

白光垂直掃描演算法

張宏彰
致茂電子

popai@chroma.com.tw

林耀明
致茂電子

ymlin@chroma.com.tw

摘要

隨著半導體、微機電、生醫等科技產業的進步，相關研究及產品的製作越來越精細，以期有效利用有限的空間，伴隨之相關量測儀器的精確度要求也相對提升。近來因奈米製程的興起，量測精度達奈米級的自動光學檢測儀器也因應而生。白光干涉儀器為一奈米級自動光學檢測儀器，此干涉儀基於白光干涉原理，利用改變基準面及待測物表光程差的方式，產生一系列的干涉圖譜，繼而使用白光垂直掃描演算法(White light vertical scanning algorithm)計算出零光程差的位置，求出待測物表的高度。

本論文以白光干涉條紋對稱於零光程差處、干涉條紋在零光程差處有最大亮度值以及干涉條紋頻率固定等特性發展出快速、準確分析干涉圖譜的 MFPC[®](Maximum Folding Phase Compensation)演算法，計算出待測物體表面階高。習知的演算法僅利用部分波包特性的演算法，本創作運用所有白光波包之特性作為演算法的法則，可準確、快速的獲得待測物體之表面形貌。依此方法於白光干涉系統進行實際驗證，結果顯示此演算法不但在速度上優於現今速度超越其他演算法的質心法(Centroid Method)、量測重複性佳，且可將因繞射產生之 bat wing 去除，此方法已實作在致茂電子發展之 Chroma7502 系統上，並已提出專利申請。

關鍵字：白光干涉、VSI、奈米量測、LCD

壹、前言

利用白光干涉技術獲得三維物表形貌的演算法分成兩類，如下所述：

一、相移干涉(Phase Shifting Interferometry 以下簡稱 PSI)演算法

此類演算法乃利用干涉圖譜的規律頻率相位變化，藉由相位資訊擷取、解相位與相位重建等步驟，計算出表面形貌，此類演算法適用於表面平滑之樣品，一旦待測物表面有較大的高度差(相鄰二像素點高度差大於光波長的八分之一：高度差 $> \lambda/8$)，PSI 演算法便無法正確的求得三維表面形貌。

二、垂直掃描干涉(Vertical Scanning Interferometry 以下簡稱 VSI)演算法

此類演算法乃利用干涉圖譜對稱於零光程差處及在零光程差處亮度最大的特性分析干涉圖譜，找出零光程差(0 Optical Path Difference 以下簡稱 OPD)位置得到表面形貌，此法無 PSI 演算法在待測物體表面上的限制，可處理粗糙表面，量測範圍也無限制。但量測精度卻較 PSI 演算法差；此類方法列舉如下：

U.S. Pat. No.5,633,715，利用干涉圖譜對稱於零光程差處的特性，使用質心法(Centroid Method)算出干涉圖譜的質心-待測表面高度，此法速度快，但若波包處干涉條紋不對稱(實際樣品經常發生)，質心法將無法適用，且此法在掃描範圍大或系統訊雜比大時，雜訊也包含在質心計算中，計算所得表面形貌的準確度差，尤其在表面高度範圍較大的樣品量測誤差更為明顯。

U.S. Pat. No.5133601，利用條紋對比在零光程差處最大的特性，以相位差為 90 度之掃描步幅掃描，獲得干涉圖譜，使用干涉圖譜上連續五點或三點之之亮度數值，求取各中心點之條紋對比，經比較獲得最大條紋對比處(max modulation contrast)，當成離零光程差最近處；再搭配相位補償方式更精確求取零光程差處，此法有下列缺點：條紋對比計算需要很大計算量，非常耗時；且此法抗雜訊能力不佳，一旦在零階干涉條紋(central fringe)附近有較大的雜訊，所求得最大條紋對比處偏離零階干涉條紋，依此使用相位補償法(phase compensation)會產生 2π 整數倍位置差異；使用二次曲線擬合求取零光程差位置，雖不會產生 2π 整數倍位置差異，但使用擬合會花費較多時間。

U.S. Pat. No.5398113，利用干涉圖譜在垂直掃描軸上具有固定空間頻率的特性，以固定掃描步幅掃描，獲得干涉圖譜，經由傅利葉轉換(Fourier analysis)等頻域轉換方式，將干涉資訊轉移至頻率域(frequency domain)做一系列處理，再搭配最小平方逼近法(least-squares fitting)等來推求出零光程差位置。此法雖可精確計算出三維形貌，但使用頻域轉換及最小平方逼近法的資料計算量卻較非常龐大。

使用質心法雖可快速分析干涉圖譜，但準確度較差，而使用 Modulation Contrast 及 Fourier Analysis 等方法雖然可較為精確的計算出待測物表高度，但龐大的計算量卻也減緩了計算上的速度，本論文在同時兼顧速度及準確度之雙重考量下，提供一快速且精確的演算法。

貳、研究方法

本論文使用之表面形貌量測裝置架構如圖 1 所示，使用寬頻光(source)經由準直透鏡形成平行光，經過 45 度分光鏡反射進入干涉顯微物鏡，顯微物鏡將入射光分成二道，一道經由參考鏡面反射，另一道經由置於以掃描平台控制器控制的掃描平台(stage)上之待測物反射，二道反射光再度重合並因光程差不同產生干涉，干涉影像再經 45 度分光鏡、成像物鏡聚焦成像在影像感測裝置(camera)上。利用壓電控制器操控壓電微致動器使干涉顯微物鏡以一定步幅進行 Z 軸移動掃描，使影像感測裝置能接收到一系列由不同光程差產生之干涉影像，繼而將干涉影像輸入電腦系統(computer)，待電腦系統接收完所有干涉影像後，即針對干涉影像中的每一個像素點進行計算分析，利用 Chroma 7502 機台搭配之 MFPC[®]演算法，獲得待測樣品之表面形貌。

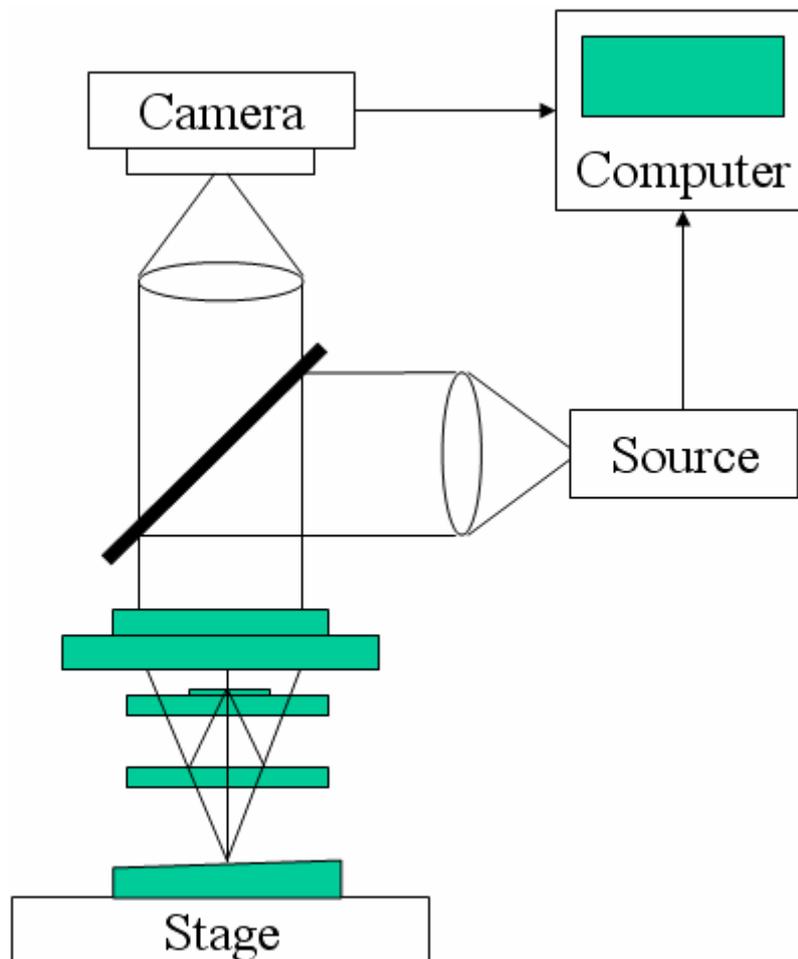


圖 1：白光干涉儀裝置圖

使用 Chroma 7502 機台搭配之 MFPC[®]演算法分析每一像素點之干涉圖譜主要分為三個步驟：

- 一、以每一掃描步幅為相位差 90 度掃描整個干涉圖譜並得到最大亮度值 I_{\max} 之處
- 二、由此最大亮度處開始，找出整個波包最佳對稱位置
- 三、利用相位補償法更精確求得零光程差位置。

若擷取 n 張影像，每個像素點即有 n 個間隔相同的亮度值(I_j)，構成一干涉圖譜，第一步驟是找出亮度最大的位置(Z_{\max})及其亮度值(I_{\max})。因白光相干長度短，干涉條紋一旦不在零階條紋附近，其亮度值皆會有大幅度的減少，因此 I_{\max} 可以確定在零階條紋附近。但由於雜訊影響，於第一步驟找到的 I_{\max} 不一定在零階條紋上，可能在一階條紋或二階條紋上，因此第二步驟利用干涉條紋於零階條紋上對稱性最佳的特性，精確計算零階條紋位置。以 Z_{\max} 為基準向兩側 k 個資料點(F_i)距離內找尋最佳對稱位置，如圖 2；再分別以 F_i 為中心，向左右二側計算一定範圍 t 內條紋的起伏變化，其值為 L_i 、 R_i ，如圖 3 所示：

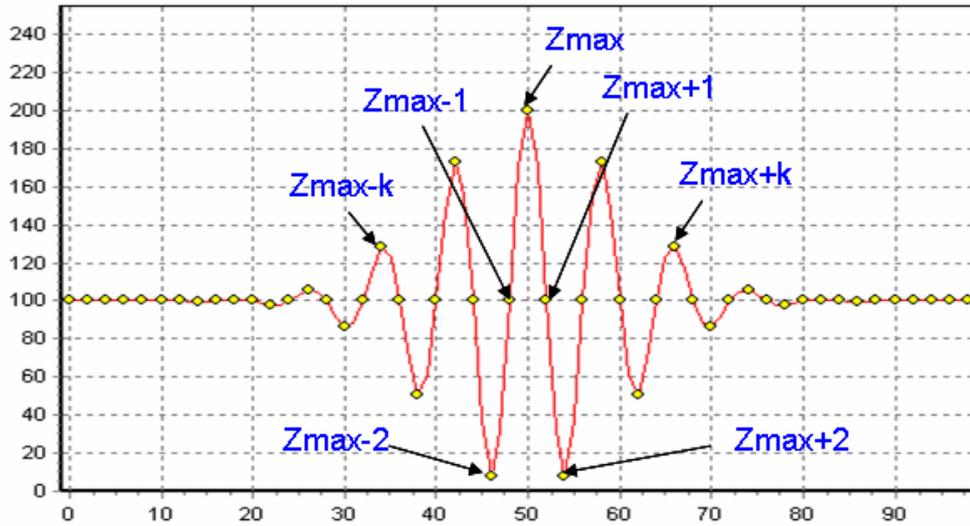


圖 2：有可能之零階條紋位置

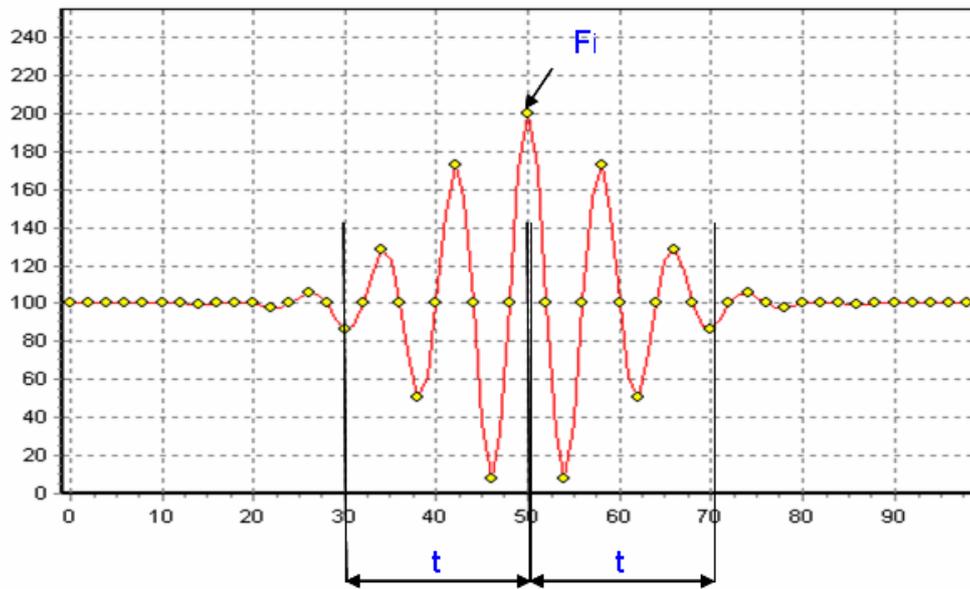


圖 3：以 F_i 為中心，左右各距離 t 以尋找最佳對稱位置

因為以零階條紋為中心時，條紋左右對稱性最佳，可由 L 及 R 的差異量獲得最小差異量之相對位置 F 值，假設為 F_{zero} ，則 F_{zero} 必在零階條紋上，如方程式(1)所示：

$$F_{zero} = \min |L_i - R_i| \quad (1)$$

精確零階條紋的高度 $h(F_{zero})$ 即為 F_{zero} 所在的位置，於前二步驟中可以準確的找到零階條紋位置，再於 F_{zero} 位置利用相位補償的方式，即可不用再經相位重建方法而能更準確的求得零光程差位置-三維表面形貌。其相位補償方式如方程式(2)所示，使用以 F_{zero} 為中心之連續五張影像之亮度值，即可得 F_{zero} 位置與實際零光程差位置還有多少相位差，再利用方程式(4)可由相位差換算成實際高度上之差距 Δh ：

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2(I_{F_{zero}-1} - I_{F_{zero}+1})}{(2I_{F_{zero}} - I_{F_{zero}-2} - I_{F_{zero}+2})} \quad (2)$$

$$\Delta h = \frac{\overline{\phi\lambda}}{4\pi} \quad (4)$$

該像素的高度即為

$$h = h(F_{zero}) + \Delta h \quad (5)$$

參、研究成果

本論文以 60nm 階高之光柵及光學平板作為 Chroma 7502 機台搭配之 MFPC[®]演算法之驗證樣品，以配備 20 倍物鏡之 Chroma7502 白光垂直掃描裝置，掃描步幅設定為 80 nm 進行掃描，取得 125 張解析度為 640*480 影像，與較具代表性的 Centroid 及 Modulation Contrast 演算法進行比較；由圖 4、5(a)(b)(c)二維灰階模擬高度圖形顯示，三者差距不大；經由此三種演算法計算光柵及光學平板表面形貌，並於同一位置取一截線比較，可得圖 6(a)(b)(c)、7(a)(b)(c)；由圖(a)(b)(c)互相比較顯示 Centroid 演算法所計算出截線高度較為粗糙；使用 Modulation Contrast Method 所得之表面會有 bat-wing 情形產生，而使用本論文之演算法，不但在表面上較為平滑，且可去除 bat-wing，由此可證實本演算法之實用性。

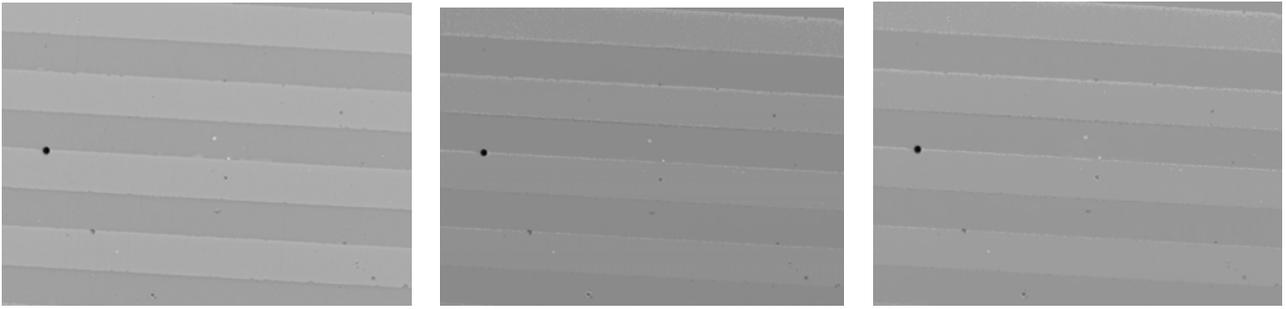
於光柵上之同一截線位置進行 30 次重複量測，得到表 1 及表 2 之不同演算法執行時間及重複性比較表，由比較表 1、2 顯示，使用本論文的 MFPC[®]演算法演算法不論在時間上抑或是重複性驗證上皆較質心法(Centroid)及 Modulation Contrast 來的好。由此可知，本論文所發表的方法在兼顧速度與重複性兩大量測重要因素下，可得到最好的結果。

表 1：演算法執行時間比較表

使用演算法	時間
Centroid Method	2.19 秒
Modulation Contrast Method	2.75 秒
MFPC [®] Method	1.62 秒

表 2：演算法重複性比較表

使用演算法	重複性
Centroid Method	10 nm
Modulation Contrast Method	3 nm
MFPC [®] Method	2 nm



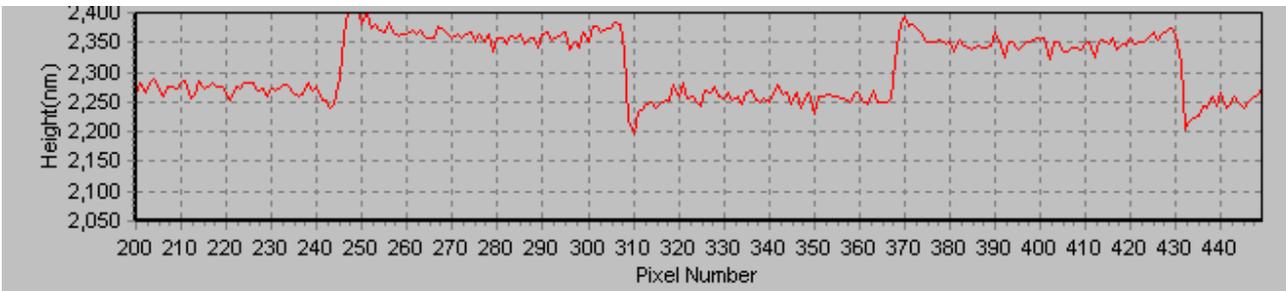
(a) (b) (c)

圖 4：60nm 階高之光柵(a) Centroid Method (b) Modulation Contrast Method (c) MFPC[®] Method

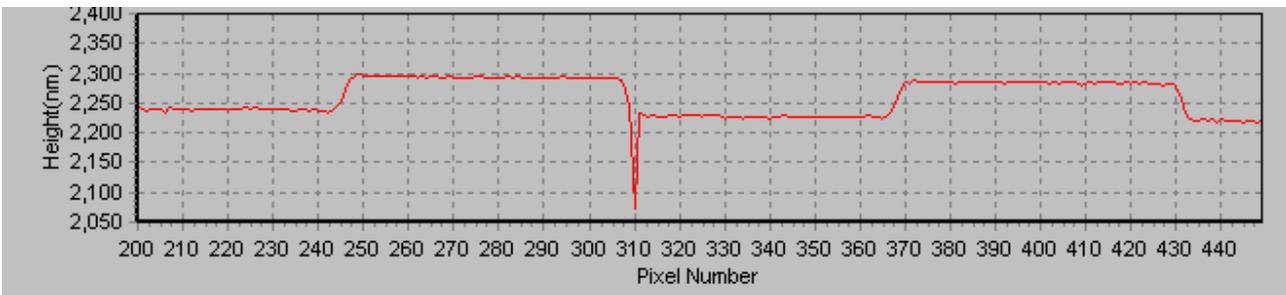


(a) (b) (c)

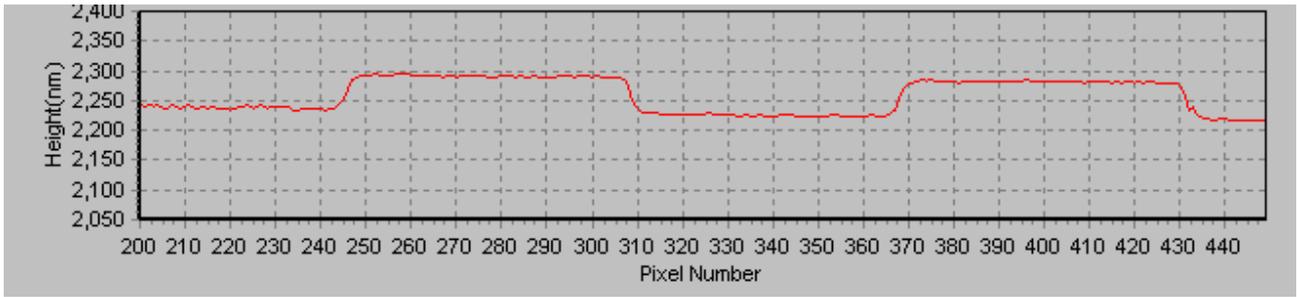
圖 5：光學平板(a) Centroid Method (b) Modulation Contrast Method (c) MFPC[®] Method



(a)

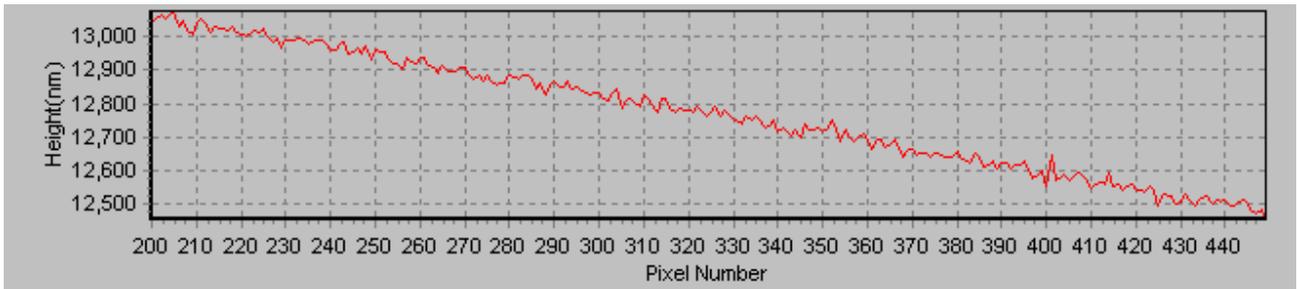


(b)

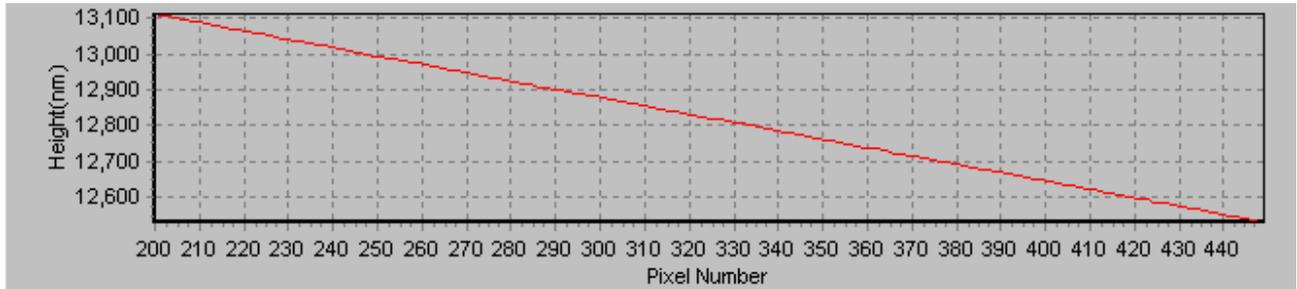


(c)

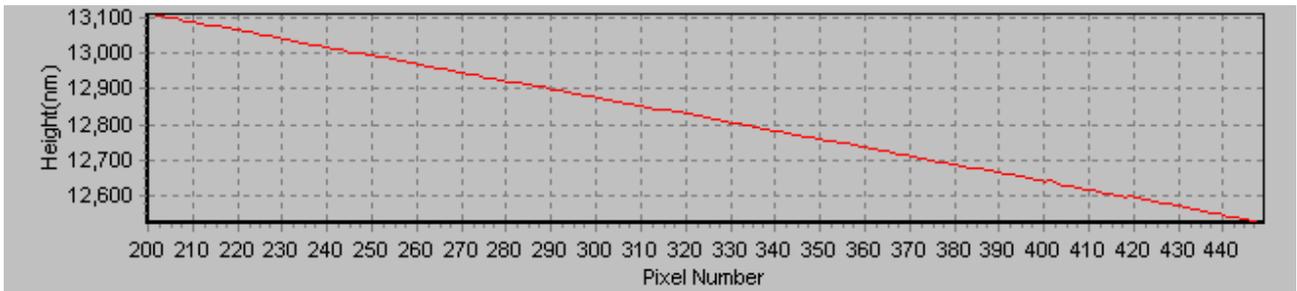
圖 6：60nm 光柵截線高度(a) Centroid Method (b) Modulation Contrast Method (c) Our Method



(a)



(b)



(c)

圖 7：光學平板截線高度(a) Centroid Method (b) Modulation Contrast Method (c) Our Method

肆、結論與建議

本論文以白光干涉條紋對稱於零光程差處、干涉條紋在零光程差處有最大亮度值以及干涉條紋頻率固定等特性發展出快速、準確分析干涉圖譜的方法，計算出待測物體表面階高，此 MFPC[®] Method

演算法運用所有白光波包之特性作為演算法則，搭配 Chroma 7502 白光垂直掃描機台，可準確、快速的獲得待測物體之表面形貌。此演算法相較於現有演算法，不但在速度上有顯著的提升，於量測重覆度上亦得很好的結果。

伍、參考文獻

- [1] Chiayu Ai & Erik L. Novak (1997). Centroid Approach for Estimating Modulation Peak in Broad Bandwidth Interferometry. United States Patent No. 5,633,715
- [2] Donald K. Cohen & Paul J. Caber (1992). Rough Surface Profile and Method. United States Patent No. 5,133,601
- [3] Peter de Groot (1995). Method and Apparatus for Surface Topography Measurement by Spatial Frequency Analysis of Interferograms. United States Patent No. 5,398,113
- [4] Peter de Groot & Leslie Deck (1995). Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain. Journal of Modern OPTICS. Vol. 42, No. 2, 389-401