

# 一種新的白光干涉峰值判定法

陳元方  
成功大學機械系  
[ctyf@mail.ncku.edu.tw](mailto:ctyf@mail.ncku.edu.tw)

胡世國  
成功大學機械系  
[h3po2@hotmail.com](mailto:h3po2@hotmail.com)

葉力旗  
成功大學機械系  
[N1694123@mail.ncku.edu.tw](mailto:N1694123@mail.ncku.edu.tw)

## 摘要

隨著微機電系統的發展，物體結構及元件都愈做愈小，結構表面形貌檢測方面的解析度要求愈來愈高，其中干涉量測技術具高解析度和不會對待測物表面造成傷害的優點，因此使用光學干涉法作為量測技術愈益廣泛。

白光干涉術垂直解析度可達奈米尺寸，量測中常需找出干涉條紋中最大的值，來推算所對應的高度值。在此文中吾人發展一峰值判定法，直接對干涉條紋圖作峰值判定，即將干涉條紋每 3 點做二階的曲線密合，得到密合的峰值，再將每三點密合後的峰值取出，進而得到包絡線，再搭配高斯曲線密合，找出干涉強度最大的位置，藉此，以使量測時間減少。文中吾人自行發展一套白光干涉量測系統及相關軟體，配合 Mirau 鏡，用於微結構表面形貌的量測，經實測比較，峰值判定法和常用的傅利葉轉換法所得到的結果相當接近，在速度上卻能降低 30%

關鍵字：白光干涉、峰值判定法

## 前言

應用在微小結構之元件表面輪廓的干涉技術而言，以白光的同調性差反而成為優點，比起雷射，白光干涉可以用來判斷絕對的零階條紋處，利用此來判定像素間的相對高度。本研究以白光的光波長為高斯分布的假設為前提下，發展利用白光干涉技術獲得三維物體表面形貌的演算法。其分成兩類：第一類為相移干涉演算法[1]，第二類為掃描干涉演算法[2]，即為本研究所使用的方法，一般在量測精度上，相移演算法所能呈現較好的準確性，但在此我們所討論是掃描干涉演算法，來推求得零光程位置，此法可計算出三維形貌，但使用頻域轉換及高斯曲線密合的資料量很龐大。而峰值判定法為減少資料的運算量而來，提供一快速且精確的演算法。

## 研究方法

### 壹、 白光原理及條紋分析方法[4][5][6]

如圖 1 對於一個麥克森干涉儀，當多色光源發出來的光射到分光鏡上後，入射光會分成兩道分別射到參考鏡與待測物上，然後反射回來產生物光與參考光，再經分光鏡在 CCD 上產生干涉。由於參考鏡與待測物到分光鏡的距離相差不多，所以假設物光與參考光的強度值相等，此時令  $I_0 = 2I_{ref} = 2I_{obj}$ ，則白光的理論公式可寫成式子(1)

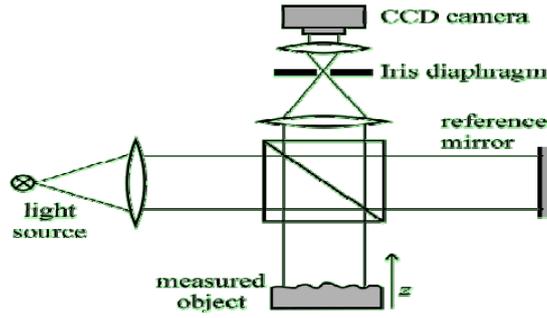


圖 1、麥克森干涉儀

$$I(z) = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[ -2\pi \frac{z - z_0}{l_c} \right]^2 \right\} \cos \left( 4\pi \frac{z - z_0}{\lambda_0} \right) \quad (1)$$

在白光干涉量測時，為了構建出待測物的三維形貌，必須找出干涉強度最大的位置；因此利用白光干涉的理論式子(1)，設定其中的參數：零光程差( $z_0$ )= 5000nm、背景光( $I_0$ )= 100、同調長度( $l_c$ )= 4000nm、中心波長( $\lambda_0$ )= 550nm 模擬得到圖 2 所示的白光干涉連續條紋圖；然而實際量測時僅能得到離散的干涉強度值，如圖中"o"所標示；由圖 2 中可發現，掃描後的離散資料點不一定會落在干涉強度最大的地方，也就是  $z = z_0$ ；因此，為了精確的量出待測物的三維形貌，必須建立一套有效的方法，找出最大干涉強度之位置。

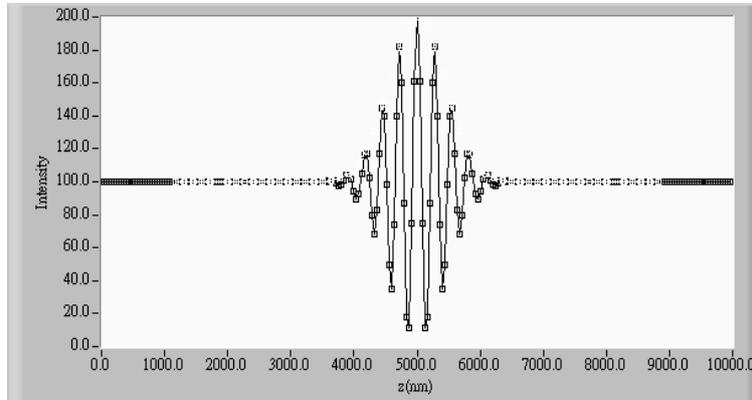


圖 2、模擬白光干涉條紋圖

### 一、 傅利葉轉換法[2]

此方法是藉由傅利葉轉換技術，把只跟包絡線函數有關的頻率部分濾出來以得到包絡線，再搭配高斯曲線密合找出干涉強度最大的位置。由於背景光是一個很平穩不會有震盪的光強度值，所以把圖 2 中全部的資料點相加，再除以總個數，即得背景光強度  $I_0$  的值。由式子(1)減去背景光強度  $I_0$  後平方即可得下式：

$$[I(z) - I_0]^2 = I_0^2 \exp \left[ -2 \left( 2\pi \frac{z - z_0}{l_c} \right)^2 \right] \cos^2 \left( 4\pi \frac{z - z_0}{\lambda_0} \right) \quad (2)$$

再將(2)式中，cos 平方項利用半角餘弦關係可得

$$[I(z) - I_0]^2 = \frac{1}{2} I_0^2 \exp[-2(2\pi \frac{z-z_0}{l_c})^2] + \frac{1}{2} I_0^2 \exp[-2(2\pi \frac{z-z_0}{l_c})^2] \cos(8\pi \frac{z-z_0}{\lambda_0}) \quad (3)$$

圖 2 經上述處理後，其結果如圖 3 所示。將圖 3 傅利葉轉換後，可得到如圖 4 所示的兩組曲線，其中低頻的部分是式子(3)中等號右邊第一項傅利葉轉換的結果，因為在此項中不包含 cos，而僅有包絡線函數的部分；圖中的高頻部分是由(3)式中，等號右邊第二項傅利葉轉換的結果。經由低通濾波濾掉高頻部分，再反傅利葉轉換後，便可得到如圖 5 中 "o" 所示的離散點包絡線。再利用高斯曲線密合可得圖 5 中的實線結果，即可由程式運算中，得到干涉強度最大的位置，也就是  $z = z_0$  的位置。

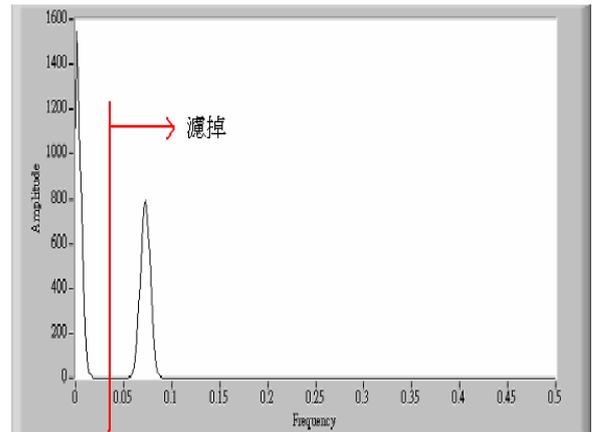
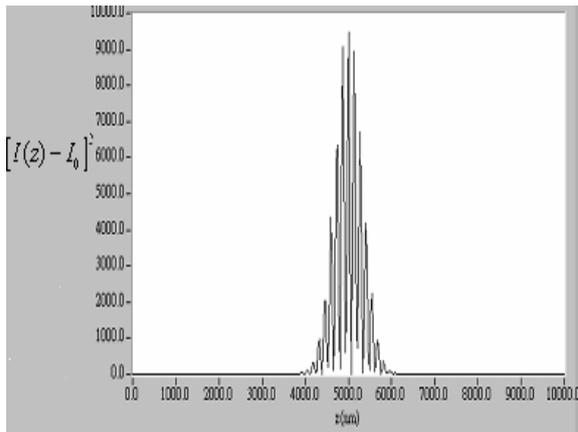


圖 3、圖 1 經減去背景光強度值後      圖 4、圖 3 經傅利葉轉換後的頻譜圖

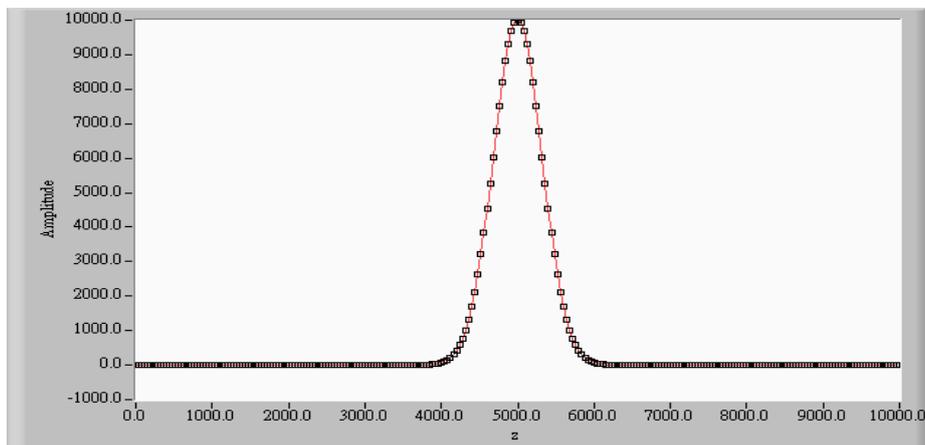


圖 5、包絡線

## 二、 峰值判定法：

傅利葉轉換法的概念是先找出包絡線，搭配高斯曲線密合，找出干涉強度最大的位置。為了節省傅利葉轉換以及低通濾波運算的時間，研究中提出直接對干涉條紋圖進行峰值判定找出包絡線，再搭配高斯曲線密合，找出干涉強度最大的位置，以縮短整體的量測時間。把圖 2 的干涉強度值減去背景光強度  $I_0$  後直接取絕對值後可得圖 6 之結果。繼續對圖 6 中的資料點每隔 3 點做二次曲線密合，若

其二次曲線為開口向下，即找出密合後之最高點位置及強度值，藉此便可得到如圖 7 中 "o" 所示的離散資料點。最後，經由高斯曲線密合後，得如圖 7 中的實線，即可由程式運算中，得到干涉強度最大的位置，也就是  $z = z_0$  的位置。

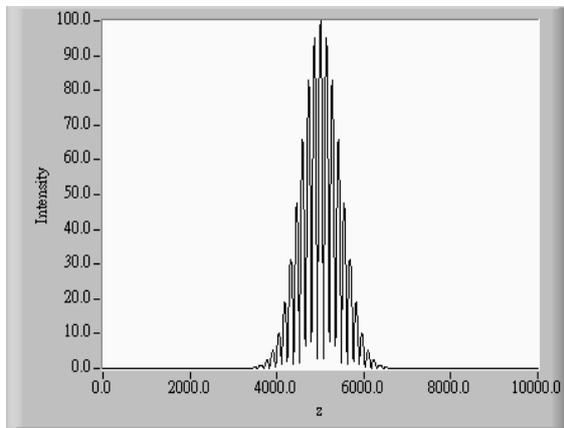


圖 7、圖 1 減去背景光強後取絕對值的

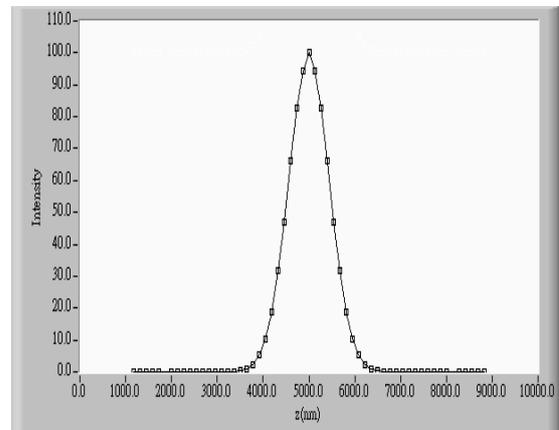


圖 6、條紋的包絡線

## 貳、 實驗系統設置及測試

本研究中所使用的實驗設置為 Mirau 干涉儀，如圖 8 所示。當白光光源發出光經過透鏡聚焦後，形成平行光束，經過分光鏡分成兩道光，反射光在 Mirau 鏡內部分成兩道光，如圖 9 所示；一道光打在待測物上再反射回來(物光)，另一道光由參考鏡 B 反射回去(參考光)，兩道光經分光鏡後在 CCD 上產生干涉，雖然之前是利用麥克森干涉儀來推導白光干涉原理，其結果亦適用於 Mirau 干涉儀。量測時待測物固定在 PZT 上，藉由 PZT 做縱向的步進移動後取像。此量測機構的縱向 (z 方向) 解析度取決於 PZT 的解析度，一般 PZT 的解析度可達 1~5nm。側向 (x 與 y 方向) 解析度則取決於鏡頭的放大倍數與 CCD 畫素的解析度。圖 10 是目前使用的量測系統。影像擷取系統由 CCD 相機、光學顯微鏡、10x Mirau 鏡、影像擷取卡、個人電腦及 PZT 移動系統所組成。

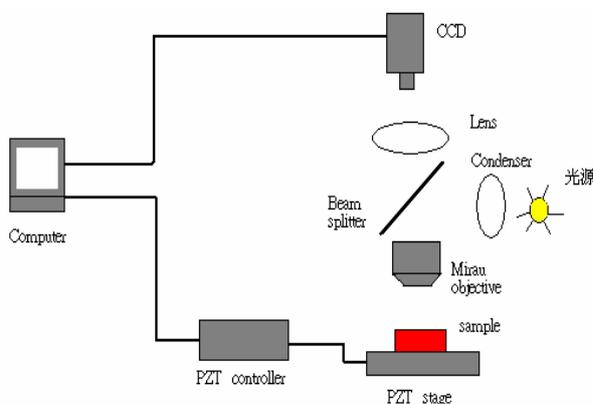


圖 8、實驗系統設置

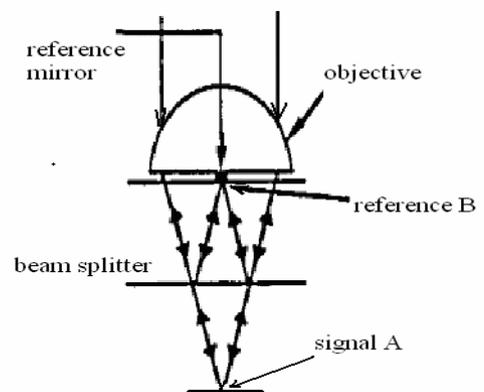


圖 9、Mirau 鏡內部分光

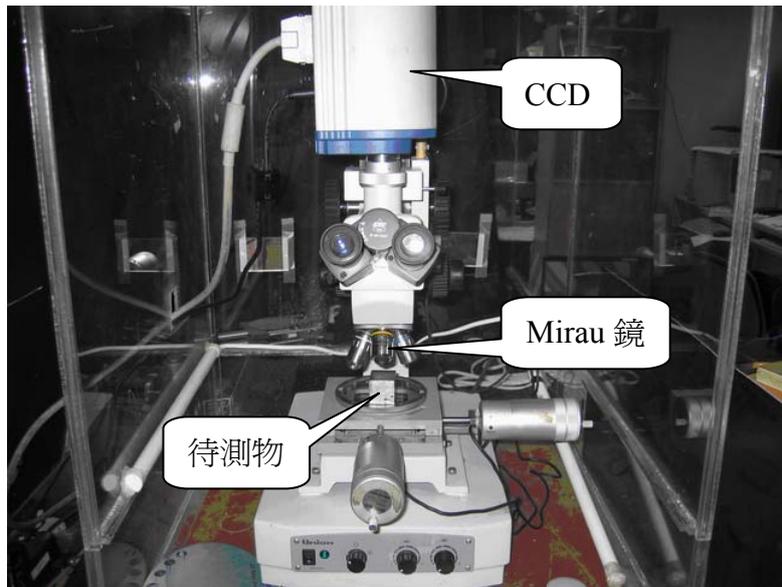


圖 10、實驗系統

## 研究成果

### 壹、實測結果與討論

圖 11 是微拉伸試件，由  $\alpha$ -step 量測試件中間橫截面的結果在圖 12 所示，其高低差約為 4.4 micron。圖 13 與圖 14 是分別利用傅利葉轉換法和峰值判定法的量測結果，每一個移動步階為 30 nm 取像，量得中間橫截面部分的 3D 形貌。雖然圖 13 跟 14 看起來極為相同，可是由橫截面可發現有少許的不同，圖 15 是用峰值判定法所量到的截面圖；圖 16 是用傅利葉轉換法所量到的截面圖，假使以  $\alpha$ -step 量測的結果為基準值，則圖 15 的標準差為 24 nm，圖 16 的標準差為 21.3nm。運算速度方面，以圖 15、16 為例，傅利葉轉換法約為 65 秒，相當於 0.209 pixel/sec，峰值判定法約為 45 秒，相當於 0.145 pixel/sec，其差距主要是因為傅利葉轉換法需藉由傅利葉轉換以及低通濾波得到包絡線，而峰值判定法是對干涉條紋直接每 3 點做一次曲線密合，進而得到包絡線，所以運算速度自然比傅利葉轉換法少了百分之 30。

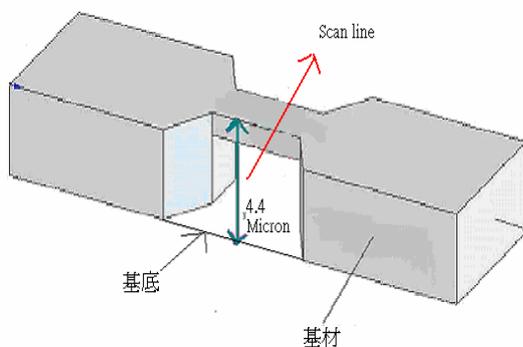


圖 11、微拉伸試件

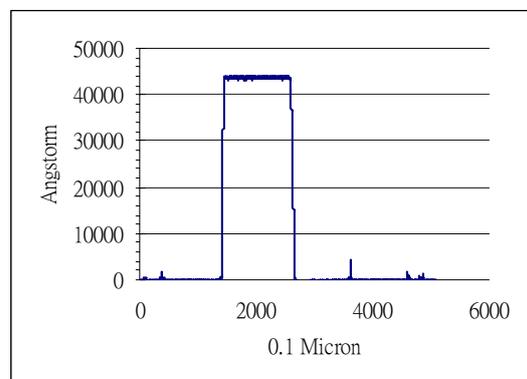


圖 12、 $\alpha$ -step 量測結果

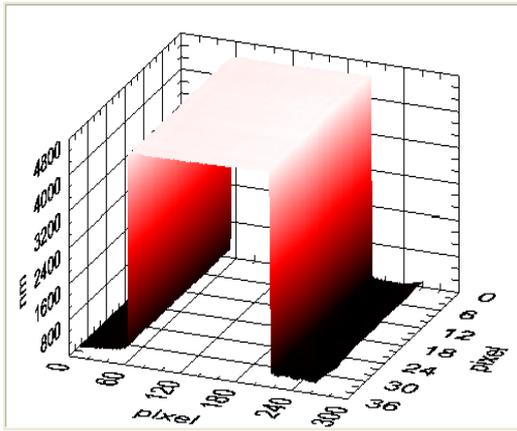


圖 14、傅利葉轉換法量測的 3D 形貌

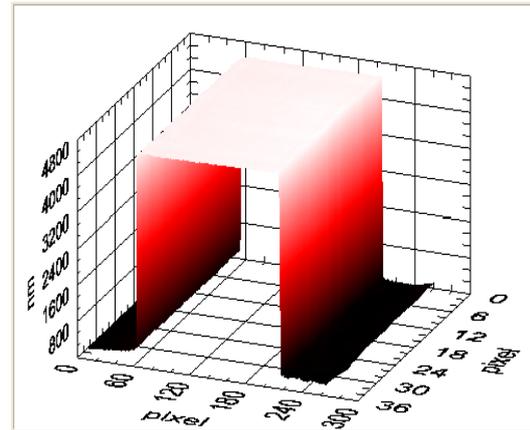


圖 13、峰值判定法量測的 3D 形貌

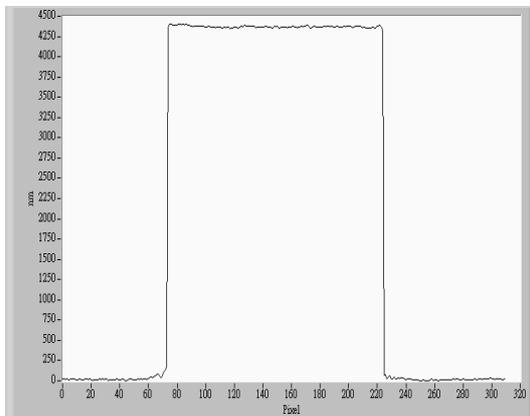


圖 15、峰值判定法所量到的截面圖

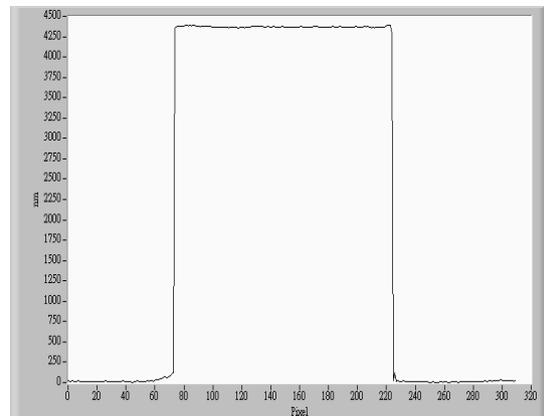


圖 16、傅利葉轉換法所量到的截面圖

## 結論與建議

### 壹、 結論

本研究開發一套奈米級解析度的白光干涉儀系統，用於微結構表面形貌的量測。基於白光干涉的特性，利用傅利葉轉換法及所研發的峰值判定法來建構軟體部分的演算法，即還原出量測試件的外型輪廓。本演算法相較於傅利葉轉換法，雖然在量測的精準度上並沒有較傅利葉轉換法精準，但在運算時上卻能降低 30%，因傅利葉轉換法需將影像中，每一像素的干涉的強度都轉換至頻域，濾除高頻來求得包絡線，導致所需時間較多，所以直接在時域上，將所得的干涉條紋，利用每三個點曲線擬合，找到峰值及其包絡線，進而建構外型輪廓的高度。目前我們仍繼續研究不同方法，期能在雜訊影響下，仍能維持快速和量測的準確性。

### 參考文獻

1. P. Hariharan and Maitreyee Roy, "White-light phase-stepping interferometry for surface profiling" Journal of Modern Optics, 1994, Vol. 41, no. 11, 2197-2201
2. Mingzhou Li, Chenggen Quan, Cho Jui Tay, Ivan Reading, Shihua Wang, "Measurement of transparent coating

thickness by the use of white light interferometry”Proc. of SPIE, Vol. 5852, Singapore, 2004.

3. M. Born , E. Wolf , Principles of Optics , Pergamon, Oxford, 1980
4. Patrick Sandoz and Gilbert Tribillon , Profilometry by zero-order interference fringe identification , Modern Optics , vol.40 , 1691-1700 (1993)
5. J. Peřina, Z. Hradil, B. Jurčo, Quantum optics and fundamentals of physics, Kluwer Academic, Dordrecht, 1994