

接觸式表面輪廓儀於導光板 V 形微結構特徵尺寸之量測

余志成* 黃明賢 陳宗男
國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

摘要

微V形微結構常應用於光學元件如液晶平面顯示器的導光板，隨著精微製造技術的應用，V形微結構的尺寸降至微米。如何簡易的檢測模具與成形微結構的尺寸，包括特徵高度、寬度與角度等，而不受限於結構材料與透光性，便成為一項重要的課題。本研究探討接觸式表面輪廓儀用於下凹微V形結構量測的限制與對策，首先提出以矽基非等向濕蝕刻，製作探針半徑的校正治具，再推導掃瞄輪廓與實際V結構特徵參數的轉換公式。本研究以KLA-Tencor Alpha-Step表面輪廓儀為例，探針頂角 45° ，半徑 $2\ \mu\text{m}$ ，可應用於底寬 $4\ \mu\text{m}$ 以上的V形微結構量測。文中分析底寬 $10\ \mu\text{m}$ 、頂角約 54° 的V形長溝模仁，與PMMA導光板特徵成形轉寫率量測，並與掃瞄式電子顯微鏡與雷射共軛焦顯微鏡的結果比較，所提出的量測方式不受限於元件透光性，且不需破壞試片，量測高度誤差在4%以下，具有快速與低成本的優勢。

1 研究背景

精微製造技術已廣泛使用於消費型電子產品的光學元件中，其中V形長溝(V-groove)是常見的微結構，如液晶平面顯示器的導光板、光學膜片等。隨著產品輕薄短小的趨勢與性能的要求，V形微結構的尺寸越來越小，甚至達到數微米到數十微米。如何快速且低成本的量測V形特徵的成形品質，一直是背光模組製造業者急欲解決的問題。

常用的量測儀器量測儀器可分為接觸及非接觸式，接觸式量測儀器如表面輪廓儀(Surface profilometer)，非接觸式量測儀器有光學顯微鏡(Optical microscope)、共軛焦3D光學表面形貌量測儀(3D Confocal microscope)、原子力顯微鏡(Atomic force microscope, AFM)、掃瞄電子顯微鏡(Scanning electron microscope, SEM)等。SEM可獲得導光板精確的三維形貌及平面尺寸[3]，但在量測深度幾何形狀時必須破壞微結構，來拍攝斷面輪廓，不適用於導光板模仁的量測。而對於不導電的試片如導光板需先電鍍導電層，量測成本高。AFM可量測高深寬比的陣列式微結構，配合Optical diffraction microscopy (ODM)量測光的折射強度，可以反函數的規則重建出微結構表面形貌[2]。但AFM適合奈米級的量測，垂直量測範圍通常限於 $1\ \mu\text{m}$ 左右，且造價較高，對於導光板微米級的V溝特徵量測並不適合。雷射共軛焦掃瞄顯微鏡的垂直解析度可至 $20\ \text{nm}$ ，但在量測透光率較高的物件，會受表面粗糙度影響或有無法成像的現象，對於角度較大的斜面也會有量測上的問題。Korner等人[4]使用Depth-scanning fringe projection (DSFP)的技術，可掃描深度約 $90\ \mu\text{m}$ 的V型溝槽，但為了降低量測誤差，鏡頭尺寸必須大於物件尺寸，因此所量測的物件尺寸便有限制，價格也較高。Boltryk等人[5]以三種不同的光學位移感測器量測深度約 $15\ \mu\text{m}$ 的V溝斷面輪廓，但會受到表面反射所影響，對於V型溝槽而言，反射會使掃描的資料數據遺失，尤其在V溝的尖端，且物件表面性質可能造成光的擴散而影響量測結果。

探針式表面輪廓儀常用於一般微米級結構的量測，具有簡單、快速與低成本，不受試片透光性與導電性的影響，為一簡便的非破壞式幾何檢測，常用於一般成形產品的量測。Wu等[1]研究側光式導光板上 $38\ \mu\text{m}$ 至 $50\ \mu\text{m}$ 的V溝微結構，以表面輪廓儀量測特徵高度，來判斷熱壓與射出導光板的成型轉寫率。但其量測精度受限於探針半徑(R)及外形，當V溝特徵為連續、下凹、底寬太小或探針角度(θ)大於V溝斜面夾角(ζ)時，便無法正確量測特徵幾何參數。如圖 1所掃瞄出的溝深度與斜面角度與實際有很大的差異。本文探討探針式表面輪廓儀應用於微米V溝特徵量測的策略，分析探針掃瞄軌跡與實際V溝參數的幾何關係，藉以估測V形溝槽的特徵尺寸，並應用於模仁特徵檢驗與導光板成型的轉寫率評估。

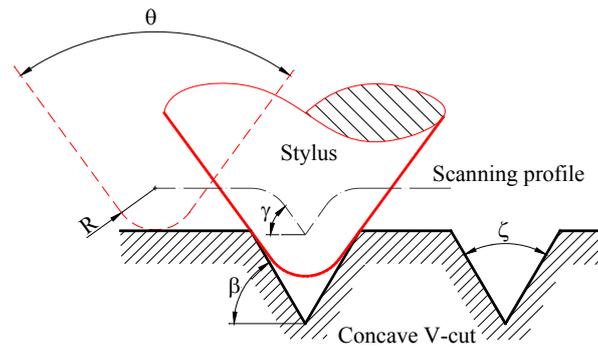


圖 1 探針掃瞄軌跡因微形 V 溝與探針頂角及半徑不匹配所造成的量測誤差

2 表面輪廓儀量測特性

接觸式表面輪廓儀的量測原理是以電腦控制平台的左右移動，藉由固定在探針臂上的探針掃描物體表面，透過 Linear variable differential transformer (LVDT) 將探針上下的移動轉換成為表面輪廓的軌跡。以 KLA-Tencor Alpha-Step IQ 型號為例，掃描長度可至 10 mm，其縱向量測最深可至 2 mm，當深度量測範圍在 20 μm 時，垂直解析度可達 0.012 \AA 。

一般探針為圓錐狀，頂部為圓球，探針半徑與頂角的選擇很重要，標準 Tencor Alpha-Step 採用半徑 5 μm 頂角 60° 的探針。當應用於評估導光板微特徵成形，需量測微結構的寬度、深度與斜面角度。探針半徑或頂角影響到特徵尺寸的辨識度，探針半徑較大時，在掃瞄斷差時，軌跡因探針頂部圓角的關係相對起伏較小，不易判讀其特徵寬度。若要量測微特徵的斜面角度 β ，則探針頂角 θ 的選擇必須滿足(1)，掃瞄時探針球面會與特徵斜面接觸如圖 2，掃瞄軌跡角度 γ 即是微特徵的斜面角度 β 。否則所掃瞄出的軌跡角度將會是探針角錐斜面角度。

$$\theta < 2(90 - \beta) \quad (1)$$

特徵寬度必須大於探針圓球橫截面寬時，即特徵寬度 W ，探針半徑 R 與頂角 θ 需滿足(2)，才可量測特徵寬度，其辨識誤差將受探針半徑影響。受限於探針頂部半徑 R 與特徵寬度 W ，此時所能掃瞄的最大特徵深度如(3)，因此量測 V 溝時，探針將無法下降至 V 溝尖端。本研究所使用的為半徑 2 μm 頂角 45° 的探針，依(2)符合推測可量測的最小特徵寬度是 3.7 μm ，而所能量測的最大特徵角度是 67.5°。考量塑膠成形限制，一般 V 溝寬度都會大於 10 μm 但在量測導光板 V 溝時，除非在 V 溝底部採用截頂的設計，且深度小於式(3)的值，否則仍無法正確量出成形轉寫高度。

$$W > 2R \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$H_{a,\max} = R \left\{ 1 - \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{W}{2R} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

3 V 溝微結構的量測方法

1) 梯形溝槽的底寬量測補償

導光板 V 溝結構可能為連續 V 形、上凸(Convex) V 形、下凹(Concave) V 形、或者是梯形的結構。而當特徵為上凸的 A 字形，則上部的輪廓是可量測的，所得到的上部軌跡近似於探針半圓弧。微結構的頂部若為平邊則可直接量測頂寬，從探針軌跡下降的起點判斷，因此探針的半徑越小，辨識度越高。在微結構底部的平邊寬度量測則會有失真的問題，因為探針降到底部左右移動的極限受到球面半徑影響如圖 2(a)，此時探針底部的軌跡寬度 W_b 會小於梯形微結構的底部實際寬度 W_t ，假設結構形狀為完美之梯形，由圖中的幾何關係可推測出單邊軌跡寬度的補償為 W_e ，得到微結構實際底寬如(4)所示。

$$W_t = W_b + 2W_e = W_b + 2R \cdot \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (4)$$

2) V 形溝槽的深度量測補償

V形特徵若為單一凸特徵，或者是凸特徵間有較大的間距，則可以類似圖 3(a)的方式掃描出特徵高度，但若V溝為下凹特徵如圖 2(b)，此時實際深度大於可量測深度，底部可能是平邊或尖點，由於探針的針尖是圓球狀，半徑有限，因此無法直接量測V溝深度。假設特徵為完美之下凹V形，則特徵深度與掃描軌跡會相差 H_e 的高度，掃描軌跡深度為 h ，探針半徑 R ，則實際V溝的深度可由圖 2(b)的幾何關係估計高度補償量 H_e ，而得到V形微結構深度 H 如(5)。

$$H = h + H_e = h + R \cdot \left(\frac{1}{\cos \beta} - 1 \right) \quad (5)$$

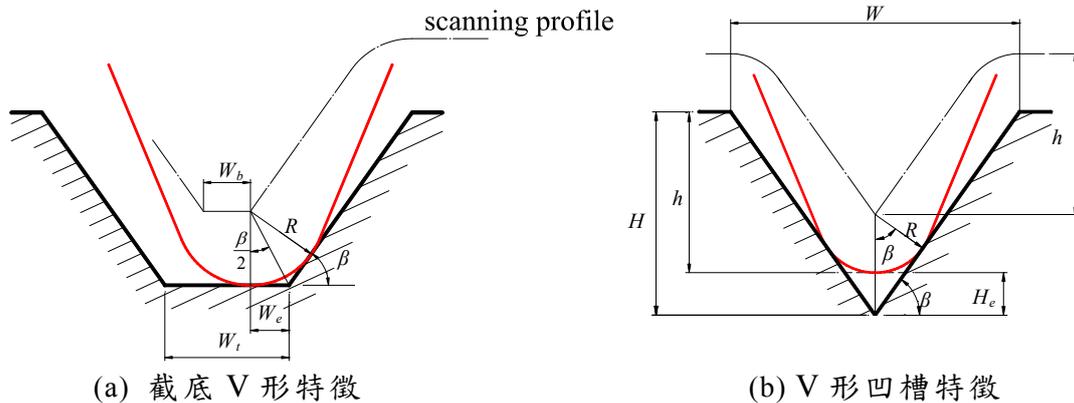


圖 2 V 形特徵的探針掃描示意圖

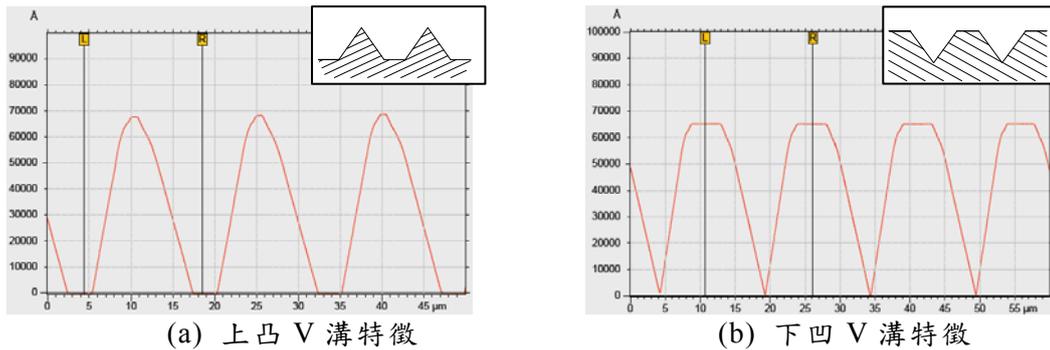


圖 3 V 溝特徵以表面輪廓儀量測之結果

3) 探針半徑量測治具的設計與量測

一般探針半徑量測是利用探針掃描一特定微小立刃式的凸起校正治具，凸起的頂部半徑需遠小於探針半徑，探針與立刃接觸獲得探針頂的曲率半徑，但此特用治具昂貴且取得不易。本研究將利用(100)矽晶圓非等向蝕刻製作治具，利用晶格蝕刻所得到的精準V溝，推算探針實際半徑，以作為後續量測高度補償的的依據。

化學蝕刻矽晶圓時，因各個方向的蝕刻速度不同，而造成特殊的蝕刻幾何形狀，在 $\langle 111 \rangle$ 方向的蝕刻速率遠小於其他方向，因此蝕刻形狀將由速度最慢的(111)面所定義。以(100)晶圓蝕刻為例，一個長邊對準於晶圓主切邊的矩形蝕刻遮罩(Etching mask)，自然蝕刻停止則可得到V形長溝。若 $\langle 111 \rangle$ 方向的蝕刻速率遠小於其他方向，蝕刻形狀可視為在(111)面自然停止，而得到完美的V形斷面，蝕刻斜面與水平面的夾角為晶格面角度 54.7° [8]。本研究將公稱 $2 \mu\text{m}$ 角度 45° 的探針，在已知寬度 W 的矽蝕刻V形長溝掃描，因矽蝕刻角度 θ_s 為已知，可求出V溝的理論深度，比對掃描軌跡深度 h 與式(5)，可校正出探針實際半徑為 $1.92 \mu\text{m}$ 。

4 模仁與成形導光板量測例

本節將所提出的量測方法應用於下凹的V字形與上凸的A字形微結構的高度量測。V溝結構陣列特徵寬度為 $10 \mu\text{m}$ 間距 $5 \mu\text{m}$ ，由(100)矽晶圓以非等向濕蝕刻，試片尺寸為 30×40

(mm)，之後進行電鑄所翻製鎳模仁，得V溝特徵為上凸的A字形。再用以成形PMMA導光板，導光板將為下凹式的V溝結構，一塊為射出成型，另一塊為熱壓成型之導光板，每一種量測方式在四種試片上都選定兩點，以表面輪廓儀量測，並與電子掃瞄顯微鏡與雷射共軛焦掃瞄顯微鏡比較。

1) 電子掃瞄顯微鏡量測

以SEM拍攝特徵斷面特徵，必須將試片折斷，對於模仁就不適合採用此破壞式的檢驗。因此本研究只針對矽蝕刻電鑄起始板、射出成形的LGP與熱壓成形LGP的斷面拍攝如圖 4，當試片斷面與特徵垂直時可獲得正確寬度、特徵深度與斜面角度。圖 4(a)為矽蝕刻V溝陣列，由於晶格結構與非等向蝕刻的關係，呈現精準的V溝結構。翻鑄的鎳模仁只作正面的SEM拍攝，雖未能得到斷面尺寸，但由SEM觀察其電鑄轉寫情形非常良好。之後將此模仁應用於射出成形LGP，經模仁轉印之後的導光板凹槽應會和矽蝕形狀相同，但由於射出成形製程尚未進行參數調教，因此有明顯特徵頂部成形不足與收縮的問題，頂部與斜邊相接的稜線呈現圓角的狀況如圖 4(b)。但V溝底部由於成形時，塑流由底部往上充填，因此在下凹的特徵部分轉寫情況良好。另外以模仁熱壓的方式成形導光板，SEM如圖 4(c)所示，顯示良好的轉寫情，與一開始矽蝕刻電鑄起始板的結果非常相似。透過SEM影像畫素比對量測軟體，可得到V溝特徵的高與底部斜角如表 1。

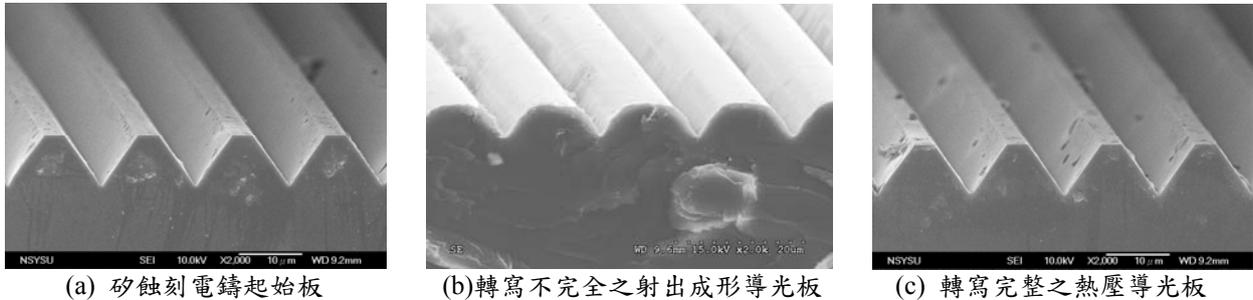


圖 4 SEM 量測矽蝕刻與導光板 V 溝之結果

2) 共軛焦雷射掃瞄顯微鏡量測

共軛焦雷射掃瞄顯微鏡是利用雷射光源，在光學基礎上採用光源焦平面與觀察者焦平面共軛成相的原理，再利用電腦對所掃描分析的對象進行數位圖像處理的觀察和分析，具有較高的水平解析度，並可利用電腦分析重建三維影像，但價格相當昂貴。鎳模仁一方面表面反射特性佳，且為凸特徵，以共軛焦雷射掃瞄顯微鏡掃瞄鎳量測效果還不錯如圖 5(b)。但在量測下凹V溝如矽基蝕刻時，在V溝底部的掃瞄則出現明顯雜訊與失真的現象如圖 5(a)。而於透光物件如PMMA導光板量測時，掃瞄軌跡的雜訊非常大，且LGP為下凹特徵，在V形下凹的部分幾乎無法辨識，以致V溝深度與角度無法準確量測，部分量測結果列於表 1。

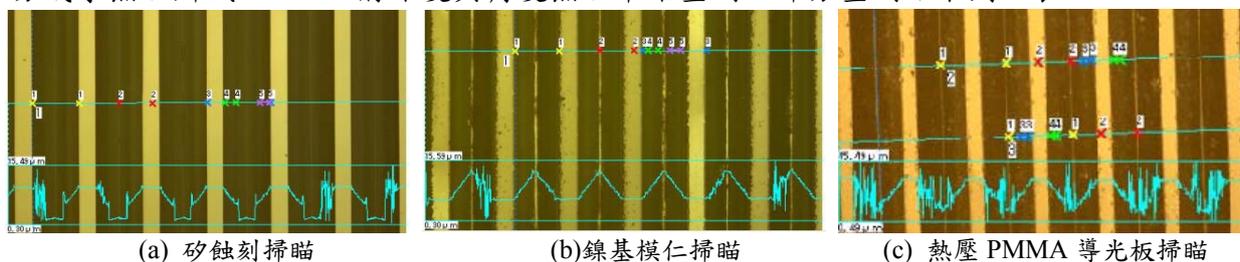


圖 5 雷射共軛焦掃瞄顯微鏡量測 V 溝之結果

3) 探針式表面輪廓儀配合高度推算

從之前的探針半徑校正模具可得到探針半徑為 $1.92 \mu\text{m}$ ，頂角 45° ，而試片V溝斜角約為 54° ，因為探針頂角小於特徵角度，由式(1)知此探針可應用於此特徵斜角的量測。在掃瞄模仁凸V溝特徵時，其掃瞄圖形如圖 3(a)所示，而掃瞄矽蝕刻或LGP下凹V溝的掃瞄曲線如圖 3(b)

所示。在模仁凸特徵的量測尚可完整掃瞄到特徵的高度，但在掃瞄下凹V溝特徵時，探微將無法探測到V溝底部的尖點，因此掃瞄V溝深度與實際深度將會有誤差，假如下凹特徵為完美之V溝，探針與特徵間的關係將如圖 2(b)。假設模具為完美之A形，在成形時不論是射出或是熱壓，在下凹部分的成形一般都可得到非常好的轉寫，但在特徵定可能會有充填不足或收縮的現象發生，掃瞄時可將上部突出特徵的高度 h 量測出來，而探針掃瞄得下極限點下方的特徵深度，在利用所量測到的斜面角度 β ，藉由式(5)可估計所需補償的特徵深度值 H_c ，來評估V溝的轉寫性。其量測結果列於表 1。

表 1 V 溝量測結果比較

Device/ Instrument		Surface profilometer		SEM		雷射共軛焦掃瞄顯微鏡	
		P1	P2	P1	P2	P1	P2
Silicon etching	$\theta_s(^{\circ})$	55.01	55.49	55.1	54.7	53.29	54.19
	$H(\mu\text{m})$	7.39	7.39	8.34	8.06	N/A	N/A
Nickel stamper	$\theta_s(^{\circ})$	55.10	54.60	N/A	N/A	53.60	53.00
	$H_s(\mu\text{m})$	7.05	7.12	N/A	N/A	6.87	7.02
LGP (micro injection)	$\theta_L(^{\circ})$	48.18	50.58	N/A	N/A	N/A	N/A
	$H_L(\mu\text{m})$	5.46	5.76	5.83	6.27	N/A	N/A
LGP (Hot Embossing)	$\theta_L(^{\circ})$	54.95	55.45	54.21	54.53	55.70	54.41
	$H_L(\mu\text{m})$	6.91	7.37	7.92	7.81	N/A	N/A

* N/A: not available

5 結論

表面輪廓儀雖然無法直接量測微小的下凹特徵，藉由本研究所提出的探針半徑校正方式與V溝高度與寬度量測補償機制，可解決微米級下凹V溝的高度量測的問題，且不受試片透光性的影響，量測結果與SEM或是共軛焦顯微鏡所能量測到的特徵尺寸非常接近。量測的結構寬度在5 μm 與15 μm 之間，探針半徑2 μm 、探針頂角45°的條件時，誤差在4%左右，驗證此方法的實用性。但本研究所提出的方法限於V溝的深度量測補償，若無法確認探針未接觸到的部分特徵可近似為V形時，則不適用。但在應用於導光板V溝模具與成形精度量測時，此法將可提供一準確與實用的檢測方式。

6 致謝

本研究承蒙國科會經費支持，計劃編號NSC 97-2221-E-327 -011 -MY2，特誌謝意。

7 參考文獻

- [1] C.H. Wu, C.H. Lu, 2008, "Fabrication of an LCD light guide plate using closed-die hot embossing," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 035006-1-9.
- [2] J. Garnas, P.E. Hansen, N. Agersnap, I. Davi, J.C. Petersen, A. Kuhle, J. Holm, L.H. Christensen, 2005, "Determination of sub-micrometer high aspect ratio grating profiles," *Proc. of SPIE*, Vol. 5878, No. 1, pp. 587803-1-9.
- [3] O. Murakami, M. Kotaki, H. Hamada, 2008, "Effect of molecular weight and molding conditions on the replication of injection moldings with micro-scale V-groove features," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 48, No. 4, pp. 697-704.
- [4] K. Korner, R. Windecker, 2001, "Absolute macroscopic 3-D measurements with the innovative depth-scanning fringe projection technique," *Journal of Light and Electron Optics*, Vol. 112, No. 9, pp. 433-441.
- [5] P. J. Boltryk, M. Hill, J. W. McBride, A. Nasce, 2008, "A comparison of precision optical displacement sensors for the 3D measurement of complex surface profiles," *Sensors and Actuators*, Vol. 142, No. 1, pp. 2-11.
- [6] X. Han, H. Yokoi, 2006, "Visualization analysis of the filling behavior of melt into microscale V-grooves during the filling stage of injection molding," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 46, No. 11, pp. 1590-1597.
- [7] M. Shikida, K. Sato, K. Tokoro, D. Uchikawa, 2000, "Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions," *Sensors and Actuators*, Vol. A80, No. 2, pp. 179-188.
- [8] M. Madou, 2002, *Fundamentals of Microfabrication*, 2nd Ed., Chap.4, CRC Press.