

利用一種複製技術在聚合物波導上製作光柵結構
**Fabrication of High-resolution Periodical Structures on
Polymer Waveguides Using a Replication Process**

李昆益¹

Kun-Yi Lee

林坤成²

Kuen-Cherng Lin

李偉裕³

Wei-Yu Lee

¹ 中華技術學院電機系助理教授 ² 中華技術學院電機系副教授 ³ 中華技術學院電機系教授

Department of Electrical Engineering
China Institute of Technology

摘要

本論文提出一種複製高分子波長濾波器的製程技術。在此製程中，高分子光柵結構是以全像干涉及微成形技術製作。高分子波長濾波器是利用二階段微模成形製程；首先，以負光阻製作母模，隨後轉移到聚二甲基矽氧烷模子；其次，以此聚二甲基矽氧烷之矽樹酯橡膠模子作為戳印，將高分子波長濾波器的圖形轉印到 UV 環氧樹脂上。實驗結果顯示出良好的光柵結構轉印效果，並在布拉格波長測量到-18.5 dB 的傳輸損失和 6nm 的傳輸頻寬。

關鍵詞：高分子波長濾波器、光柵、全像干涉、微成形

Abstract

This paper describes a procedure to replicate a polymeric wavelength filter. In this work, the grating structure on a polymer is fabricated first using holographic interferometry and micro-molding processes. The polymeric wavelength filters are produced by a two-step molding process where the master mold is first formed on a negative tone photoresist and subsequently transferred to a PDMS mold; following this step, the PDMS silicon rubber mold was used as a stamp to transfer the pattern of the polymeric wavelength filters onto a UV cure epoxy. Initial results show good pattern transfer in physical shape. At the Bragg wavelength, a transmission dip of -15.5 dB relative to the -3dB background insertion loss and a 3-dB-transmission bandwidth of ~6nm were obtained from the device.

利用一種複製技術在分子波導上製作光柵結構

Keywords : polymeric wavelength filter , grating , holographic interferometry, micro-molding processes

I、簡介

光柵波長濾波器是光波長多工系統中之重要元件，因此被廣泛的研究[1-4]。當表面起伏光柵(surface-relief grating)被製作在波導上時，這光柵波導可以被當作濾波器從已接收的訊號中選取出特定的訊號。濾波器所被要求的特性可藉由波導及光柵的物理參數選取來達成。對於光濾波器，高解析度及高深寬比(aspect ratio)之光柵結構是影響濾波器特性以及元件尺寸的重要參數。

由於低成本和製程簡單，高分子光學元件被廣泛使用於導波光學。高分子波導布拉格光柵(Bragg grating)之研究，在光通信及光感測系統方面吸引很多注意。以往在分子薄膜製作光柵的技術包括全像微影技術[5]，電子束蝕刻[6]，雷射束直接寫[7]，及相位光罩微影 [8]；然而，對於通道波導(channel waveguide)之表面起伏光柵，少有研究。最近有研究以偶氮苯(azobenzene polymer)作為蝕刻面罩，並藉由氧的反應離子蝕刻(reactive ion etching)，可將表面起伏光柵輕易地轉移至分子波導上。但是物理蝕刻所造成的表面粗糙經常造成散射損失，而且也不易獲得高深寬比的光柵結構[9]。電子束直接寫入法被用來製作具波浪狀布拉格光柵的高分子脊狀(ridge)波導[10]。這種設計在控制有效折射率的調變上，是優於傳統的埋入式(buried)光柵。它也顯示在非常短的光柵長度下具有好的傳輸下降。然而，因為核心波導的折射率比周圍覆蓋層的折射率大得多，其核心波導尺寸必須很小才有單模狀態。這種條件將引起波導和光纖間耦合的困難。Ahn等人使用奈米轉印技術(nanoimprint)來製造布拉格光柵濾波器[11]。他們製作一個對紫外線透明的石英戳印和使用一台奈米轉印機器而成功地把光柵結構轉移到分子層。其製程成本效益佳而且簡單。但是，有一些缺點致使這種方法在製作布拉格光柵濾波器時受到限制[12]。

我們最近已證實一種透過微成形(micro-molding)技術及全像干涉(holographic interference)技術，快速製作次微米尺寸光柵之製程[13]。藉由這個製程，光柵結構上的深度和週期之間的深寬比可達到 0.7：1，並且可以穩定的複製分子光柵。在本論文，我們證實一種不需任何物理蝕刻就能在分子通道波導上製作表面起伏光柵。

有許多簡單方法可製造分子波導，包括光致交聯技術(photocrosslinking) [14]，光漂白技術(photobleaching)[15]，離子反應蝕刻法[16]，以及雷射/電子束寫

入[17]。這些技術有固有的限制，例如：離子反應蝕刻法可能招致過度的表面散射損失，而雷射/電子束寫入不適用於大量生產。其他技術，如熱壓技術(hot embossing)[18]，紫外線浮雕(UV-embossing)[19]及微轉移成形技術[20]，都因為製程簡單而受歡迎。然而，這些技術都存在一些問題需要去克服。例如：殘餘材料，基板及核心波導材料可用性之限制。我們最近已經發展出一種軟微影(soft lithography)製程[21]複製高分子波導。在此技術中，波導是利用二階段微模成形製作。首先，母模以負光阻製成，隨後轉移到聚二甲基矽氧烷(PDMS)模仁；其次，以此聚二甲基矽氧烷之矽樹酯橡膠(silicone rubber)模仁作為戳印，將光柵波導結構轉印到紫外線硬化環氧樹脂(UV curing epoxy)上。

在本論文中，我們將描述一種結合全像干涉、軟微影技術，以及簡單的複製製程，製作具備高解析度及高深寬比光柵結構之高分子通道波導。為了降低在核心和覆蓋層的波導材料裡，因不同的熱膨脹係數所引起的殘餘應力，本論文採用兩種折射率稍微不同但相似的高分子材料。這些高分子材料在光波長為 1550nm 時，其折射率介於 1.52 ~1.56(OG146 折射率為 1.5201 和 OG154 折射率為 1.5668)之間，此折射率接近光纖的折射率(大約 1.46-1.50)。

II、光柵製作

本論文之高分子基板上的光柵結構，是先以一個三步驟的製程來快速完成[13]。光柵結構是在一正光阻薄模上以雙光束全像干涉曝光所形成(正光阻為Ultra 123, MicroChem公司製造，折射率為1.618)。前述製程可產生一母模，稍後並被用來製作一個聚二甲基矽氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)模仁。這個矽橡膠(PDMS)模仁又再被利用作為如同戳印一樣把光柵結構轉印到一個經紫外線硬化成型的環氧樹脂上。實驗結果顯示，光柵週期及對應深度可以被準確地控制到小於1%的誤差。而且，使用本製程，光柵結構的深度與週期之深寬比可以達到0.7:1。圖1(a)係以原子力顯微鏡(AFM)觀察之結果，圖1(b)係以掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀察之結果，其顯示以上述製程所製得之第一光阻上的光柵結構，光柵週期為503nm及光柵深度為397nm。這紫外線硬化成型之高分子光柵基板被裁切成1cm x 5cm的大小，其中高分子光柵的面積為長0.5cm，寬1mm。

III、高分子波長濾波器的製作

為了製作高分子波長濾波器，採用厚度為700 μ m的玻璃基板，將其裁切成5cm

利用一種複製技術在波導上製作光柵結構

x 1cm的矩形。先將玻璃基板清洗，而後在已具有光柵結構的第一光阻上(如圖2(a)所示)，以1000 rpm的轉速及17秒的時間塗佈一層厚度為6.0 μm 的負光阻(SU-8)。再對聚乙烯對苯二甲酸酯(polyethylene Terephthalate ,PET)光罩，使用紫外線光罩對準曝光系統對該負光阻進行時間約90秒的曝光(如圖2(b)所示)，再浸入SU-8顯影劑內進行時間為45秒的顯影步驟，使負光阻上形成一道溝槽 (如圖2(c)所示)，且於溝槽底部形成光柵結構案。溝槽的尺寸大約是8.7 μm x 6.0 μm ，長度大約5cm(如圖3所示)。此一已有光柵結構的負光阻被用作為一個母模，再配合傳統的微成形技術[22]，就可以把負光阻上的光柵結構轉移到一個PDMS薄膜上。一層被稀薄的PDMS薄膜被均勻地塗佈在已有光柵結構的負光阻母模上，經過攝氏90度及時間1小時的烘烤之後，PDMS薄膜被催化，並且可容易地從負光阻上被剝離，進而獲得一個PDMS薄膜的模仁(如圖2(d),2(e)所示)。該PDMS模仁的一面上具有與負光阻之溝槽形狀相配合的脊型波導，波導上具有光柵結構。圖4顯示PDMS模仁之光柵結構的SEM圖像。

而後，再利用UV複製製程[21]，使PDMS模仁上波導之光柵結構再被轉移到一個紫外線硬化高分子(OG146)上 (如圖2(f)~(h)所示)。將一個厚度為400 μm 的間隔子(spacer)置放在前述的PDMS薄膜模仁及一個薄的Pyrex玻璃基板之間，再於該溝內注入OG146高分子，然後，此高分子PDMS模仁及一個薄的Pyrex玻璃基板之間。此硬化高分子便很容易地從PDMS模仁被剝離，並形成一個具有槽溝的高分子模仁，且於槽溝底部形成光柵結構。圖5之SEM圖像顯示，本論文複製在OG146高分子模仁上的光柵結構，與前述負光阻模仁上之光柵結構在尺寸上相當吻合。此一具有光柵結構的OG146高分子模仁經過硬化後，可作為高分子波長濾波器的一個覆蓋層。

為製作核心波導，一混合 OG154 和 OG169 之高分子被注入前述之高分子模仁的溝槽內。本論文在此不使用旋轉塗佈技術，因為可能在核心波導外邊產生一個厚的非導光層，此一非導光層會導致光信號在從光纖輸入此高分子波長濾波器時的耦合損失。為了取代旋轉塗佈技術，本論文提出另一方法(如圖 2(i),2(j)所示)。將 PDMS 高分子薄層塗覆在一玻璃載片上，該玻璃載片再被放置在高於具有光柵結構的 OG146 高分子模仁的溝槽上方，且使該玻璃載片與 OG146 高分子模仁間形成一條矩形並由該槽溝所形成的通道。為了把具有高黏性的 OG154 環氧樹脂注入該矩形通道內，本論文採用另一 OG169 高分子來與 OG154 高分子混合而形成一混合高分子，其混合比率是 1：1，藉以稀釋 OG154 環氧樹脂，並降低 OG154 高分子的黏性，而讓該混合高分子得以順利地被注入到該矩形通道內。經過紫外線硬化過程後，作為核心波導的混合高分子折射率在 1550nm 光波長下約為

1.550。詳細之混合 OG154 和 OG169 高分子被注入前述高分子模仁溝槽內之製程如下：先將少許的混合高分子自該溝槽一端注入，經紫外線曝光後，該溝槽一端便被少許的混合高分子密封。再將這個樣品置入一真空的腔室內，該腔室內具有呈液態的混合高分子，將此樣品插入呈液態的混合高分子中，且使樣品之溝槽具有開口的一端朝下(如圖 2(i)所示)。逐漸增加腔室內的空氣壓力，當在腔室內的空氣壓力達到 10^{-4} 托(Torr)時，外界空氣被引入腔室內，並且對液態的混合高分子施力作用，使液體的混合高分子注入該溝槽內，並經過紫外光曝光約 1-2 分鐘而被硬化定型。在玻璃載片被除去之後，PDMS 層也被自然地從這個樣品上剝離(如圖 2(j)所示)。

為了防止當應用在非對稱波導結構時，因為表面散射，或是因為波導模態的不存在所造成的光學損失，一個上覆蓋層乃被使用。其作法係採用與覆蓋層相同的 OG146 高分子作為上覆蓋層的材料(其製程請參看圖 2(k)~(n))。首先，一厚度為 $410\mu\text{m}$ 的間隔子被放置於前述樣品與一薄的 Pyrex 玻璃載片間，再注入 OG146 高分子而形成一上覆蓋層，經紫外線曝光後使前述樣品與上覆蓋層之高分子相互交聯而結合固定為一體。此樣品被切成小方塊，各邊表面也被研磨，最後製得一個尺寸為 4cm 長，1cm 寬及大約 $410\mu\text{m}$ 厚的高分子波長濾波器(如圖 2(n))。

波導性質，包括模態及有效折射率係使用射束傳播法(*beam propagation method*)來模擬。模擬結果得到波導的有效折射率是 1.5447。依照布拉格反射條件算出布拉格波長為 1553.9nm。光濾波器的傳輸特性經耦合模態理論(*coupled mode theory*)[23]計算，其傳輸下降為 -19.5dB。本論文所製作高分子光波長濾波器的光譜特性，經光頻譜分析儀(Advantest, Q8384)測量結果如圖 6 所示。在布拉格波長，具有 -18.5dB 的傳輸下降及 3-dB 傳輸帶寬約 6nm。其結果與耦合模態理論的計算相當接近。布拉格波長 λ_B 被定義為 $\lambda_B = 2N_{\text{eff}}\Lambda$ ， N_{eff} 是波導光柵的有效折射率，其可以使用射束傳播法計算出來，而 Λ 則是光柵的週期。測量出來的布拉格波長 1554.02nm，其距離理論的預測值只有 0.12nm。當核心波導中混合高分子的 OG154 百分比從 45%到 55%的範圍，波導的折射率變化範圍從 1.549 到 1.551 時，使用射束傳播法所計算出的布拉格波長變化是從 1552.9nm 到 1554.8nm。

IV、結論

本論文藉由結合全像干涉、軟微影及微成形技術，成功研發出一個快速製作具有次微米光柵之高分子波導的製程。經由本論文之製程，一具有與原設計光柵相同高深寬比的高分子波導光柵結構，可經由穩定之複製製程而被製作出來。本

利用一種複製技術在分子波導上製作光柵結構

論文研究之製程具有相當潛力可供大量製造具有各種不同週期的光柵結構之波導，而且也可被用來成功地製作分子波導光波長濾波器。

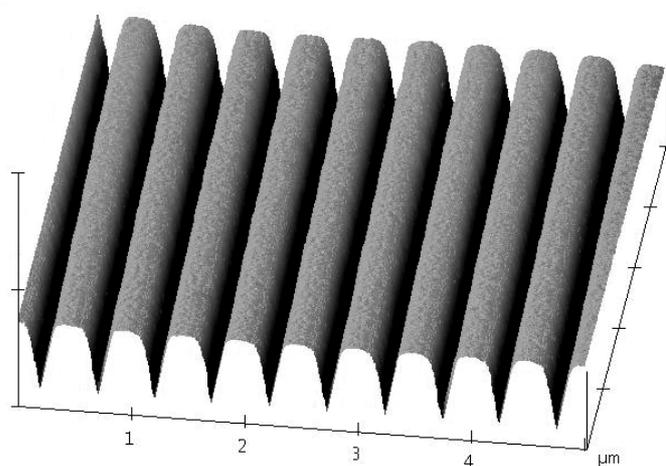
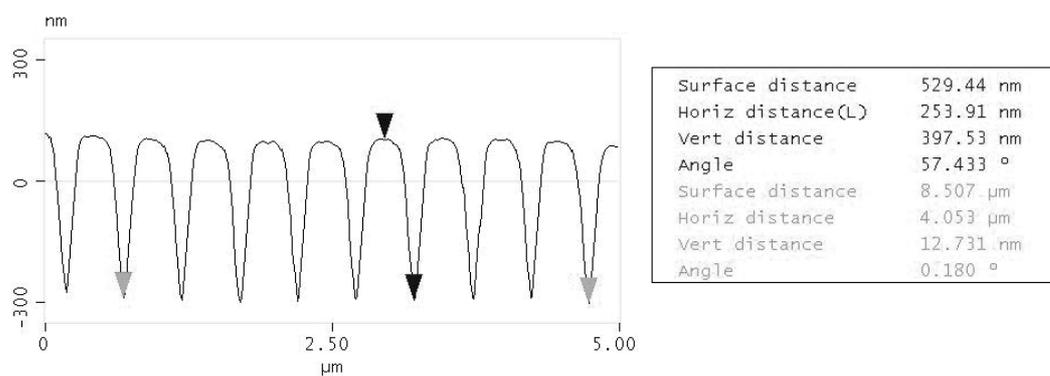
V、參考文獻

1. C. H. Lin, Z. H. Zhu, Y. Qian, and Y. H. Lo, "Cascade self-induced holography: a new grating fabrication technology for DFB/DBR lasers and WDM laser arrays," *IEEE J. Quantum Electron*, vol.32, pp.1752-1759,1996
2. Y. Shibata, S. Oku, Y. Kondo, and T. Tamamura, "Effect of sidelobe on demultiplexing characteristics of a grating-folded directional coupler demultiplexer," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 8, pp.87-89, 1996.
3. A. Sharon, D. Rosenblatt, and A. A. Friesem, "Narrow spectral bandwidths with grating waveguide structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol.69, pp.4154-4156, 1996.
4. A.W. Ang, G.T. Reed, A. Vonsovici, A.G.R. Evans, P.R. Routley, and M.R. Josey, "Effect of grating heights on highly efficient unibond SOI waveguide grating couplers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 12, pp.59-61, 2000.
5. J. W. Kang, M. J. Kim, J. P. Kim, S. J. Yoo, and J. J. Kim, "Polymeric wavelength filters fabricated using holographic surface relief gratings on azobenzene-containing polymer films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, pp. 3823-3825, 2003.
6. H. Nishihara, Y. Handa, T. Suhara, and J. Koyama, "Electron-beam directly written micro gratings for integrated optical circuits," in *Photo- and Electro-Optics in Range Instrumentation*, J. Water, *et al.*, eds., *Proc. SPIE*, vol. 134, pp. 152-159, 1980.
7. L. Eldada, C. Xu, K.M.T. Stengel, L.W.Shacklette, and J.T. Yardley, "Laser-fabricated low loss single-mode raised-rib waveguiding devices in polymers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp.1704-1713, 1996.
8. L. Eldada, S. Yin, C. Poga, C. Glass, R. Blomquist, and R.A. Norwood, "Integrated multichannel OADMS using polymer Bragg grating MZIS," *IEEE, Photonics Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 1416-1418, 1998.
9. D. J. Kang, J. K. Kim, and B. S. Bae, "Simple fabrication of diffraction gratings by two beam interference method in highly photosensitivity hybrid sol-gel films," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 3947-3953, 2004,
10. L. Zhu, Y. Huang, W. M. J. Green, and A. Yariv, "Polymetric multi-channel bandpass filters in phase-shifted Bragg waveguide gratings by direct electron beam writing," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 6372-6376, 2004,

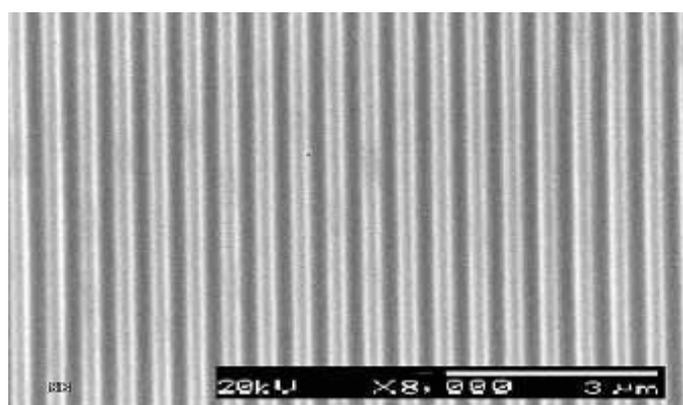
11. D.-H. Kim, W.-J. Chin, S.-S. Lee, S.-W. Ahn, and K.-D. Lee, "Tunable polymeric Bragg grating filter using nanoimprint technique," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 7-12, 2006.
12. A. Kocabas and A. Aydinli, "Polymeric waveguide Bragg grating filter using soft lithography," *Opt. Express*, vol. 14, pp.10228-10232, 2006 .
13. Kun-Yi Lee, Shih-Wen Lee, and Wei-Yu Lee, "Fabrication of high-resolution periodical structure on polymer using holographic interferometry and electroforming process," *J. China. Insti. Tech.*, vol. 35, pp.258-265, Dec. 2006.
14. Jae Wook Kang, Jang-Joo Kim, Jinkyu Kim, Xiangdan Li, Myong-Hoon Lee, "Low-loss and thermally stable TE-mode selective polymer waveguide using photosensitive fluorinated polyimide", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 14, pp.1297-1299, 2002.
15. T.E. Van Eck, A.J. Ticknor, R.S. Lytel, and G.F. Lipscomb, "Complementary optical tap fabricated in an electro-optic polymer waveguide", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 58, pp. 1588-1590, 1991.
16. M. Hikita, Y. Shuto, M. Amano, R. Yoshimura, S. Tomaru, and H. Kozawaguchi, "Optical intensity modulation in a vertically stacked coupler incorporating electro-optic polymer", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, pp.1161-1163, 1993.
17. Y.Y. Maruo, S. Sasaki, and T. Tamamura, "Embedded channel polyimide waveguide fabrication by direct electron beam writing method", *J. Lightwave Technol*, vol. 13, pp.1718-1723, 1995.
18. Holger Becker and Wolfram Dietz, "Microfluidic devices for TAS applications fabricated by polymer hot embossing," in *Microfluid Devices and Systems*, A. B. Frazier and C. H. Ahn, eds., Proc. SPIE, vol. 3515, pp.177-181, 1998.
19. P. M. Ferm and L. W. Shacklette, "High volume manufacturing of polymer waveguides via UV- Embossing," in *Linear,Nonlinear, and Power-Limiting Organics*, E. Manfred, *et al.*, eds., Proc. SPIE, vol. 4106, pp. 1-10, 2000.
20. X.-M. Zhao, S. P-Smith, S. J. Waldman, G. M. Whitesides, and M. Prentiss, "Demonstration of waveguide couplers fabricated using microtransfer molding," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, pp.1017-1019, 1997.
21. W.C. Chuang, C.T. Ho, and W. C. Chang, "Fabrication of polymer waveguides by a replication method," *Applied Optics*, vol. 45, pp. 8304-8307, 2006.
22. P. Nussbaum, I. Philipoussis, A. Huser, and H. P. Herzig, "Simple technique for replication of micro-optical elements," *Opt. Eng.*, vol. 37, pp.1804-1808, 1998.

利用一種複製技術在聚合物波導上製作光柵結構

23. A. Yarin, *Introduction to Optical Electronics*, 3rd edition, (H. Rinehart & Winston, New York, 1984).



(a)

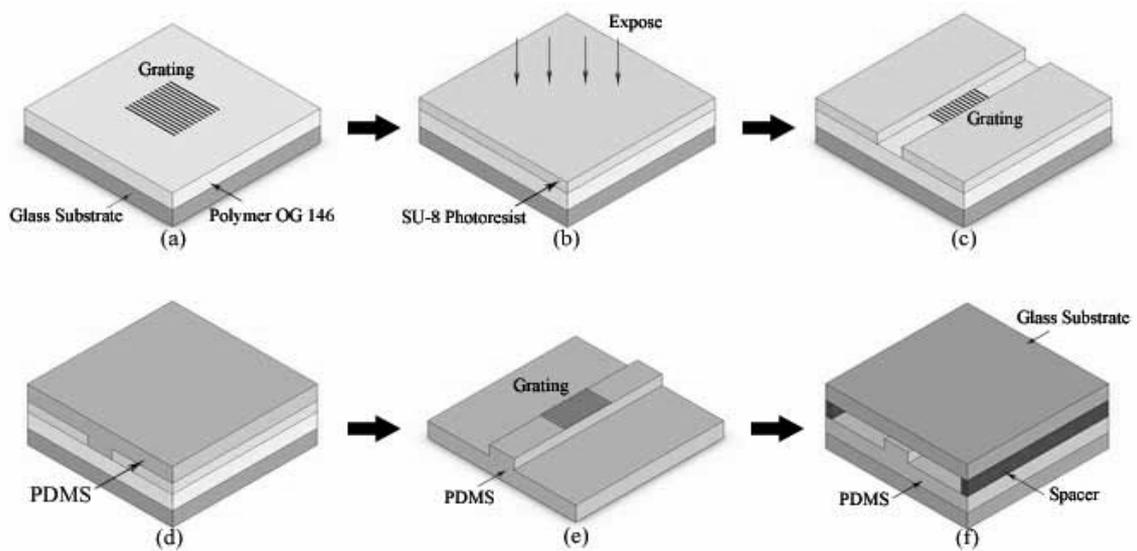


(b)

圖一、OG146 高分子光柵的原子力顯微鏡照像和電子掃描顯微鏡照像

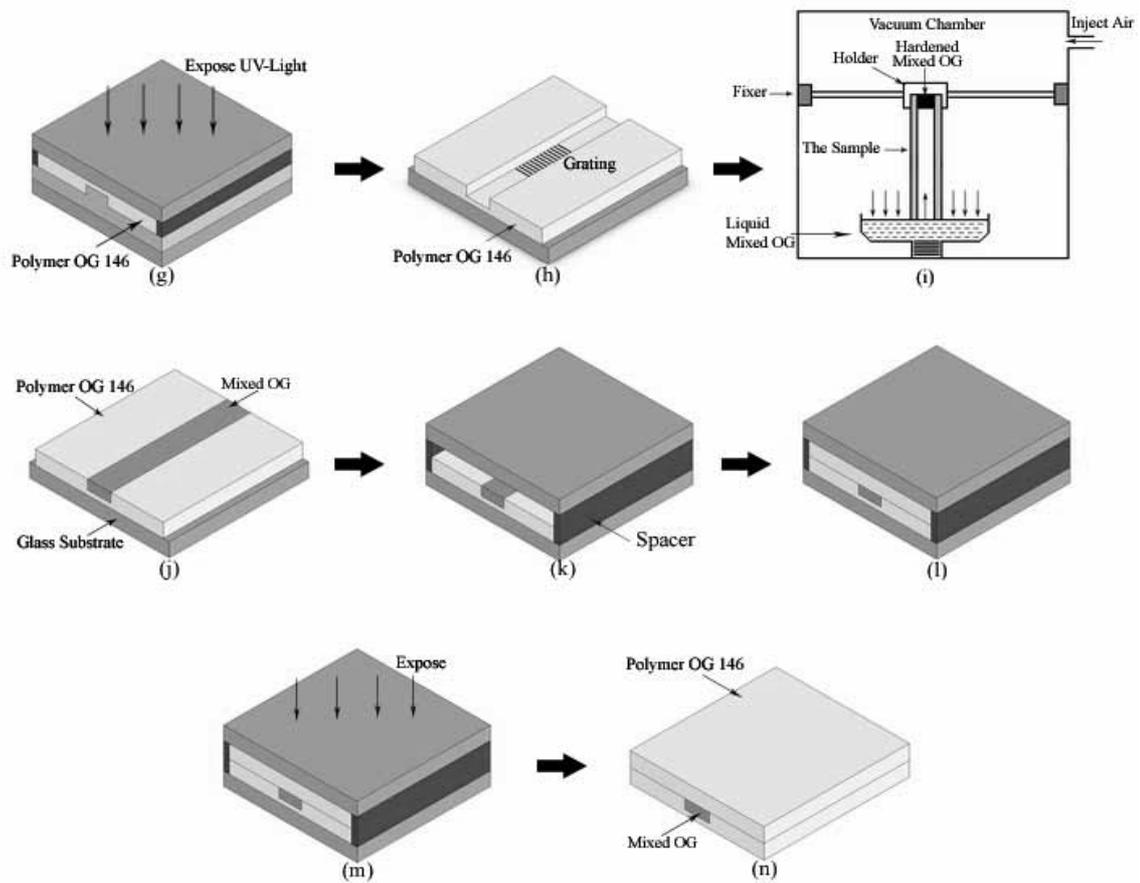
(a)AMF 原子力顯微鏡照像

(b)SEM 電子掃描顯微鏡照像(503nm 光柵週期及 397nm 光柵深度)

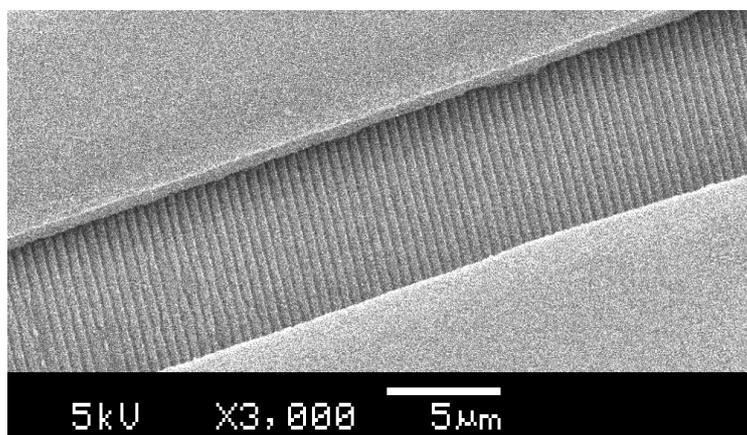


圖二、在 高分子波長濾波器製作埋入式光柵的製程；(a)將 OG146 高分子光柵沈積在玻璃上，(b)SU-8 負光阻的紫外光照射，(c)負光阻模仁，溝槽內有光柵結構，(d) PDMS 薄膜被均勻地塗佈在已有光柵結構的負光阻母模上，(e)PDMS 模仁，PDMS 脊型波導上具有光柵結構，(f)將一個厚度為 400 μ m 的間隔子置放在 PDMS 模仁及一個薄的 Pyrex 玻璃基板之間。

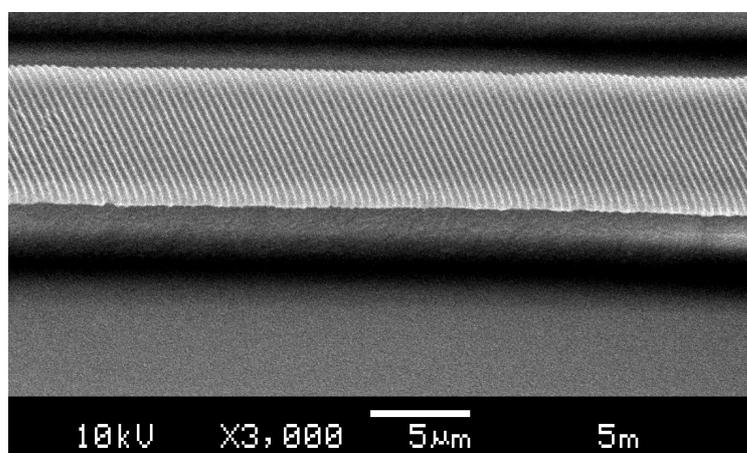
利用一種複製技術在波導上製作光柵結構



圖二、在波導上製作埋入式光柵的製程：(g)將 OG146 高分子注入 PDMS 模仁及一個薄的 Pyrex 玻璃基板之間的間隔內，以 UV 光硬化，(h) 硬化之 OG146 高分子從 PDMS 模仁被剝離，並形成一個具有溝槽的高分子模仁，且於溝槽底部形成光柵結構，(i)混合 OG154 和 OG169 高分子被注入 OG146 高分子模仁溝槽內之製程，(j)液體的混合高分子注入該溝槽內，並經過紫外光曝光而被硬化定型，並將玻璃載片及 PDMS 層從樣品上剝離，(k) 厚度 $410\mu\text{m}$ 的間隔子被放置於前述樣品與一薄的 Pyrex 玻璃載片間，(l)注入 OG146 高分子而形成一上覆蓋層，(m)OG146 高分子經紫外線曝光後與上覆蓋層之高分子相互交聯而結合固定為一體，(n)除去玻璃載片之後，製成一波導。

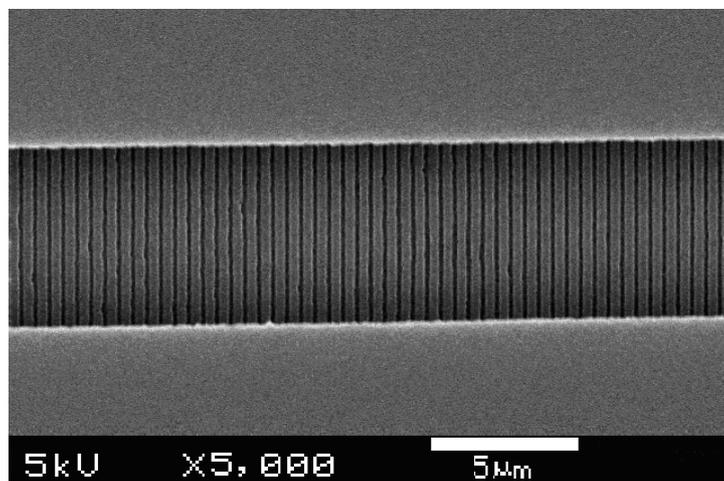


圖三、圖 2(c)所示之負光阻溝槽內光柵結構之掃瞄式電子顯微照像，掃瞄式電子顯微鏡傾斜 55 度（面積 $8.7\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ ，長度 5cm，光柵週期 503nm）。

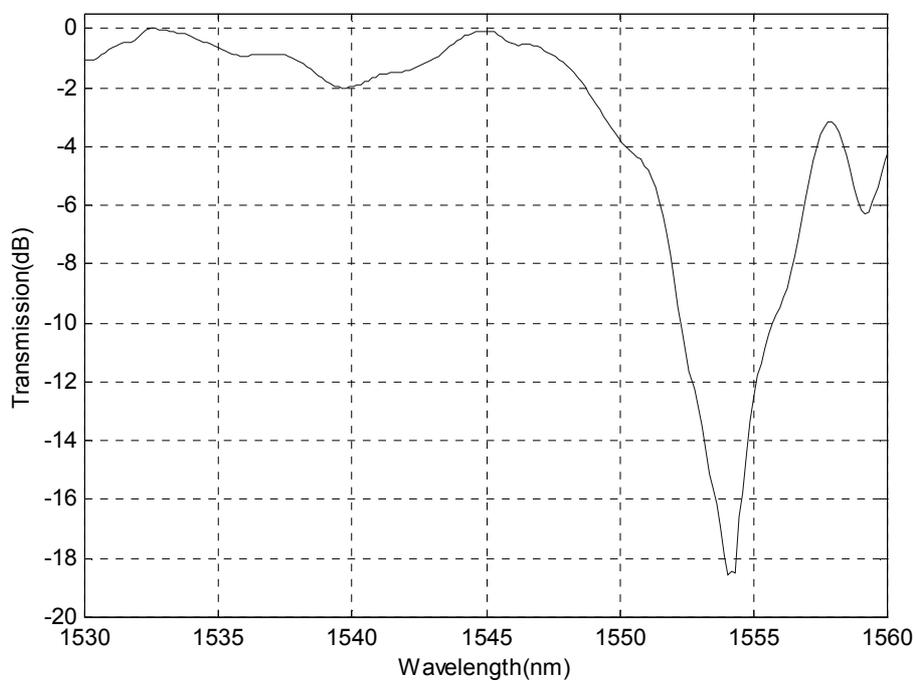


圖四、圖 2(e)所示之 PDMS 波導光柵的掃瞄式電子顯微照像，掃瞄式電子顯微鏡傾斜 35 度（面積 $8.7\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ ，長度 5cm，光柵週期 502nm）。

利用一種複製技術在聚合物波導上製作光柵結構



圖五、圖 2(h)所示之 OG146 高分子矩形溝槽內光柵結構的掃描式電子顯微照像，掃描式電子顯微鏡傾斜 5 度（面積 $8.7\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ ，長度 5cm，光柵週期 503nm）。



圖六、光柵長度為 0.5cm 的高分子波長濾波器的傳輸光譜