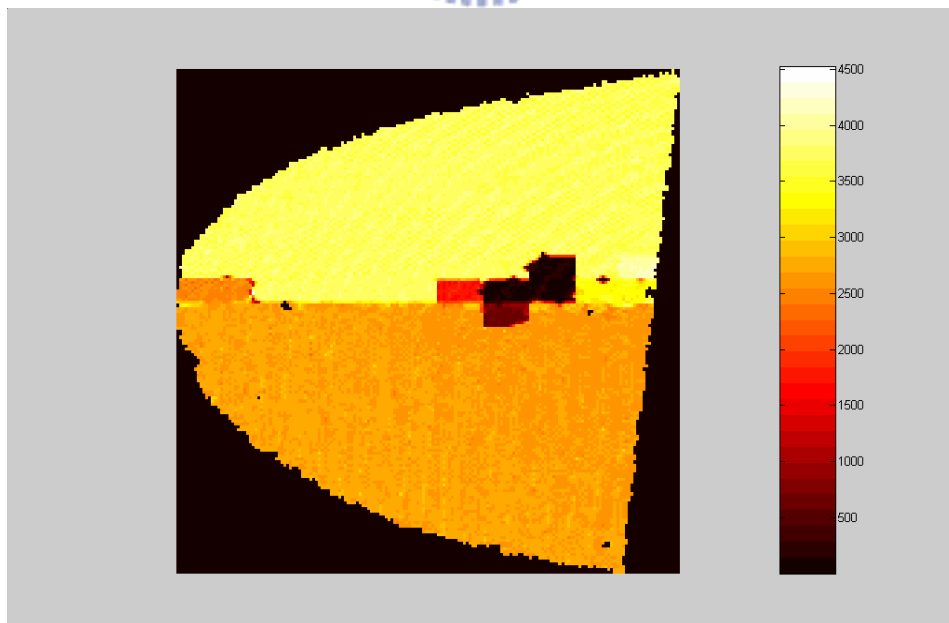


圖 3.8 高度差分佈圖 $H(x, y)$

(單位: μm)

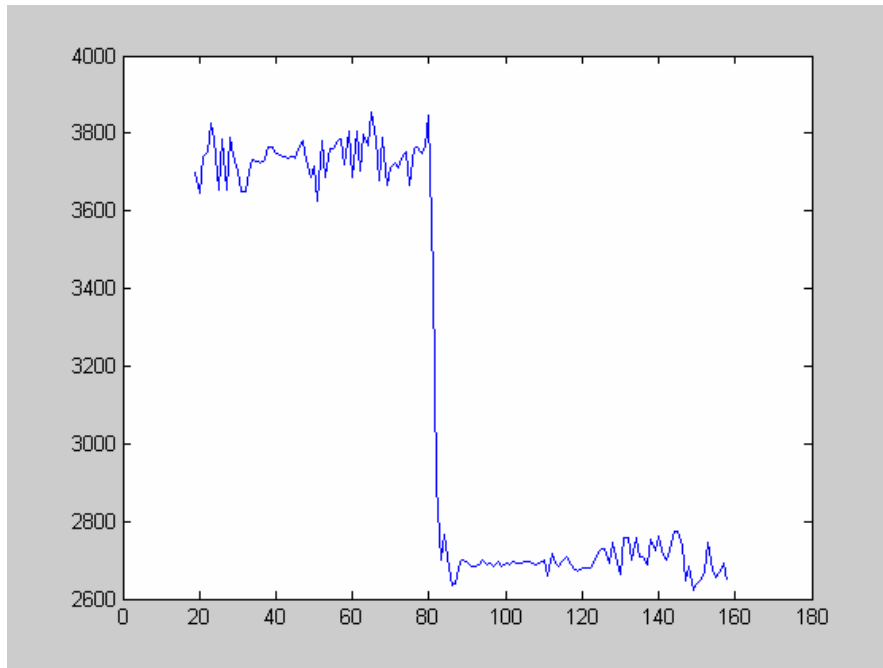
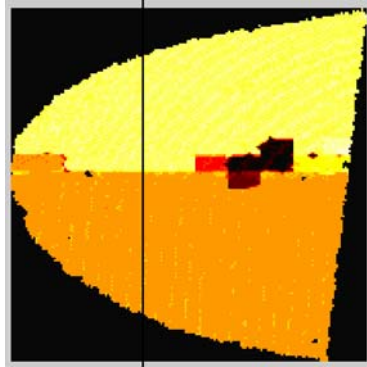


圖 3.9 縱向剖面圖
(單位： μm)

測量 BK-7 玻璃板與 PVC 塑膠板之間的高度差時，由於兩片待測物之間的高度差僅為 0.3mm，所以我們另外選取波長分別為 $\lambda_a = 632.6nm$ 及 $\lambda_b = 632.8nm$ ，以提高精確度，此時 $\lambda_{eq} = 2.001mm$ ，接著重複之前的步驟，分別求出相位 $\phi_a(x, y)$ 與 $\phi_b(x, y)$ ，如圖 3.10a-b 所示，接著求出高度差分佈圖 $H(x, y)$ ，如圖 3.11 所示，圖 3.12 為高度分佈圖的橫向剖面圖。

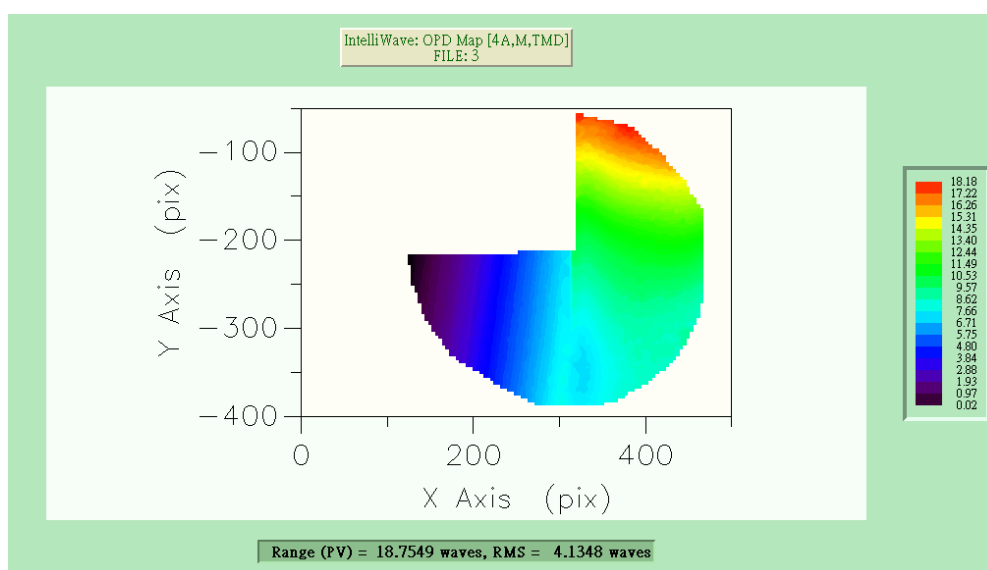


圖 3.10a $\phi_a(x, y)$
(單位:波長)

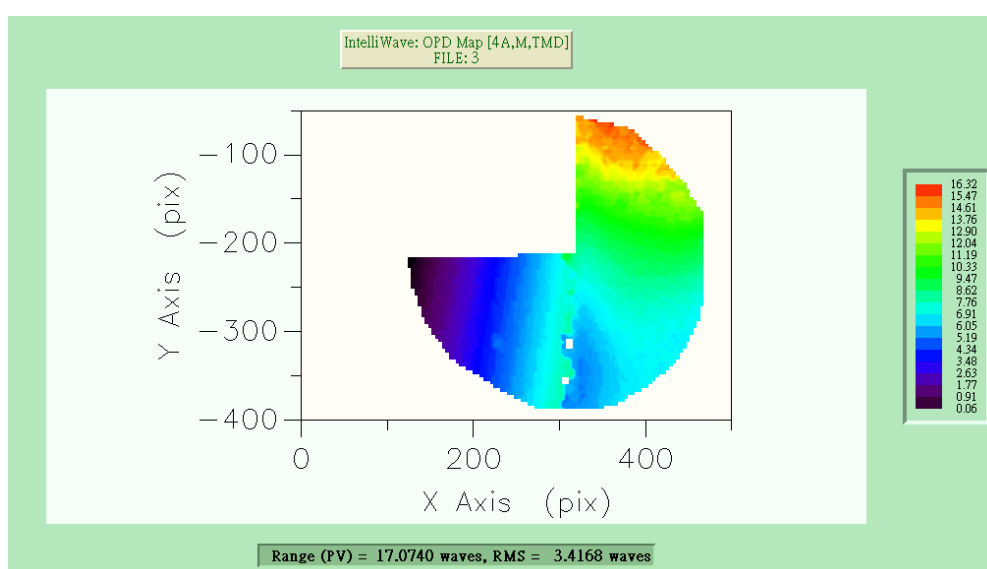


圖 3.10b $\phi_b(x, y)$
(單位:波長)

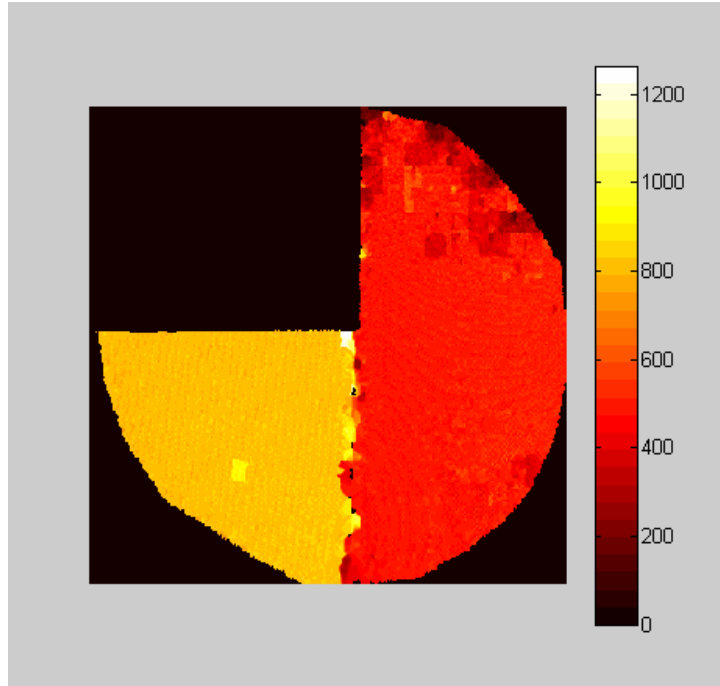


圖 3.11 BK-7 玻璃板與 PVC 塑膠板高度差分佈圖 $H(x,y)$
(單位: μm)

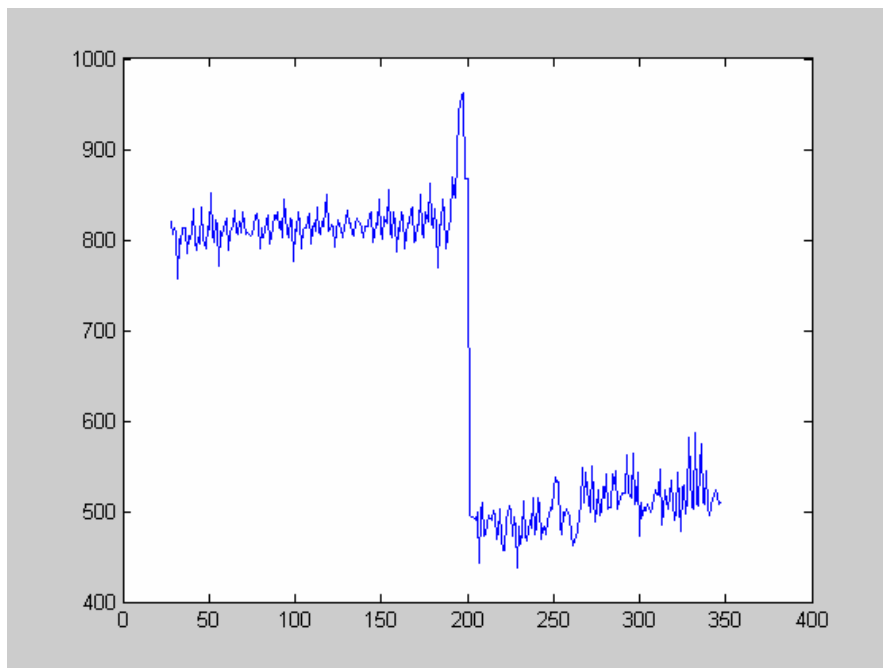


圖 3.12 橫向剖面圖(單位: μm)

結合單波長移相干涉術以及雙波長移相干涉術，不僅能測量物體大階高的高度變化同時也能得到高的精確度。利用雙波長移相干涉術得到兩樣品之間大階高二維高度差分佈時，我們分別在兩樣品中各選取一個 pixel，比較兩個 pixel 之間的高度差 ΔH ，再以其中一個 pixel 作為基準，我們設為 0，而另一個 pixel，我們則設為 ΔH 。以此方法，我們各在三樣本之間選取一 pixel，並求出彼此間的高度差，將高度差加入單波長移相干涉術所得出的二維高度分佈圖，即可得到如圖 3.12a-b，待測物的二維高度分佈圖。

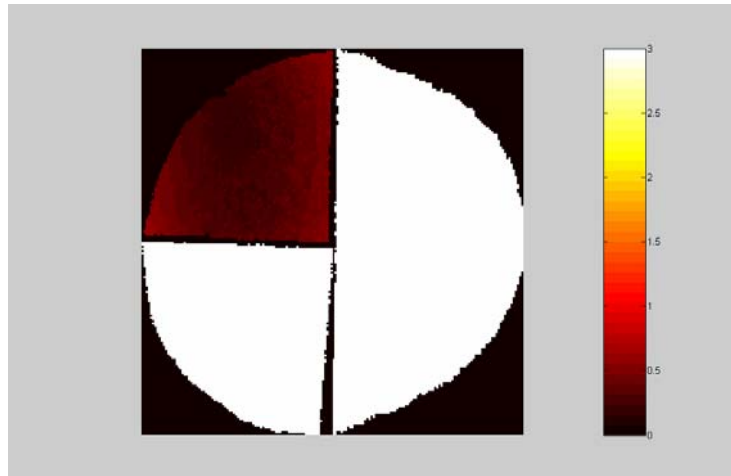


圖 3.12a 待測物二維高度分佈圖(a)

(單位： μm)



圖 3.12b 待測物二維高度分佈圖(b)

(單位： μm)

3.4 討論

由式子(3.7)我們可以得知： $\Delta H = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi$ ，其中 $\Delta\phi$ 為 CCD 取像時所造成的相位誤差，由於在移相干涉術中，灰階值的最大值與最小值分別為 0 至 255，若灰階值被充分的利用，則本法中理想的解析度為 $180^\circ/256 \cong 0.703^\circ$ ，相當於 7.76nm 的高度變化。在雙波長移相干涉術中，為了避免條紋階數模糊的問題，所以本方法選取的 λ_a 與 λ_b 必須使得 $H(x, y)$ 符合 $H < \lambda_{eq}/2$ 的條件。

3.5 小結

本論文我們首先以單波長及移相術測量單面樣本中細微的高度變化，以達到高的精確度。再分別以兩種不同波長結合移相干涉術測量待測物；再將所得的相位值以雙波長干涉解析法計算而得待測物的二維高度分佈。為了證明其可行性，我們以 BK-7 玻璃板、PVC 塑膠板以及壓克力板為我們的待測物，測量了三塊樣本二維的高度分佈。此法具有光學系統架設容易、操作簡單即可適用於大高度差的二維高度分佈量測。