

瞬時相移干涉應用於表面形貌之量測

Surface Profile Measurement with Instantaneous Phase-Shifting Interferometry

杜宜亮、陳元方

Yi-liang Du, Terry Yuan-Fang Chen

表面形貌量測在半導體及光學元件製造上是一項重要的技術。光學干涉量測以非接觸、全場性、速度快與高精密等優勢，大量應用於高科技產品表面形貌的量測。然而運用相位移技術時，由於相移機構的移動，取像時間較長，受到環境振動或空氣擾動的影響，容易產生較大誤差，亦不適用於生產線上的檢測。本文中簡介一套可以瞬時(或同步)擷取不同相位移干涉條紋圖像之量測系統。此系統利用偏光相位移干涉原理，透過一四影像合併鏡組，運用單一 CCD 同時擷取不同相移之干涉條紋，經由灰階校正及數位對正各影像之位置，可由相位移法以及相位展開求得相位值，轉換得到待測物的表面形貌。此系統經以平面鏡及晶圓進行實測，以驗證及探討此量測系統之準確性、誤差與穩定性。此系統之研發可以減除外在環境振動與量測時間過長所造成的影響，亟具實際運用的價值。

Surface profile measurement is an important technique in the semiconductor industry and the manufacturing of the optical components. Due to its noncontact nature, full-field, high accuracy and resolution, phase-shifting interferometry (PSI) has been quite evolved in surface profile measurement of high-tech products. However, movement of the phase shifter, the vibration and air disturbance, and longer image-grabbing time make the PSI measurement inaccurate, and not suitable for on-line measurement. In this context, a measurement system that is capable to grab the phase-shifted interferometric images instantaneously (or simultaneously) for surface profile measurement is introduced. Using the polarization phase-shifting interferometry principles and through a four-image combining device, the system allows the four phase-shifted images to be grabbed by one CCD simultaneously. Then the grey-level values of the four images can be adjusted, digitally aligned to calculate the phase. The surface profile is obtained after phase unwrapping. Test of the system on a flat mirror and a silicon wafer demonstrates its usefulness. The accuracy and stability of the measurement is discussed. The development of such system will reduce the effect due to environmental vibration, and thus applicable for practical use.

一、前言

表面形貌量測在半導體及光學元件製造上是一項重要的技術。隨著微奈米科技的發展，對產品的性能及品質的要求愈來愈高，因此，如何在生產線

上快速且精確地檢測產品的 3D 形貌，確保產品製程的良窳，即成為高科技產業成功發展的一個重要關鍵。

在現有的形貌檢測儀中，探針式輪廓儀 (stylus profiler) 是屬於接觸式的量測方式，容易對於待測

物表面造成破壞，達到次微米等級；掃描式探針顯微鏡 (scanning probe microscope, SPM) 解析度達到奈米，但量測速度慢且範圍小；干涉光學輪廓儀 (interferometric optical profiler) 則以非接觸的量測方式，可快速測得全場的表面形貌，不像探針掃描儀器只能做逐點量測，因而愈來愈受到業界的歡迎。應用光學干涉量測時，相位移技術是最廣為使用的方法之一，因其分析快速且精確；常用的光源是單色光，通常為雷射。當應用相位移法量測試件表面形貌時，一般需要利用步進馬達或是壓電致動器來推動試件或是參考鏡，或是利用轉動偏極板，以得到不同相位的干涉條紋影像，容易受到周遭環境的影響，因此較不適合於工業界的應用。

為了解決上述問題，需要發展一種可以在同一時間擷取不同相位移干涉條紋圖像之技術。Koliopoulos⁽¹⁾ 等人利用極化分光鏡、四分之一波板、二分之一波板和 4 CCD 建立可同時擷取不同相位干涉圖之系統，利用四步相位移法及相位展開法，得到試件表面形貌，以減少外在環境影響，如振動、空氣擾動等，量測結果顯示具有良好的再現性。Helen⁽²⁾ 等人提出利用消色差旋轉的偏極板可造成相位變化，並可建立相位移干涉儀。Garcia⁽³⁾ 等人則利用全像光學元件與相位光柵，製作相位移干涉儀，以用於動態量測。Hettwer⁽⁴⁾ 等人則是利用二分之一波板、極化分光鏡、繞射光柵、四分之一波板及單一 CCD，建立三步相位移干涉儀，發現主要誤差來自各不同相位移干涉影像間之像素不對齊；若各干涉影像光強不同，也會造成相位移量測之誤差。製造繞射光柵需較精確的技術，才能使擷取之干涉影像具有正確的相位移。Mitsutani⁽⁸⁾ 等人在其專利中，提出利用分光鏡與直角稜鏡組合，將干涉影像分為三道具有不同相位移之影像，用於表面形貌量測。Sivakumr⁽⁵⁾ 等人利用極化分光鏡、偏極板、四分之一波板、改良式之麥克森干涉儀及四 CCD，建立量測大面積之瞬間相位移干涉量測系統，採用手動的方式校正干涉影像之位置，以降低誤差。

在本研究中，吾人設計研發一新的瞬間偏光相位移干涉系統，建構一四影像鏡組，運用單一 CCD，同時擷取不同相移之干涉影像，經過灰階

校正，數位影像相關自動對正各影像之位置，利用相位移法與相位展開法，求得相位值，並轉換得到待測物的表面形貌。研發之系統並以傾斜平面鏡及晶圓進行實測，驗證及探討此量測系統之準確性、誤差及穩定性。

二、研究方法

1. 瞬間相位移量測原理

就系統及運算的複雜性而言，四步相位移法是相位移法中最為適中的一種。本研究為達到瞬時擷取四張相移影像之目的，設計製作之單一 CCD 系統架構如圖 1 所示，其中 L1、L2 與 L3 為聚焦透鏡，用以調整光束之大小；PBS 代表極化分光鏡，QWP45° 代表極化方向為 45° 的四分之一波板；以分光鏡與直角稜鏡組成之鏡組 (BS & RAP set) 如圖 2(a) 所示，此鏡組可將進入之影像一分為四，並經圖 2 (b) 所示之偏光板組擺置，獲得不同相位，圖中 P0°、P45°、P90° 與 P(-45°) 分別代表極化軸方向 0°、45°、90° 與 -45° 的偏光板。當雷射光經由空間濾波器濾掉雜訊之後，再經過聚焦透鏡 L1，使雷射光變為一平行光，當通過 PBS 後分成 P 波與 S 波，其中 P 波穿透、S 波反射，再分別通過 QWP45°，讓其以平行光分別投射到試件面與參

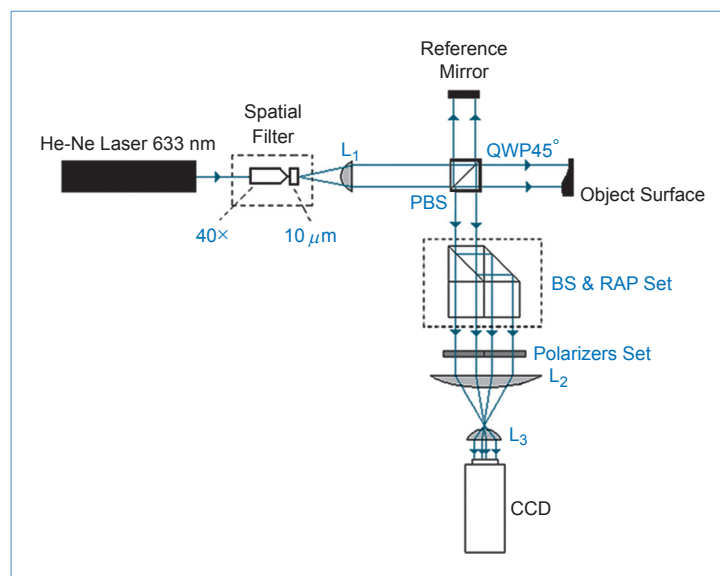


圖 1. 單一 CCD 瞬時偏光相移系統架構圖。

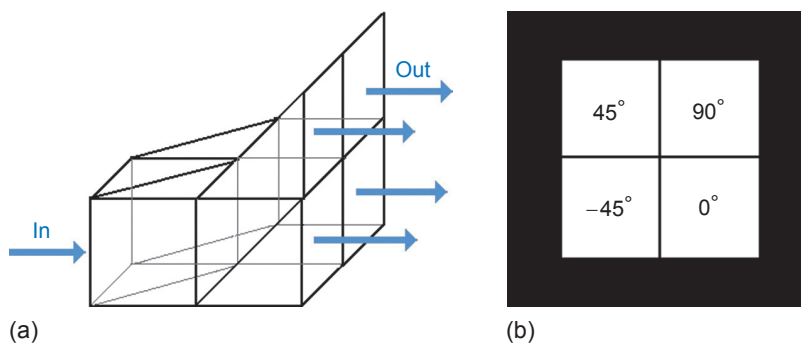


圖 2.

(a) 分光鏡與直角稜鏡組，(b) 偏光板組。

考面，反射後經過其 QWP45° 與 PBS，再一起通過另一個 QWP45° 後，經由 BS & RAP set 分為四道光，再個別透過為 P0°、P45°、P90° 與 P(-45°) 之偏極板，最後由 CCD 擷取影像。

以 P45° 的光路來看，雷射光源射入分光鏡 PBS 後，各經過 QWP45° 投射到試件面與參考面，反射後再次經過 QWP45°、PBS，之後共同通過 QWP45°、BS & RAP set，最後通過 P45°，在 CCD 擷取到的干涉光強大小，經由 Jones Matrix 推導可得 (1) 式：

$$I_1 = \frac{1}{2}(a^2 + b^2 + 2ab \times \cos \alpha) \quad (1)$$

其中 a 為試件面之反射光強， b 為參考面之反射光強， α 為光路徑差所造成之相位差值，與試件面及參考面之高度差有關。同理，在 P90°、P(-45°) 與 P0° 上所擷取到的干涉光強大小可表示為 (2) 至 (4) 式。

$$I_2 = \frac{1}{2} \left[a^2 + b^2 + 2ab \times \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_3 = \frac{1}{2} \left[a^2 + b^2 + 2ab \times \cos(\alpha - \pi) \right] \quad (3)$$

$$I_4 = \frac{1}{2} \left[a^2 + b^2 + 2ab \times \cos \left(\alpha - \frac{3\pi}{2} \right) \right] \quad (4)$$

上述四張影像式子，可經由簡單的三角函數轉換及代數運算，得到影像上各點的相位值 α ，如 (5) 式所示。

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3} \right) \quad (5)$$

由於 (5) 式是以反正切 (\tan^{-1}) 函數為運算基礎，故計算出來之相位值會介於 $-\pi/2$ 與 $\pi/2$ 之間。但相位值理應介於 $0 - 2\pi$ 之間，故可利用相位象限判別將相位值恢復到 0 至 2π 區間。由於相位移法運算結果是反正切函數 \tan^{-1} 的形式，得到的相位值經判斷後，相位會截斷在 0 至 2π 之區間內，因此可利用 Macy 相位展開法⁽⁶⁾，將被截斷的相位恢復為原來連續的相位；此過程乃是將相位中相鄰兩相位差超過某一定限度者，加上或減去差值來消除截斷，恢復連續相位。有了連續相位值之後，即可經由相位值與光路徑差，亦即試件面與參考面高度之差值關係，利用 (6) 式將相位值轉為高度值 h ，以得到待測物之表面形貌。

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \alpha(x, y) \quad (6)$$

其中 λ 為雷射光源之波長。由式 (5) 可得知，由光路徑差變化成之相位值變化，其最大可容許的範圍為 2π ，若相位值變化大於 2π 時，則將會產生相位展開錯誤之情況。

2. 影像對正—影像相關法⁽⁷⁾

利用四影像計算相位值時，需確保具不同相位移之干涉條紋影像上各像素是對齊的。因此在本文中利用數位影像相關法 (image correlation) 計算 CCD 所擷取之四影像位置之差距，並利用此計算出之位置差異調整各不同相位移之干涉影像，使其各像素皆對齊。

當利用 CCD 相機擷取試件在移動前後之影像後，倘若物體影像在移動前後各點灰階不變，並且

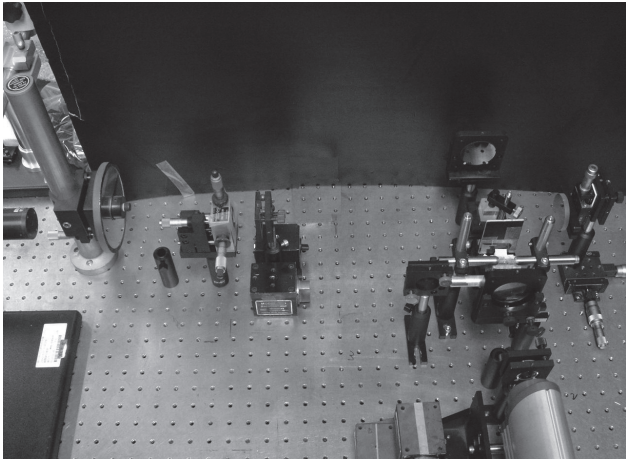


圖 3. 單一 CCD 瞬時偏光相移實驗架設圖。

為一對一之狀態，則此取像區域上任一點在移動前後的位置 (x, y) ， (x', y') 可以表示成

$$x' = x + u \quad (7)$$

$$y' = y + v \quad (8)$$

當 (u, v) 兩個參數被決定時，移動前試件表面上的這一個區域 S 會對應到移動後的某一區域 S' 。因此欲決定各影像的差距時，可令區域 S 影像座標點 (x, y) 之灰階值為 $G_0(s)$ ，區域 S' 影像座標點 (x', y') 之灰階值為 $G_d(s')$ ， $G_0(s)$ 與 $G_d(s')$ 之間的關係應為 $G_0(s) = G_d(s')$ 。吾人可使用最小平方關係法 (least squares correlation)，將其標準化，可得一相關值函數 $\bar{C}(\vec{p})$ 如式 (9)：

$$\bar{C}(\vec{p}) = \frac{\sum_{s \in S, s' \in S'} [G_0(s) - G_d(s')]^2}{\sum_{s \in S} G_0^2(s)} \quad (9)$$

圖 4. 單一 CCD 所擷取之具特徵影像，(a) 未分割前影像，(b) 分割後之四影像。

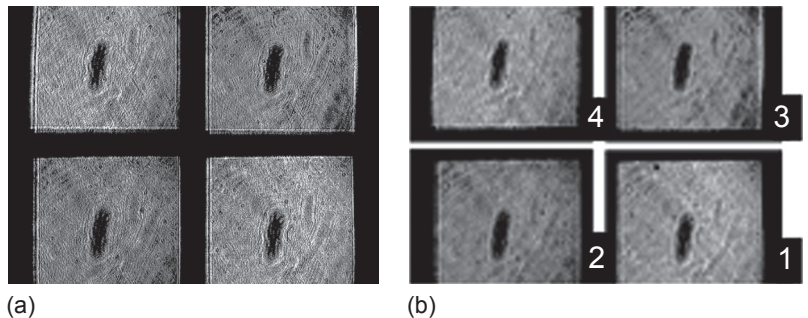


表 1. DIC 計算出各影像之位置差距。

Image No.	位移 (pixel)	
	u	v
1	0	0
2	-5	1
3	-1	0
4	-1	-1

變動搜尋區域 S' ，當相關值函數 $\bar{C}(\vec{p})$ 為最小時，即可得到相關影像的差距 (u, v) 。

三、實驗系統與校正

依據圖 1 之系統架構，建立之實驗系統如圖 3 所示。系統中除各式光學元件外，尚包括個人電腦、CCD 相機 (Polariod, 1600×1200 pixel)、影像擷取卡 (Tekram, PCI SCSI 卡) 及波長 632.8 nm 之 He-Ne 雷射。

在本系統中，利用改變偏極板極化軸之角度來改變干涉條紋之相位移，因此須對偏極板之極化軸角度做一校正。此可由光通過一已知極化軸角度之偏極板之後，再通過一可調整極化軸角度之偏極板，最後再由 CCD 擷取其光強來確定。將具一記號之平面鏡做為試件面，利用 CCD 擷取其影像，將所擷取之影像分為四個，如圖 4(a) 與 (b) 所示，以編號為 1 之影像為基準，配合 DIC 方法，可得到其他各圖與圖 1 之間的位置差距，如表 1 所示，在 x 方向差距為 u ，在 y 方向差距為 v 。得到各圖之位置差距之後，即可據以作為分割四相位影像之用。

實驗流程如圖 5 所示，首先擷取一張具有記號之影像，並將影像一分為四，運用 DIC 將分出來

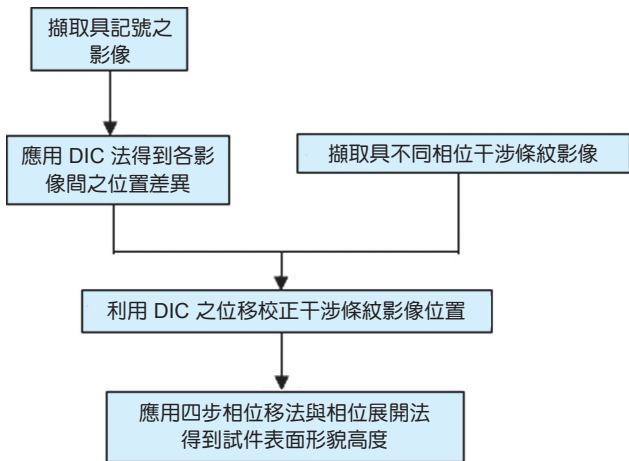


圖 5. 實驗流程圖。

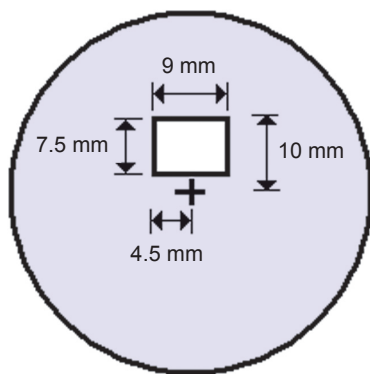


圖 6. 直徑 5 mm 之平面鏡及量測選取範圍。

的四張影像校正至同一位置；然後針對待測試件，再擷取不同相位的干涉條紋影像，將影像一分为四，並利用 DIC 數據校正四張干涉影像的位置，此後即可利用四步相位移運算與相位展開，最後代入 (6) 式，即可得到表面形貌

四、實驗結果與討論

1. 平面鏡量測

本實驗量測一直徑 50 mm、傾斜之平面鏡，量測區域為 9 mm × 7.5 mm，如圖 6 所示，擷取之干涉條紋影像如圖 7 (a) 至 (d) 所示。經校正位置、相位移計算與相位展開之後，可得其相位圖及相位展開圖，如圖 7(e) 至 (f) 所示。將相位值轉成高度值，可得平面鏡量測區域的表面形貌，如

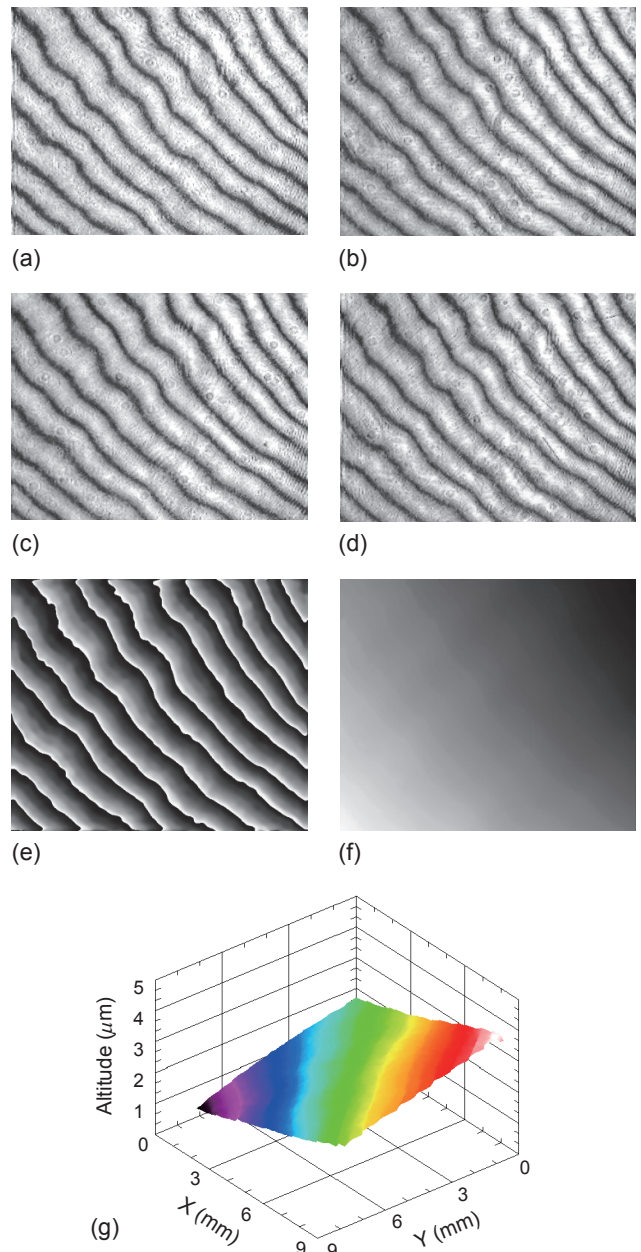


圖 7. 單一 CCD 所擷取之傾斜平面鏡不同相位干涉條紋影像及量測形貌。(a) 0、(b) $\pi/2$ 、(c) π 、(d) $3\pi/2$ 、(e) 相位圖、(f) 相位展開圖與 (g) 表面形貌圖。

圖 7(g) 所示。將相同位置垂直拉線量測之高度值與 α -step 形貌量測儀之量測結果做比較，如圖 8 所示，其平均誤差為 $0.082 \mu\text{m}$ ，誤差標準差為 $0.045 \mu\text{m}$ ，最大誤差為 $0.161 \mu\text{m}$ ，顯示出此系統量測之準確性。重複做 10 次量測之後，其結果與 α -step

表 2. 平面鏡形貌重複量測十次結果之誤差統計。

實驗組別	平均誤差	誤差標準差	最大誤差
1	0.086	0.048	0.170
2	0.085	0.048	1.168
3	0.086	0.048	0.170
4	0.082	0.045	0.161
5	0.088	0.046	0.162
6	0.089	0.047	0.161
7	0.091	0.048	0.157
8	0.091	0.048	0.160
9	0.095	0.049	0.171
10	0.097	0.050	0.175
平均	0.089	0.048	0.166
再現性	0.013		

單位： μm

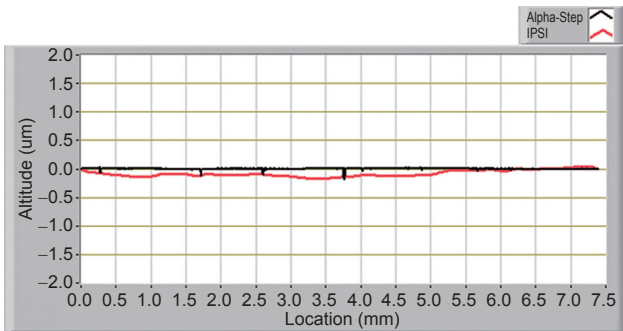


圖 8. 平面鏡實驗量測與 α -Step 量測數據之比較。

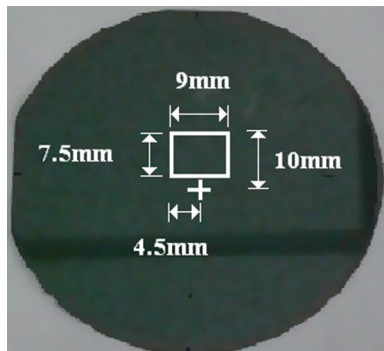


圖 9. 直徑 2 英寸之晶圓及量測選取範圍。

量測儀所量測之結果做比較，如表 2 所示，其平均誤差為 $0.089 \mu\text{m}$ ，誤差標準差為 $0.048 \mu\text{m}$ ，最大誤差為 $0.166 \mu\text{m}$ ，再現性為 $0.013 \mu\text{m}$ ，由此可看出本實驗系統的量測具有良好之穩定性。

2. 晶圓量測

利用本實驗系統量測一直徑二吋之晶圓，如圖 9 所示，量測區域為 $9 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$ 。實驗擷取之不同干涉條紋影像如圖 10(a) 至 (d) 所示。同樣的經由校正、相位計算與相位展開之後，可得其相位圖及相位展開圖，如圖 10(e) 至 (f) 所示。經相位值與高度之轉換，可得其表面形貌，如圖 10(g)

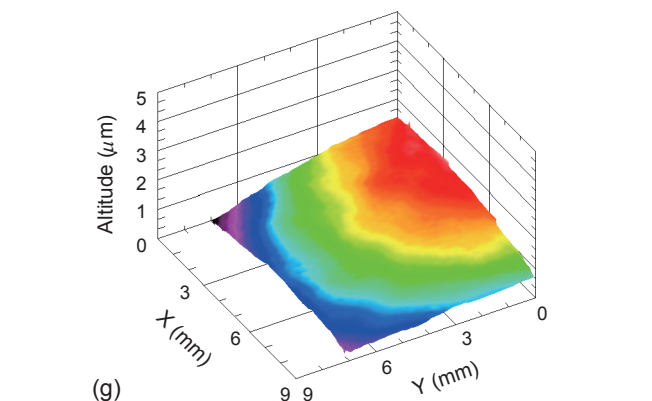
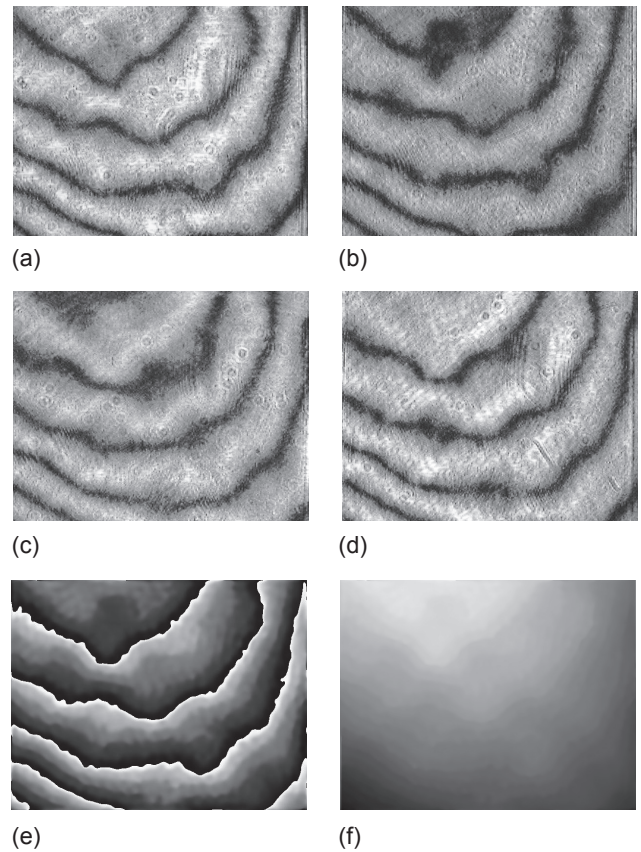


圖 10. 實驗所擷取之晶圓不同相位干涉條紋影像及量測形貌：(a) 0；(b) $\pi/2$ ；(c) π ；(d) $3\pi/2$ ，(e) 相位圖，(f) 相位展開圖，(g) 表面形貌圖。

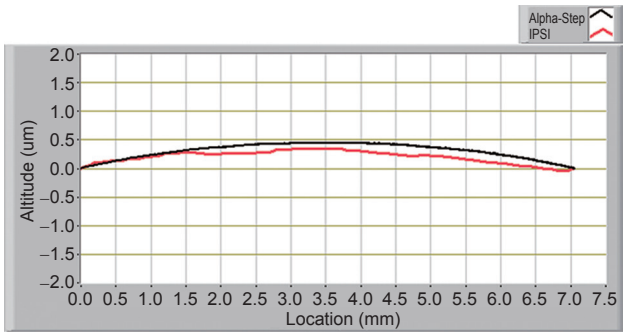


圖 11. 晶圓實驗量測與 α -step 量測數據之比較。

所示。將相同位置垂直拉線量測之高度與 α -step 量測儀之量測結果做比較，如圖 11 所示。可得其平均誤差為 $0.088 \mu\text{m}$ ，誤差標準差為 $0.046 \mu\text{m}$ ，最大誤差為 $0.157 \mu\text{m}$ ，顯示出系統量測之準確性與平面鏡一致。重複做 10 次實驗之後，將 10 次量測之高度值與 α -step 量測儀所量測出之高度值做一比較，其結果如表 3 所示。其平均誤差為 $0.095 \mu\text{m}$ ，平均誤差標準差為 $0.049 \mu\text{m}$ ，最大誤差為 $0.172 \mu\text{m}$ ，再現性為 $0.013 \mu\text{m}$ 。由再現性之相同，亦可證得此實驗系統量測之穩定性。

五、結論

本文研發一套瞬時偏光相移干涉表面形貌量測系統，運用單一 CCD 同時取像量測，經由實測顯示，其準確度可小於 $0.1 \mu\text{m}$ ，其再現性為 $0.013 \mu\text{m}$ ，展現出系統具有良好的穩定性。經由一次取像分析，可有效地減除外在環境振動與量測時間過長所造成的影響；利用數位影像相關法進行影像對正，可大幅減少調整分光鏡與直角稜鏡組合之時間，以降低量測誤差，使得此系統具有運用於線上量測的能力，以及實際應用的價值。

誌謝

感謝國科會 (NSC98-2221-E-006-042) 對本研究的支持。

表 3. 晶圓形貌重複量測十次結果之誤差統計。

實驗組別	平均誤差	誤差標準差	最大誤差
1	0.089	0.043	0.150
2	0.098	0.052	0.182
3	0.092	0.048	0.160
4	0.097	0.052	0.180
5	0.103	0.052	0.184
6	0.097	0.051	0.177
7	0.096	0.049	0.179
8	0.098	0.051	0.182
9	0.088	0.046	0.157
10	0.094	0.047	0.170
平均	0.095	0.049	0.172
再現性	0.013		
單位： μm			

參考文獻

1. C. L. Koliopoulos, *Proc. of SPIE*, **1531**, 119 (1991).
2. S. S. Helen, M. P. Kothiyal, and R. S. Sirohi, *Optics Communications*, **154**, 249 (1998).
3. B. B. Garcia, A. J. Moore, C. Perez-Lopez, L. Wang, and T. Tschudi, *Opt. Eng.*, **38** (12), 2069 (1999).
4. A. Hettwer, J. Kranz, and J. Schwider, *Opt. Eng.*, **39**, 960 (2000).
5. N. R. Sivakumr, W. K. Hui, K. Venkatakrishnan, and B. K. A. Ngo, *Opt. Eng.*, **42**, 367 (2003).
6. W. W. Macy, *Applied Optics*, **22**, 3898 (1983).
7. 葉力琪, 應用數位影相關法於白光干涉形貌量測之縫合, 國立成功大學機械工程所碩士論文 (2007).



杜宜亮先生為國立成功大學機械工程碩士。

Yi-liang Du received his M.S. in mechanical engineering from National Cheng Kung University.



陳元方教授為美國佛羅里達大學工程力學博士，現任國立成功大學機械工程學系教授。

Terry Yuan-Fang Chen received his Ph.D. in engineering mechanics from University of Florida, USA. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at National Cheng Kung University.