

國立交通大學  
光電工程研究所

碩士論文

以模造玻璃技術製作  
高分子光波導型可調式光衰減器之研究  
**Polymer Waveguide VOA Fabricated  
by Molding Glass Technology**



研究生：蔡坤錫

指導教授：祁 牲 教授

呂英宗 博士

中華民國九十三年六月

以模造玻璃技術製作  
高分子光波導型可調式光衰減器之研究

**Polymer Waveguide VOA Fabricated  
by Molding Glass Technology**

研 究 生：蔡坤錫

**Student : Kun-Hsi Tsai**

指導教授：祁 甦

**Advisor : Sien Chi**

呂英宗

**Ying-Tsung Lu**



**A Thesis  
Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering  
College of Electrical Engineering and Computer Science  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master In  
Electro-Optical Engineering**

**June 2004**

**Hsin-Chu, Taiwan, Republic of China**

中華民國九十三年六月

# 以模造玻璃技術製作 高分子波導型可調式光衰減器之研究

研究生：蔡坤錫

指導教授：祁 甦 教授

呂英宗 博士

國立交通大學光電工程研究所

## 摘要

近年來高分子聚合物材料的發展，使其具有價格低、低光學傳播損耗(最低可達 0.01dB/cm)、高 T/O 係數( $dn/dT \cong -3 \times 10^{-4}$ )、高玻璃移轉溫度( $T_g=250^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ )及製作方便等優點，已被廣泛的應用在光被動與主動元件的製作上。在本論文中，我們提出了一個以模造玻璃 (Molding Glass) 技術來製作高分子熱光式光波導型可變光衰減器。元件的架構是以高分子材料為導光層及玻璃為基板 (cladding) 之 S 型嵌入式光波導。此元件在光通訊 C-band 區，能夠得到令人適當的衰減量。此光波導彎曲之設計非常適合使用來控制光能量的損耗。在元件製作完成後，其光學衰減量可達到 30db ( $-1\text{dB}/^\circ\text{C}$ )。此外元件製作設計非常適合與其他平面光波導光通訊元件整合成各式光通訊應用模組。

# Polymer Waveguide VOA Fabricated by Molding Glass Technology

Student : Kun-Shi Tsai

Advisor : Sien Chi

Ying-Tsung Lu

Institute of Electro-Optical Engineering  
National Chiao-Tung University

## Abstract

Polymer with low propagation loss, high glass transition temperature ( $T_g$ ), and high thermo-optic coefficient ( $dn/dT \cong -3 \times 10^{-4}$ ) have been used worldwide for photonic components. In this paper, a polymer waveguide type variable optical attenuator fabricated by molding glass technology is proposed. The S-shape buried waveguide structure with polymer core and silica cladding that attenuates light with satisfactory optical attenuation through the spectrum from  $1.52\mu\text{m}$  to  $1.57\mu\text{m}$  is presented. The waveguide bend design is fabricated by photolithography, electroforming and molding glass technologies and operates by controlling waveguide bend radiation loss. This device has 30db attenuation ( $-1\text{dB}/^\circ\text{C}$ ) after we carry out that device. In addition, this design is suitable to integrate with planar light-wave circuits (PLC) to fabricate the monolithic optical modules in application of optical communication.

# 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
目錄.....	iii
圖表目錄.....	iv
第一章 導論.....	1
第二章 理論分析與模擬結果.....	4
2.1 波導概述-幾何光學與波動光學.....	4
2.2 彎曲損失與其可調制之機制.....	6
2.3 S-shape 可調式光學衰減器之設計與模擬.....	9
第三章 元件製作.....	13
3.1 元件的製作流程.....	15
3.1.1 第一階段圖形轉換.....	15
3.1.2 第二階段光波導成形.....	38
3.2 製程結果與討論.....	42
第四章 波導特性量測.....	46
4.1 量測系統.....	46
4.2 量測結果與討論.....	48
第五章 結論.....	52
參考資料.....	55

# 圖表目錄

圖 2.1	光波在光波導中全反射傳播.....	4
圖 2.2(a)	入射光的相位波前與反射光的相位波前.....	5
圖 2.2(b)	兩道光波干涉形成干涉條紋（駐波）.....	5
圖 2.3	彎曲所造成的損失.....	6
圖 2.4	彎曲的波導.....	7
圖 2.5	S 型光波導結構俯視圖.....	9
圖 2.6	S 型波導之光場衰減輻射場型.....	9
表 2.1	材料之折射率.....	10
圖 2.7	S 型光波導橫切面圖.....	11
圖 2.8	模擬 S-bend VOA 損耗與導光層折射率之關係.....	11
圖 2.9	模擬 S-bend VOA 損耗與溫度之關係.....	12
圖 3.1	元件製作流程圖.....	13
圖 3.2	電鑄鎳板時會造成表面粗糙、圖形塌陷或長角等問題(a)長角 (b)(c)(e)表面粗糙 (d)(f)塌陷.....	16
圖 3.3	利用矽蝕刻製作模仁.....	17
圖 3.4	(a)電鑄後無法脫模 (b)(c)蝕刻後的矽晶圓圖形表面.....	17
表 3.1	光阻母模製作流程.....	19
圖 3.5	光阻膜厚與轉速的關係.....	21
圖 3.6	光罩圖形.....	23
圖 3.7	光阻保護層完成後之俯視圖.....	25
圖 3.8	濺鍍金後的光阻母模.....	26
圖 3.9	電鑄的架構圖.....	27
圖 3.10	電鑄成品-鎳板及模仁.....	29
圖 3.11	電鑄鎳板因內應力過大而彎曲.....	30
圖 3.12	熱壓模造玻璃製程參數圖.....	32
圖 3.13	溫度實驗波導的 Profile Meter 量測圖【固定壓力(16%)/改變溫度 (a)604°C (b)614°C (c)624°C】.....	33
圖 3.14	壓力實驗波導的橫截面圖【固定溫度(624°C)/改變壓力 (a)16% (b)43% (c)75%】.....	34
圖 3.15	壓力實驗波導的橫截面圖【固定溫度(634°C)/改變壓力 (a)50% (b)60% (c)70% (d)80%】.....	34
圖 3.16	條件 634°C/50%下波導的 SEM 橫截面圖.....	35
圖 3.17	圖形轉印尺寸關係圖.....	36

圖 3.18	塗佈 polymer 示意圖.....	38
圖 3.19	(a)拋光研磨機 (b)研磨凹槽外的 polymer.....	39
圖 3.20	(a)晶粒切割機 (Dicing Saw) (b)切割後的波導玻璃基板.....	40
圖 3.21	元件 SEM 俯視圖.....	41
圖 3.22	元件橫切面 SEM 圖.....	41
圖 3.23	(a)電鑄後鍍板模仁針孔的情形.....	42
圖 3.23	(b)電鑄後鍍板模仁針孔的情形 (c)電鑄前 UV 膠母模的情形 (d)鍍板因 內應力過大而彎曲.....	43
圖 3.24	壓印 10 次後模仁表面沾黏玻璃的情形.....	44
圖 3.25	部分材料因研磨而完全脫落.....	44
圖 3.26	(1) 研磨前 (2)研磨後波導端面之 SEM 照片.....	45
圖 4.1	量測系統圖.....	47
圖 4.2	(1)雷射光未導入波導時的光點 (2)雷射光一部份導入波導後出光 (3) 雷射光全部導入波導後出光.....	48
圖 4.3	第一代 VOA 元件在波長 1550nm 時之傳輸損耗與溫度之關係.....	49
圖 4.4	第一代蝕刻石英玻璃基板 VOA 的截面圖.....	50
圖 4.5	第二代熱壓模造玻璃 VOA 的截面圖.....	51



## 誌 謝

感謝神帶領我在多年的工作後，能再次回到學校進修，從不熟悉的研究環境摸索起，到稍能由研究中了解一些研究的樂趣與奧妙後，短短的研究生生涯竟也在知不覺中即將結束。實驗得以順利完成，首先要感謝祁姓老師與工研院光電所呂英宗經理，其傳授的知識與提供的自由發展空間，是研究得以成型的主因。再來，要感謝楊振霖學長及工研院 Q320 同仁在實驗上幫忙，才能使實驗中的問題得以一一解決。感謝賴暎杰老師，陳智弘老師與馮開明老師撥冗擔任口試委員且提出寶貴意見。也要感謝實驗室裡的曾弘毅、錢鴻章、周森益、彭朋群、彭煒仁、鄭翰陽、葉信宏、黃明芳及粘芳芳等學長姊，謝謝你們在實驗或生活上的幫忙。

另外，實驗室裡的同學至揚，盈傑，加和，淑玲以及學弟妹珮欣與銘清等等，也要謝謝你們的陪伴，讓我有愉快的心情進行實驗。

最後我要感謝我的家人及教會的朋友的祈求禱告，特別是我的妻子蓓蓓的支持及區長祥明一家人的關心，謝謝你們在我的求學生涯的陪伴與支持，謝謝。

# 第一章 導論

可變光學衰減器 (Variable Optical Attenuator ; VOA) 已經很廣範地被應用在長距離傳輸或是短距離的光纖通訊網路中，用來自動調整光輸出能量的大小。同時，它可以在多通道耦合前提供能量平衡，能使雷射維持理想的波長穩定[1]；維持 OADM 波道間的平衡，使每個通道不因個別通道的載入或取出皆能維持光強度平衡[2]；可置於進入接收器前端或置於光放大器間作能量控制。因此，在 WDM 通訊系統中，光學衰減器是一個很重要的元件。

光學衰減器有許多種類的製造方式，包括藉由透過電場的應用改變 EO 材料的折射率來控制衰減量，或是藉由調整空氣間隙改變一對光纖端面相互之間所有損失的距離。另外，液晶 (Liquid-Crystal) [3] 和微機電 (MEMs) [4] 的技術也被應用在光學衰減器的製作。然而，以上這些製作技術都面臨到製作成本過高，或在實際應用中造成光損失過大的問題。近年來，使用平面光波導 (Planar Lightwave Circuit; PLC) 來製作光學衰減器的技術陸續被提出[2、5-7]。此技術所製之光學衰減器可以與 AWG 或 OADM 積體整合成爲模組以降低製造成本，並且使整體更爲小巧。

在材料方面，爲了因應不同網路系統的需求，光通訊元件所要求

的規格也不一樣。在長距離的傳輸上，系統對損失的要求非常嚴格，不受溫度及環境影響是最基本的要求。所以性質穩定的玻璃基材元件，玻璃材料具有良好的光學性質，如透光率、寬波長穿透範圍、耐磨損、耐高熱、耐潮濕及抗靜電等優點，適合製作長距離通訊用元件。另外，高分子聚合物具有價格低廉、低光學傳播損耗、高 T/O 係數(約為 SiO<sub>2</sub> 的 30 倍)、高玻璃移轉係數 (T<sub>g</sub>=250°C~400°C) 等優點，適合用來製作低成本，區域網路用的光通訊元件，尤其是其高 T/O 係數的特性，使其在可溫控調節的光通訊元件上更具有無窮的應用潛力 [7-8]。



可調式平面光波導光學衰減器在未來的發展上，可以與其他光通訊元件整合成各式光通訊應用模組，例如增益平坦化光放大器(EDFA + VOA)，增益平坦可配置式光塞取器( Configurable Add/Drop Module + VOA)，增益控制器 (ASE + VOA)，多波道等化器 (MUX/DEMUX + VOA) ...等。

我們利用前一代所提出的利用蝕刻石英玻璃的技術製作波導型可變光學衰減器的設計，透過加熱的應用改變熱光材料的折射率來控制衰減量，已成功的驗證了元件的特性[9-10]，詳細的原理與設計將在第二章中說明。新一代的元件以熱壓模造玻璃製造技術製作出嵌入式平面光波導型元件，以性質穩定的玻璃BK7 (Silica--SiO<sub>2</sub>) 為元件

基材，並以具有高T/O係數特性的高分子聚合物（有熱光效應的材料）為Core的材料，藉由高分子聚合物之高T/O係數的特性，可以使可調式光學衰減器在很小的工作溫度區間達到大範圍的折射率變化進而得到大幅度的光衰減量。

在本論文中，我們在製程上提出一個新的製造平面光波導元件的方式，此製程技術結合了半導體製程技術[11]、電鑄（Electroforming）技術[12]及熱壓模造玻璃（Molding Glass）成形技術[13]來製作出S型、嵌入式（Embedded）、平面光波導型的可調式光學衰減器。

論文的第二章將簡單的描述光波導基本理論，並且說明可調式光學衰減器的原理、設計，然後利用BPM-CAD來進行模擬。第三章將針對波導各層材料做介紹，並分析其特性及詳細地說明平面光波導的製程步驟；分析製作過程中重要的步驟，及元件的電子顯微鏡（SEM）橫截面圖。第四章為元件量測的結果與討論。第五章為結論。

## 第二章 理論分析與模擬結果

在本章的第一、二節將簡單地介紹光波導的基本理論，第二節為彎曲損失 (bending loss) 與其可調製 (Tunable) 機制，而最後則是說明 S-shape 可變光學衰減器之設計與模擬結果。

### 2.1 光波導概論---幾何光學與波動光學

從基礎的幾何光學出發，我們知道當光波從折射率高的介質進入折射率低的介質時，當滿足入射角大於臨界角 (Critical Point) 的條件時就會產生全反射現象，光波導 (Optical Waveguide) 就是藉由全反射 (Total Reflection) 的原理讓光在波導中傳播，如圖 2.1 所示。

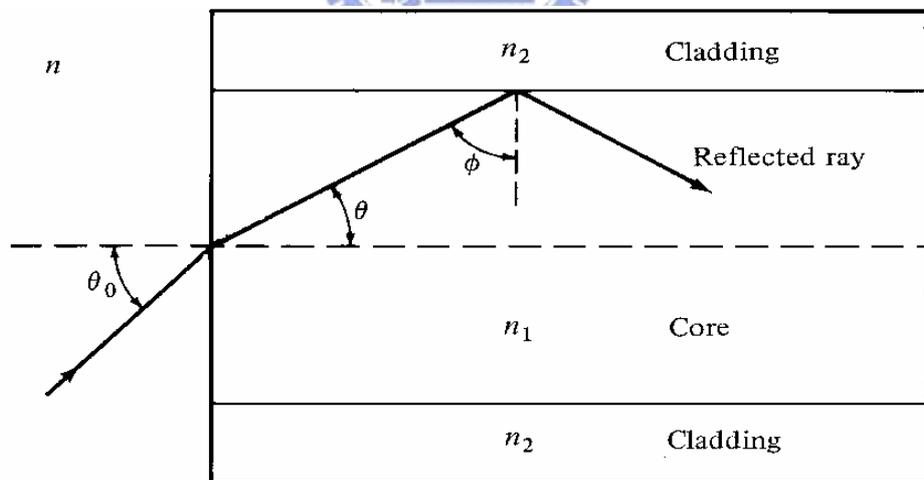


圖 2.1 光波在光波導中全反射傳播

另外，從波動光學的角度來看光波在光波導傳播時[14]，入射光的相位波前與反射光的相位波前，如圖 2.2(a)所示，這兩道光波在光

波導中相互干涉形成駐波，如圖 2.2(b)所示，在輸出端截面可以發現其干涉條紋，此干涉條紋即是所謂的 **guided mode**，圖 2.2(b)為我們所熟知的 **fundamental mode**。光波在光波導中傳播便是以駐波的形式保存能量，使能量不易散逸，而能將能量傳播到遠處。

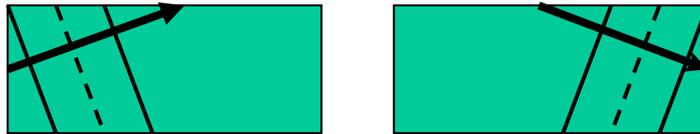


圖 2.2(a) 入射光的相位波前與反射光的相位波前

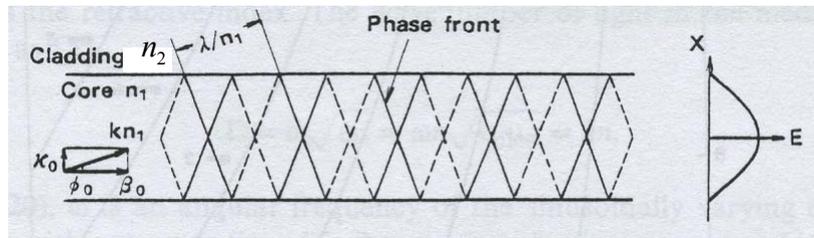


圖 2.2(b) 兩道光波干涉形成干涉條紋（駐波）

## 2.2 彎曲損失與其可調制之機制

一般而言，光波導彎曲所造成的損失[15-24]，是由於光波導的彎曲造成中心軸不在同一直線上，當傳播模態光在 core 與 cladding 的介面處產生全反射，使得部分光束的入射角小於臨界角，而無法滿足全反射的條件，使得部分的傳播模態光折射入 cladding 中形成輻射模態（radiation modes）向外逸散，造成光功率的損失，如圖 2.3 所示。

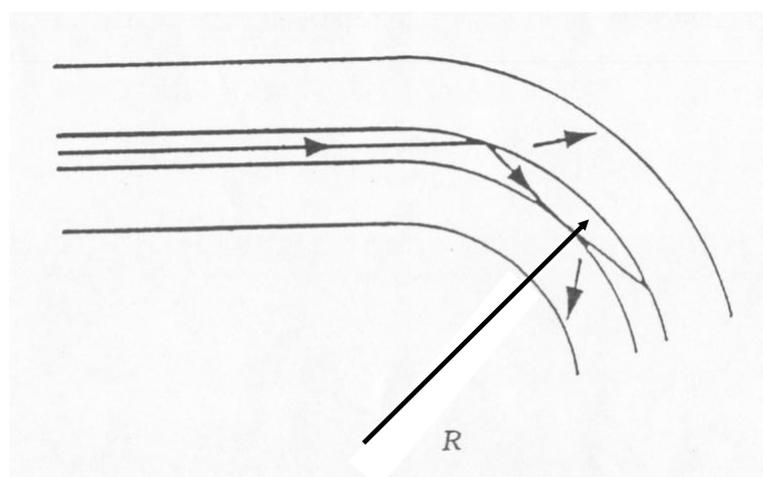


圖 2.3 彎曲所造成的損失

考慮如圖 2.4 所示曲率半徑(R)之彎曲的波導，其彎曲所造成的每單位長度波導能量衰減值 $2\alpha$ 關係可以下式表示[17-18]：

$$2\alpha = \frac{2qh^2 \cdot e^{qt} \cdot e^{-\frac{2}{3}q^3R/\beta^2}}{\left[n_2^2 - n_1^2\right] \cdot k^2 \beta (t + 1/q + 1/p)} \quad (2.29)$$

其中  $h = [n_2^2 k^2 - \beta^2]^{1/2}$ ， $q = (\beta^2 - n_1^2 k^2)^{1/2}$ ， $p = (\beta^2 - n_3^2 k^2)^{1/2}$ ，同方程式 (2.14,15,16)， $k = \omega(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2} = 2\pi/\lambda$  為波數， $\omega = 2\pi f$  為角頻率， $\beta$  是傳

播常數， $t$  是波導寬度， $n_2$ ， $n_1$ ， $n_3$  分別是 core，substrate，cladding 的折射率，且  $n_2 > n_3 > n_1$ 。  $\epsilon_0$  及  $\mu_0$  分別為真空中的介電係數與導磁係數。

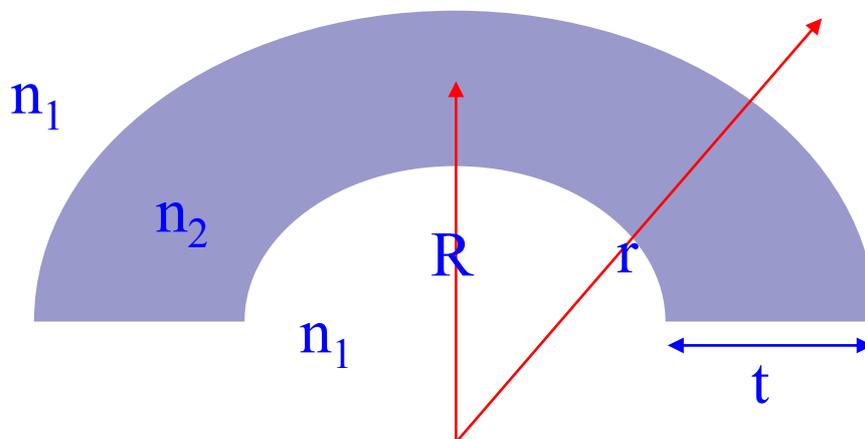


圖 2.4 彎曲的波導

由方程式(2.29)，當我們固定  $\omega(\lambda)$ ， $t$ ， $n_1$ ， $n_2$ ， $n_3$  值時，彎曲所造成的每單位長度波導能量衰減值  $2\alpha$  與曲率半徑(R)的關係為  $\alpha \propto e^{-R}$  是反比的關係，當曲率半徑(R)越小則波導能量衰減值  $2\alpha$  越大。

同上，當我們固定  $\omega(\lambda)$ ， $t$ ， $n_1$ ， $R$ ， $n_3$  值，而 core 的折射率  $n_2$  可隨溫度變動時表達為  $n_2(T)$ ，此時衰減值  $2\alpha$  與 core 的折射率  $n_2(T)$  的關係為：

$$2\alpha \propto \frac{qh^2 \cdot e^q \cdot e^{-q^3/\beta^2}}{\left[ n_2^2(T) - n_1^2 \right] \beta(t + 1/q + 1/p)} \quad (2.30)$$

藉由熱光效應 (Thermal optic effect) 來改變 core 的折射率  $n_2(T)$ ，就可以調整衰減值  $2\alpha$ 。而本論文所設計的可變光學衰減器(VOA)便是以波導的彎曲來造成能量衰減，並利用具有高 T/O 係數

(  $\frac{dn}{dT} \cong -3.0 \times 10^{-4}$  ) 的高分子聚合物材料做導光層，藉由改變導光層的溫度(T)來改變導光層的折射率  $n_2(T)$  進而來改變衰減值  $2\alpha$  。



## 2.3 可變光學衰減器之設計與模擬

利用波導彎曲來造成光能量衰減的原理，我們設計了一個由雙重彎曲（S-Shape）、嵌入式的波導（embedded waveguide）所組成的可變光學衰減器（Variable Optical Attenuator；VOA），如圖 2.5 所示，整體架構為長  $4850\mu\text{m}$ ，寬  $640\mu\text{m}$ 。此架構是由兩個形狀相同的彎曲波導所相接組成的，其衰減量會比單獨只有一個彎曲的波導所組成光學衰減器來的大[25]，而且其輸入與輸出之傳播的方向不會因為彎曲而改變。

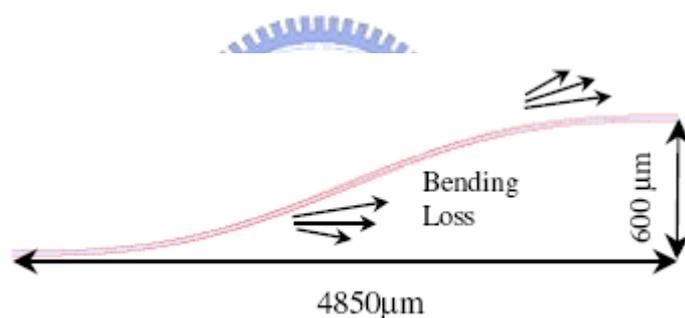


圖 2.5 S 型光波導結構俯視圖

圖 2.6 為模擬光波在此架構中傳播，光場經由輻射場（radiation mode）形式，在兩處彎曲處，將能量逸失，造成能量衰減的現象。

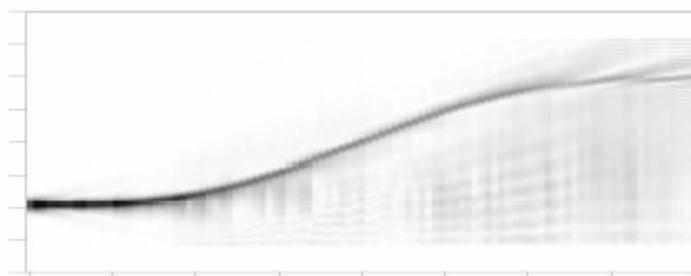


圖 2.6 S 型波導之光場衰減輻射場型

由方程式(2-30)可知當 core 的折射率  $n_2(T)$  越接近 substrate 的折射率  $n_1$  時，衰減值  $2\alpha$  越大。因此，我們在此元件的材料選取上 core 與 substrate 在室溫下的折射率越接近，衰減的效果越顯著，也就是說在材料選取上要匹配 core 與 substrate 的折射率，我們所選用的材料如下表 2.1:

材料	折射率
導光層(core)：Polymer (IPG Corp.) T/O 係數( $dn/dT \cong -3.0 \times 10^{-4}$ )	$n_2=1.51$ @RT ( for 1.54um )
玻璃基板(substrate)：BK7 glass	$n_1=1.50$ @RT ( for 1.54um )
空氣	1(RT=25°C)

表 2.1 材料之折射率

我們在光波導橫截面的設計上所選取的是嵌入式的光波 (embedded optical waveguide) 如圖 2.7 所示，波導的深度為  $7\mu\text{m}$ ，寬度為  $6\mu\text{m}$ 。另外，我們請 IPG Corp. 調配出與 Schott BK7 折射率接近且高 T/O 係數的高分子材料，詳細的高分子合成可參閱參考資料 [26-27]。而 VOA 可調的部分則是利用高分子材料之熱光效應 (Thermo-optic effect) 高 T/O 係數( $dn/dT \cong -3.0 \times 10^{-4}$ )，調變溫度來改變材料的折射率，進而對我們所設計的光學衰減器進行衰減的調變，其可調衰減之關係為方程式(2-30)。

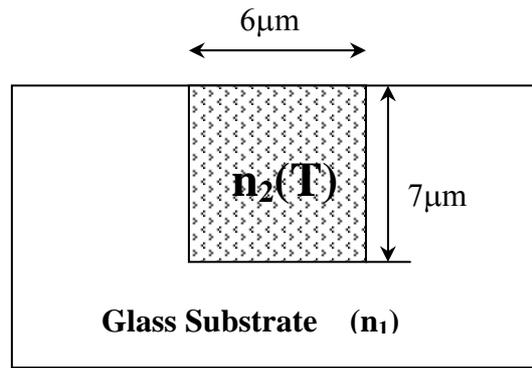


圖 2.7 S 型光波導橫切面圖

再來，我們將上述結構代入套裝軟體 BPM-CAD 中進行模擬，根據上述所設計的架構：長  $4850\mu\text{m}$ ，寬  $640\mu\text{m}$  之 S 型光波導衰減器，其中光波導的深度  $7\mu\text{m}$ ，寬度  $6\mu\text{m}$ ；波長為  $1550\text{nm}$ ，輸入端輸入 fundamental mode，對不同的導光層折射率  $n_2(T)$  進行模擬，其元件損耗結果如圖 2.8 所示。從模擬的結果可知當  $n_2(T)$  越接近  $n_1$  時，其輸出之穿透能量就越小，換句話說就是彎曲波導以輻射形式造成光功率的損失就越大。

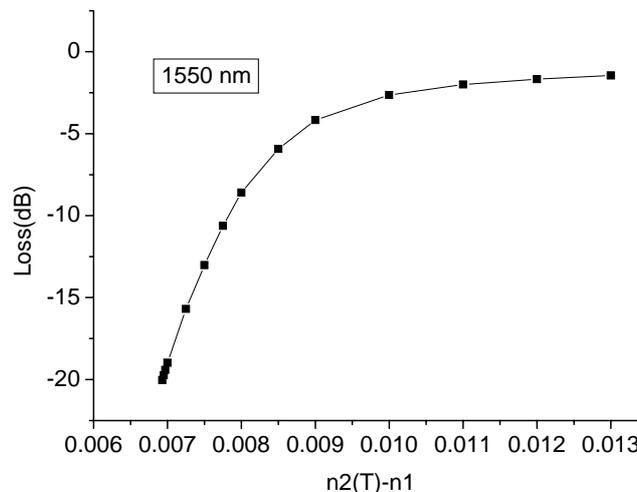


圖 2.8 模擬 S-bend VOA 損耗與導光層折射率之關係

以折射率為座標之圖 2.9 可轉換成以溫度為座標的圖 2.12。經由我們模擬的結果，從溫度 13°C 升高溫度到 46°C，我們所設計的衰減器其衰減量可以達到 20dB。

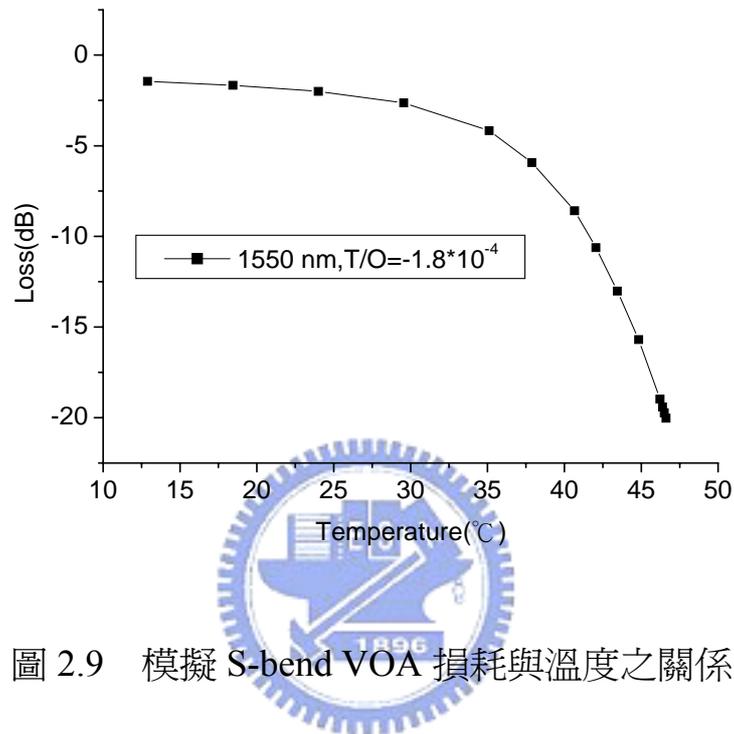
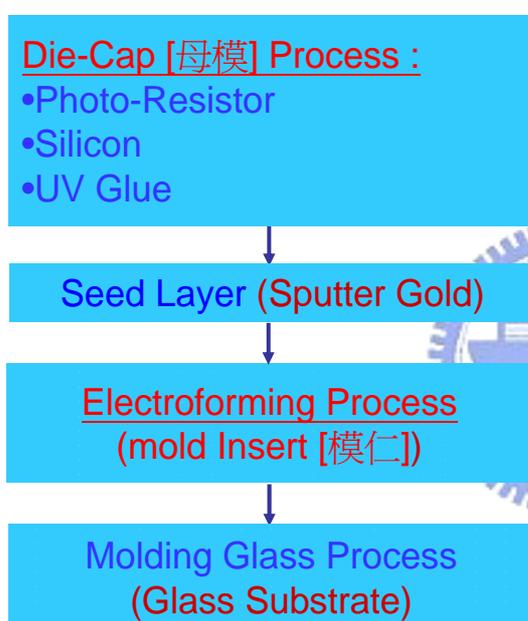


圖 2.9 模擬 S-bend VOA 損耗與溫度之關係

## 第三章 元件製作

這個章節中，將詳細描述整個可調式光學衰減器的製作流程，分為兩大部分討論：圖形轉換（Pattern Transformation）及光波導製程（Waveguide Fabrication），圖 3.1 是我們元件製程簡單的流程圖。

### 1. Pattern Transformation



### 2. Waveguide Formation

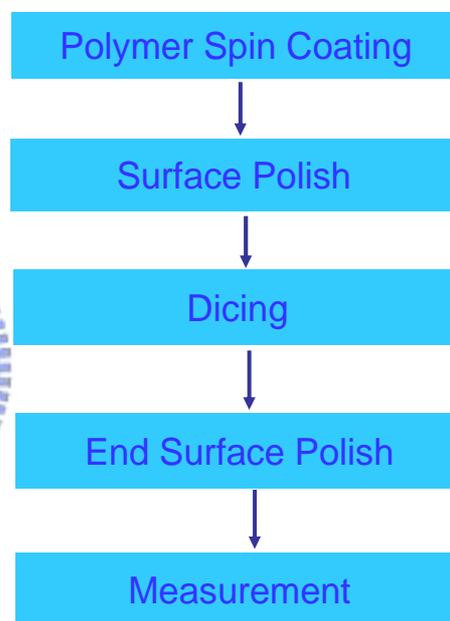


圖 3.1 元件製作流程圖

第一階段 3.1 節是圖形的轉換（Pattern Transformation），製程步驟包括：母模（Die Cap）製程[11]、種晶層（Seed Layer）、電鑄製程（Electroforming Process）[12]及模造玻璃（Molding Glass）製程[13]。

第二階段 3.2 節是波導形成（Waveguide Formation），此步驟是將 Polymer 材料填入溝槽中形成導光的部分。製程步驟包括：材料塗蓋

(Core Material Coating)、表面研磨 (Surface Polish)、切割 (Dicing)、  
端面研磨 (End Surface Polish) 和量測。



### 3.1 元件的製作流程

我們將元件製作分為兩個階段：

第一階段是圖形的轉換 (Pattern Transformation)，包括：母模 (Die Cap) 製程、種晶層 (Seed Layer)、電鑄製程 (Electroforming Process) 及玻璃模造 (Molding Glass) 製程。

第二階段是波導的形成 (Waveguide Formation)，此步驟為將合適的 Polymer 材料填入凹槽中形成導光的部分。包括：導光層材料塗蓋 (Core Material Coating)、表面研磨 (Surface Polish)、切割 (Dicing)、端面研磨 (End-Surface Polish) 和量測。

以下我們將分兩階段，逐一討論每一個製程步驟。

#### 3.1.1 第一階段圖形轉換 (Pattern Transformation)

##### (一) 母模製程 (Die-Cap Process)

我們嘗試了三種方式來製作母模[11]；討論如下：

##### I. 光阻母模 (Photoresist Die-Cap)

利用光阻 (Shiply SPR220\_7.0/MicroChem SU8\_5[有較佳的材料特性但由於此型光阻的厚度無法達到 7 $\mu\text{m}$ ，所以我們將不再討論此型光阻])，並利用光蝕刻技術將光罩上的圖形轉移到光阻上，然後再濺鍍上一層金為種晶層 (seed Layer) [導電之用]。之後就可電鑄，將圖形由光阻複製轉移到鎳板上了。電鑄是電沈積 (Electro Deposition)

的過程，帶正電的鎳離子順著電場的方向，會不斷的轟擊母模表面[陰極]，使得表面溫度上升約 50~60°C，Shiply SPR220\_7.0 由於無法硬烤，因此母模的光阻材料較軟且光阻中附著的水氣及殘留的溶劑無法完全去除，經電鑄時會造成表面粗糙、圖形塌陷或長角等問題，使得圖形無法完全轉換，造成後續製程的失敗，如圖 3.2 所示。

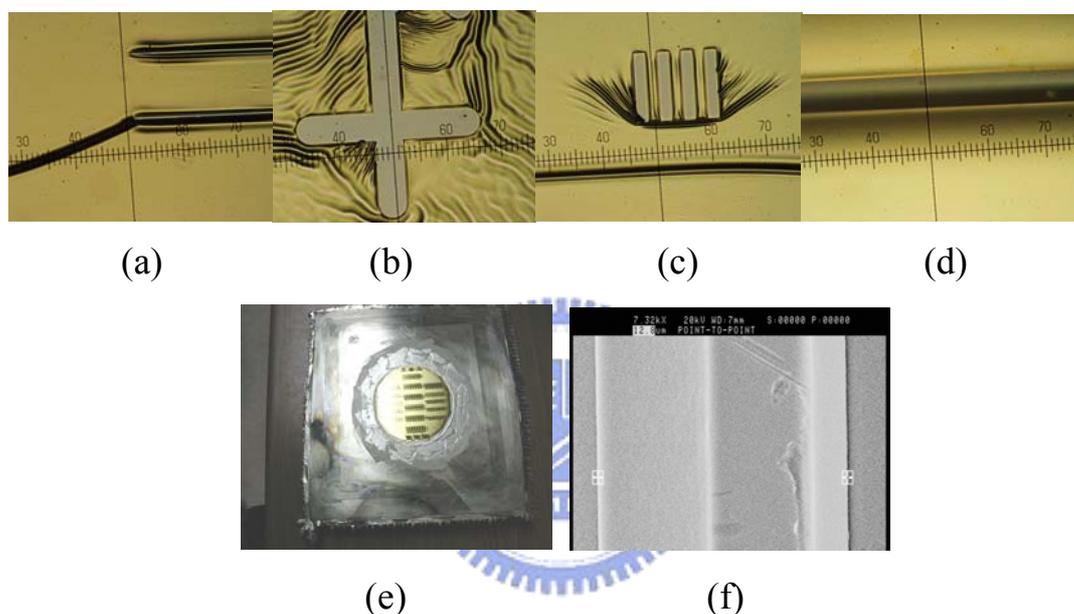


圖 3.2 電鑄鎳板時會造成表面粗糙、圖形塌陷或長角等問題

(a)長角 (b)(c)(e)表面粗糙 (d)(f)塌陷

如果可以找到適當的光阻材料，此製作母模的方式是便宜、簡單且對後續電鑄製程有容易脫模的優點的製程方式。

## II. 矽母模 (Silicon Die-Cap)

利用半導體蝕刻技術將圖形轉移至矽基板 (Silicon Substrate) 上，既可製作一個較穩定的母模。因此，以微影製程將光罩上的圖形轉移至光阻上，再利用矽蝕刻技術 (Dry Etching) 將光阻上的圖形轉

至矽晶圓上，然後濺鍍上一層金當作種晶層（Seed Layer），隨後放入電鑄槽中電鑄，脫模後既為我們所要的模仁（Mold），如圖 3.3 所示。

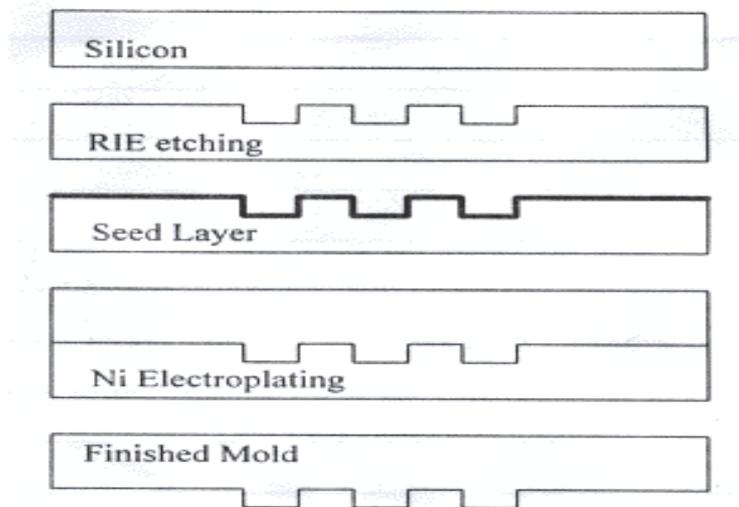
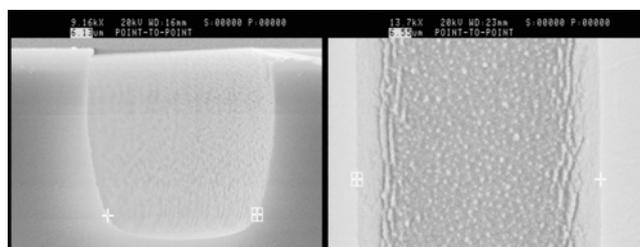


圖 3.3 利用矽蝕刻製作模仁

但經蝕刻後的矽晶圓圖形表面粗糙，造成後續電鑄後無法脫模，如圖 3.4 所示。



(a)



(b)

(c)

圖 3.4 (a)電鑄後無法脫模

(b)(c)蝕刻後的矽晶圓圖形表面

若能改善經蝕刻後的矽晶圓圖形表面粗糙度，使得電鑄模容易脫離，此母模的製造方法可以獲得一個較為穩定的圖形轉換，應可以得到較佳的電鑄模。

### III. UV 膠母模 (UV Glue Die-Cap)

利用(I)的方法獲得一個薄的電鑄鎳模 (0.263mm)，然後利用 UV 膠壓印翻模，複製圖形至塗有 UV 膠的玻璃基板上，再濺鍍上一層金，作為種晶層 (Seed Layer)，電鑄後脫模就可以製作模仁了。詳細的 UV 膠母模 (UV Glue Die-Cap) 製程步驟及條件，討論如下。

#### A、清洗製程 (Clean Process)

清洗製程的目的是要去除晶片表面的 particles 和有機化合物，以增加附著力及均勻度，避免光阻塗蓋時產生的劍影或光阻剝落的現象產生影響後續製程。

- (1) 準備 4 吋矽基板 (Silicon Substrate)。
- (2) 將矽基板浸泡在中性清潔液+純水 (1:100) 中用超音波震 3 分鐘以去除有機溶劑的殘留+DI water rinse。
- (3) 將矽基板浸泡在丙酮 (Acetone) 內用超音波震 3 分鐘，以去除晶片表面的 defects。
- (4) 將矽基板浸泡在異丙酮 (IPA) 內用超音波震 3 分鐘，以去除晶片表面殘留的 Acetone，避免因晶片表面的 Acetone 殘留污染+DI

water rinse。

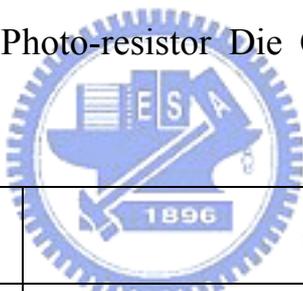
(5) 將玻璃旋乾，放在 Hot Plate 上以 115°C 烘烤 10 分鐘將水氣烤乾。

到此我們完成了製程前的準備工作。

## B、微影製程 (Lithograph Process)

微影之定義，就是將光罩 (Photo mask) 上之圖案 (Pattern) 轉移至光阻 (photo-resist) 上面，由於光阻材料之正負性質不同，經顯影 (Develop) 後，光阻圖案會和光罩圖案完全相同或成互補。利用微影製程技術來製作我們所設計的 S-Shape、embedded optical waveguide 的光阻母模 (Photo-resistor Die Cap)，製作流程詳細說明

如下表 3.1。



	Step	Condition
1	Clean Wafer	Acetone/IPA+DI Water rinse
2	Dehydration Bake	115°C Contact Hot Plate
3	Spin Coating HMDS/PR	Step1:700rpm/5sec Step2: 2500rpm/40sec
4	Soft Bake	115°C/90sec
5	Exposure	12sec
6	Develop	TMAH 2.38% rinse 50~60secs / DI Water rinse

表 3.1 光阻母模 (Photo-resistor Die Cap) 製作流程

微影的基本製程也就是由(1) Photo-resist Coating (2) Exposure (3)

Development 等三大步驟所構成的。但爲了加強圖形轉換的精確性及可靠性，整個微影製程還包括去水烘烤（Dehydration Bake）、塗底（Priming）、軟烤（Soft Bake）和硬烤（Hard Bake）等步驟，使整個製程的複雜性增加。

### (1) 塗底（Priming）

理想的微影製程應該可以將光罩上的圖形完完整整的轉移到光阻上，以便利接下來的蝕刻製程的執行。而影響光阻進行圖形轉換的首要重點，便是光阻與晶片表面彼此間的附著（Adhesion）能力。塗底（Priming）便是一個普遍用來提升光阻與晶片表面附著性的步驟。

晶片表面通常含有因空氣的濕度而吸附的水分子，因此在進行光阻塗蓋（Coating）之前，通常將晶片置於加溫的環境中數分鐘，以便將這些水分子從晶片表面蒸除，這步驟稱爲去水烘烤（Dehydration Bake）。經過去水烘烤的晶片，將塗上一層用來增加光阻與晶片表面附著能力的化合物，英文全名爲”Hexamethyldisilazane”，通常簡稱爲HMDS。這個步驟通常稱爲塗底（Priming）。將HMDS塗蓋在晶片上的方法主要有兩種，一則以旋轉塗蓋（Spin Coating），一則以氣相（Vapor）塗蓋，來進行晶片上光阻塗蓋製程前的塗底步驟。

### (2) 光阻（Shipley, SPR220\_7.0）塗蓋（Spin Coating）

經過去水烘烤與塗底處理後的晶片，便可以進行光阻塗蓋的步驟

了。這個步驟的目的，是要在晶片的表面附上一層厚度均勻、附著性強、且無任何缺陷（Defect）的光阻。迄今，幾乎所有的光阻塗蓋都是以旋轉式的塗蓋（Spin Coating）來進行的，此實驗步驟也是利用旋轉式塗蓋的方式進行。當旋轉器帶動晶片旋轉之後灑在晶片表面的光阻將因為離心力（Centrifugal Force）而往晶片的外圍移動，最後形成一層厚度極均勻的光阻層。這層光阻層的厚度除了與光阻液本身的黏性（Viscosity）有關之外，亦受旋轉器的轉動速度影響。

轉動速度越快，光阻層的厚度越薄，且厚度的均勻度也越理想。此外，光阻內含有有機溶劑，其揮發性極強，一但光阻灑在晶片上面之後，光阻的黏性便會隨著溶劑的揮發而開始改變。假如旋轉塗蓋的轉速和時間的調配不當，光阻層厚度的均勻性將大大的受到影響。光阻（Shipley SPR220\_7.0）轉數與膜厚的關係如圖 3.5 所示。

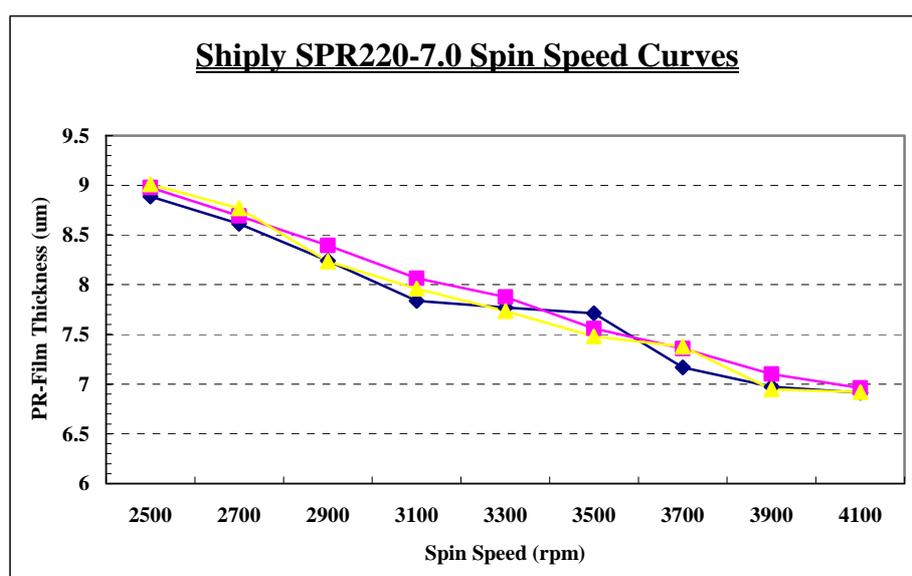


圖 3.5 光阻膜厚與轉速的關係

我們的主要轉速 3900rpm/40 秒，膜厚約 7.2 $\mu$ m。

### (3) 軟烤 (Soft Bake)

軟烤 (Soft Bake)，或稱為曝光前烘烤 (Pre-Exposure Bake)，是用來將晶片上的光阻層溶劑從光阻裡驅除的步驟，使光阻由原先的液態，經軟烤之後，成為固態的薄膜，並使得光阻層對晶片表面的附著力加強，以便利後續的製程。

控制晶片軟烤的主要參數有軟烤時間及溫度。假如軟烤的溫度太低，將光阻層的溶劑驅離所須要的時間便要加長；如果溫度太高，光阻表面溶劑將揮發的比內部的溶劑還快，最後使表面的光阻已完成硬化 (Solidification)，而內部的溶劑卻還沒有被完全排出，這將導致光阻表面的粗糙或皺紋。



此步驟對後續光阻對晶片表面的附著力，線寬精確度的控制及光阻的選擇性和對光的敏感度具有重大的影響。所以軟烤的溫度和時間的選定必須十分小心。光阻軟烤的條件：接觸加熱板 (contact hotplate) 115 $^{\circ}$ C 烤 90 秒鐘。

### (4) 曝光

曝光的目的是將光罩上的圖形轉移到光阻上，一般用紫外線當作曝光光源，我們採用的是 Shiply 的正光阻 (SPR220\_7.0)，光阻本身難溶於顯影劑，但遇光之後會解離成一種溶於顯影液的結構，而達到

圖形轉移的目的（從光罩轉換至光阻上）。我們所使用的曝光機台（EV620 contact aligner）為接近與接觸型的曝光機。對應不同的光阻膜厚需要不同的曝光量。曝光在元件的製作上是非常重要的步驟，曝光量太多或太少都會讓光波導的光阻線寬（Line Width）的改變，而影響後續製程。我們實驗中使用接觸式（Hard Contact）曝光方式來進行曝光，所使用的光罩設計圖如圖 3.6 所示，製程條件為：mode C/I（Constance Intensity）=12  $mJ/cm^2$ ，曝光時間為 12 秒。

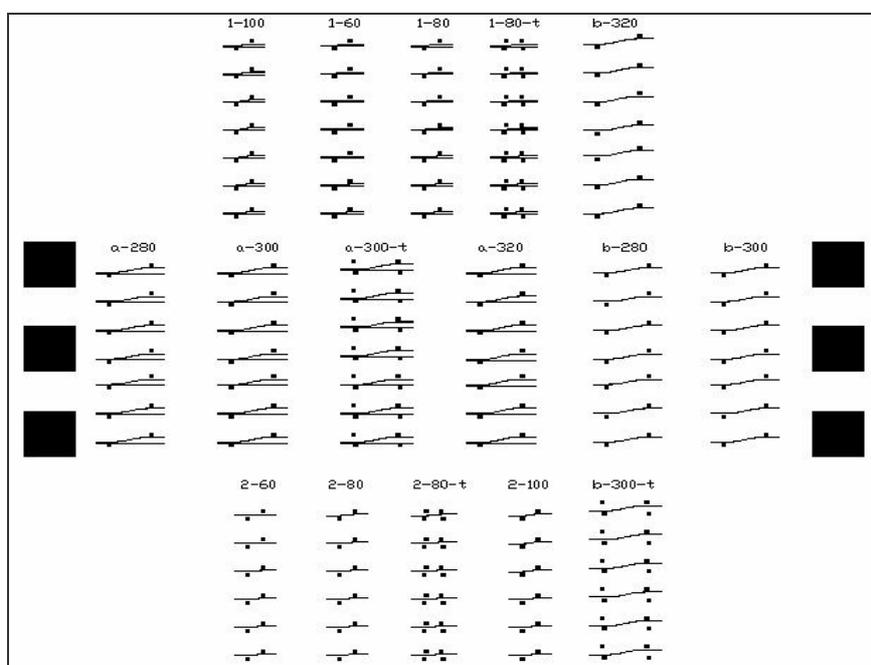


圖 3.6 光罩圖形

#### (5) 顯影（Development）

經過曝光的光阻層，便可以準備進行顯影（Development）的步驟了，以便將光阻層所轉移的潛在圖形顯現出來。為了避免光阻因為其他可能的副反應（Side Reaction）而改變其化學結構，經過曝光的

光阻，應該盡速的進行圖案的顯影，以免因為延遲顯影而影響結果。

曝光後，為使圖案顯現，必須移去不必要之光阻，對正光阻而言，曝光部份將被洗去，而留下未曝光部份圖形，目前正光阻之顯影液以不含金屬離子且稀釋過（2.38%）的 TMAH 為主。

正光阻顯影之方式概分為三種：**(a)浸泡式**：一次可以顯影數十片晶片，速度快，且浸泡槽在顯影速率不變之情況下可重覆使用，成本較低，其缺點則為顯影均勻度較差及易受污染等。**(b)單片噴灑式**：一次一片且均使用新的顯影液，藉噴灑及旋轉之離心力，以達到顯影之效果，此方法可有效改善污染問題，在均勻度之改善上，仍不盡完美，且顯影液之用量大。**(c)單片噴灑靜置式**：此仍為一次一片，但先將顯影液以慢轉速噴灑在晶片上，待顯影液完全均勻覆蓋在晶片上時，則靠顯影液在晶片上著力做靜置顯影，此方式之顯影均勻度較噴灑式佳，用量亦較少，且可避免污染問題，為目前較被廣泛使用之方式。

#### (6) 硬烤 (Hard Bake)

在光阻顯影成像後，最後仍會經過一道烘烤 (Hard Bake)，其目的在移去剩餘之溶劑及水氣，使光阻內未溶解之感光化合物和樹脂

間之結合更緊密，以增加光阻對熱之穩定性及底層物質之附著力，在將來之電鑄製程中，能確實發揮保護圖形之功能。

但此型光阻（Shiply SPR220\_7.0）經硬烤後，會使得角落方正的圖形產生塌陷（corner rounding）的現象，因此無法製作出直角的圖形，所以此型光阻將此步驟移除以便得到較佳的圖形轉換。至此，黃光微影製程就已完成了，如圖 3.7 所示，此為在顯微鏡所觀察之俯視圖，圖下方是被顯影液洗掉的凹陷區塊即是我們所設計的 S-shape 波導圖形，而沒有被顯影液洗掉的其他區塊則是我們所製作 S-shape 之光阻保護層。



圖 3.7 光阻保護層完成後之俯視圖

## (二) 種晶層（Seed Layer）製程

因光阻不導電所以必須在光阻上濺鍍上一層金（Sputter Gold），當作電鑄鎳的種晶層（Seed Layer）導電之用，如圖 3.8 所示。

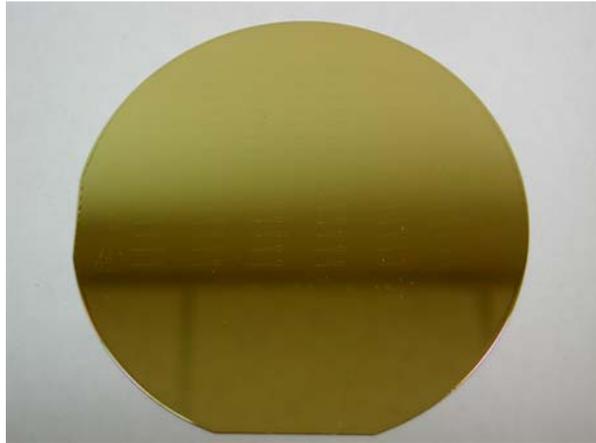


圖 3.8 濺鍍金後的光阻母模

### (三) 電鑄 (Electroforming) 鍍金屬模仁製程

電鑄係將母模放在陰極上，利用電鍍的原理[利用電解反應使溶液中的金屬離子在負極獲得電子而析出。如此既可把一種金屬鍍到另一種金屬物體表面上，形成一層金屬薄膜的現象]，將金屬或合金的原子，沈積在母模上，累積到需要的厚度（2~3mm），取出後使其與母模分離，成為電鑄金屬模仁。其電沈積（Electro-Deposition）的過程為原子的堆積，可完整複製母模上所有圖型[12]。

成品之經密度完全取決於母模之設計精度，只要模具設計得當，其複製精度可達到次微米級，此時可將之定義為所謂的精密電鑄技術。電鍍只是原工件表層被覆上被鍍上之金屬，電鑄則整體是某一金屬，或合金構成，電鑄技術難度在於內應力均勻，不得變形，表面及內部不得有針孔，鑄品的硬度、拉伸強度等機械特性受到重視，必須

將電鑄操作參數如鑄液成分、PH 值、溫度、添加劑及雜質等，在電鑄製程中控制管理，我們所採用的電鑄架設如下圖 3.9 所示：

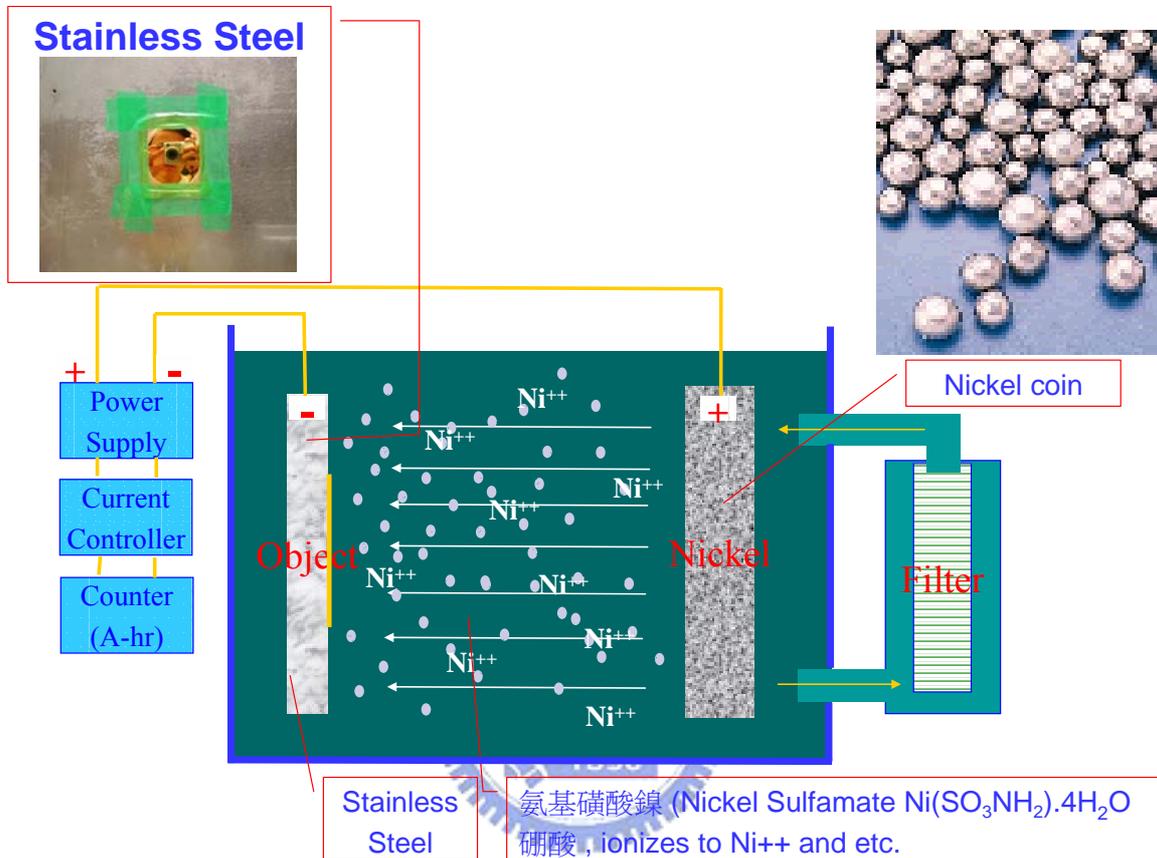


圖 3.9 電鑄的架構圖

電鑄 Ni 使用的標準鑄液為氨基磺酸鎳（Nickel Sulfamate,  $\text{Ni}(\text{SO}_3\text{NH}_2) + 4\text{H}_2\text{O}$ ），此鎳電鑄液具有下列優點：(1)鑄層內應力低，機械性質佳；(2)沈積速度快；(3)均勻電著性（throwing power）。為了使電鑄結構達到所需的品質，除了控制鑄液的 PH 值、溫度、鎳金屬鹽濃度及選擇適當的電流密度外，亦須控制緩衝鑄液 PH 值變化的硼酸濃度及添加應力消除劑（stress reducer）以降低鎳層內應力。此

外，為增進電鑄液與光阻結構間的親和性，促使電鑄液能進入深窄孔道，濕潤劑的添加亦不可缺少。濕潤劑可降低電鑄液的表面張力，使陰極產生之氫氣與氫氧化物膠體不易附著於鑄層表面，減低鑄層產生針孔及凹洞的機會，故又稱為針孔抑制劑。

電鑄技術的基本分類有金屬電鑄如 Ni、Cu、Au、Ag、Pt 等；合金電鑄 Ni-Fe、Ni-Co、Ni-Mn、Ni-W 等，還有複合電鑄如 Ni-SiC、Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ni-Diamond 等。但其硬度僅約 250Hv，故主要是應用於製造較無耗損問題之塑膠結構成形模仁，或加速度計與過濾網等微結構。若需要製作強韌、耐衝擊與耐磨耗之模具，則必須開發低應力、高硬度（550Hv）、高強度之合金電鑄或複合電鑄技術。一般而言，模仁的標準電鑄材料是鎳（Nickel），因鎳具有高張力強度、良好的機械性質及抗腐蝕的特性。

應用電鑄製程，製作鎳金屬模具的基本原則與步驟，說明如下：

- (1) 製作合適的電鑄原型母模，材料的選用如 Polymer、Silicon、UV 膠等等皆可。
- (2) 原型母模必須先進行表面處理，如清洗、導電等步驟，在放入專門設計與調配好的電鑄液槽中，和直流電源的陰極導通後，陽極的金屬則溶解沈積於陰極的原形母模上。

- (3) 待達到所需的鎳合金厚度，原型母模既可取出離開電鑄液，經過清洗與乾燥步驟，鑄層既可與原型母模剝離。
- (4) 最後進行鑄件檢視與品質測試後，就可以切割成適當的大小製成模仁。

經由母模製程所得到之結構，僅是一個中間產物，它是用來電鑄製造金屬模具，以便利用來模造成型，製造所要的產品。如圖 3.10 所示：



圖 3.10 電鑄成品-鎳板及模仁

電鑄精密模具必須具備之條件：

(1) 表面精度高

鎳電鍍模具的表面精密度上可以達到小於 1 nm 以下的表面精度，一般在開始電鑄鎳模時之電流，會採用較低之電流密度，以獲得較高之表面精密度並可減低母模表面的衝擊，待沈積一定厚度的鎳膜之後，再以階梯式增加電流密度已得到較快的產出。

## (2) 覆蓋性良好（即複製性良好）

對於需要經由翻模的製程，其鍍模設備的覆蓋性是相當重要的一環，有好的覆蓋性才能夠得到一個具有良好的複製性的模具，在電鍍上可以製作深寬（縱橫）比(Asspect Ratio) 大於 10 以上的微結構件。

## (3) 殘留應力低

殘留應力為電鑄微結構模具上重要因子，應力過大會造成微結構模具的變形，造成尺寸上的誤差，如圖 3.11。因此電鑄之殘留應力盡量保持為零應力的理想狀態。影響殘留應力的因子包括電鍍溫度，添加劑、ph 值、電流密度的分布等。一般而言電鑄模具之殘留應力須控制在 $\pm 2\text{Kg/mm}^2$  以下，才能夠作為熱壓模造成形之電鑄模具。



圖 3.11 電鑄鍍板因內應力過大而彎曲

## (1) 高硬度

模具的硬度及剛性是決定此模具壽命的重要因素，硬度越高的材質會有較大的耐磨耗性。一般為得到高硬度的鍍膜通常是加入第二甚至第三元素以提高電鑄模具的硬度，如所謂的鎳鈷電鑄，其硬度約為600HV，大概是鎳膜的三倍到四倍間，但引入其他元素則會造成電鑄上的難度，目前我們僅採用單一元素鎳為電鑄的主要物質。

一般會在模仁表面鍍保護膜以延長模仁壽命，保護膜的選擇需考慮其適用性，包括：

- 
- (1) 高溫安定性，避免在模造氣氛中發生分解現象與氣氛反應。
  - (2) 良好低溫加工性，可加工成特定光學面，降低加工時間與成本。
  - (3) 耐熱衝擊性，以忍受模造過程中的熱循環。
  - (4) 良好的機械強度及硬度，以成形玻璃並避免表面刮傷。
  - (5) 對於玻璃不會有反應發生，避免黏附現象。

選用貴金屬合金的目的即在於貴金屬具有高化學穩定性、耐腐蝕等優點，使用在模造硬模時離模性與衝擊性均佳。

## (四) 模造玻璃（Molding Glass）製程

利用玻璃隨溫度升高粘滯度降低之特性，將玻璃基板置於精密加工成型的模具內，再適當的環境下升溫至玻璃軟化點附近，藉由模仁（insert mold）表面施壓使玻璃變形，轉造模仁形狀，卻後去除壓力、

分模取出成品。產品具有高精密度、可靠性高之優點[13]。

綜合上面所述，連貫下來的整體實驗的製程參數（Recipe）如圖

3.12 所示：

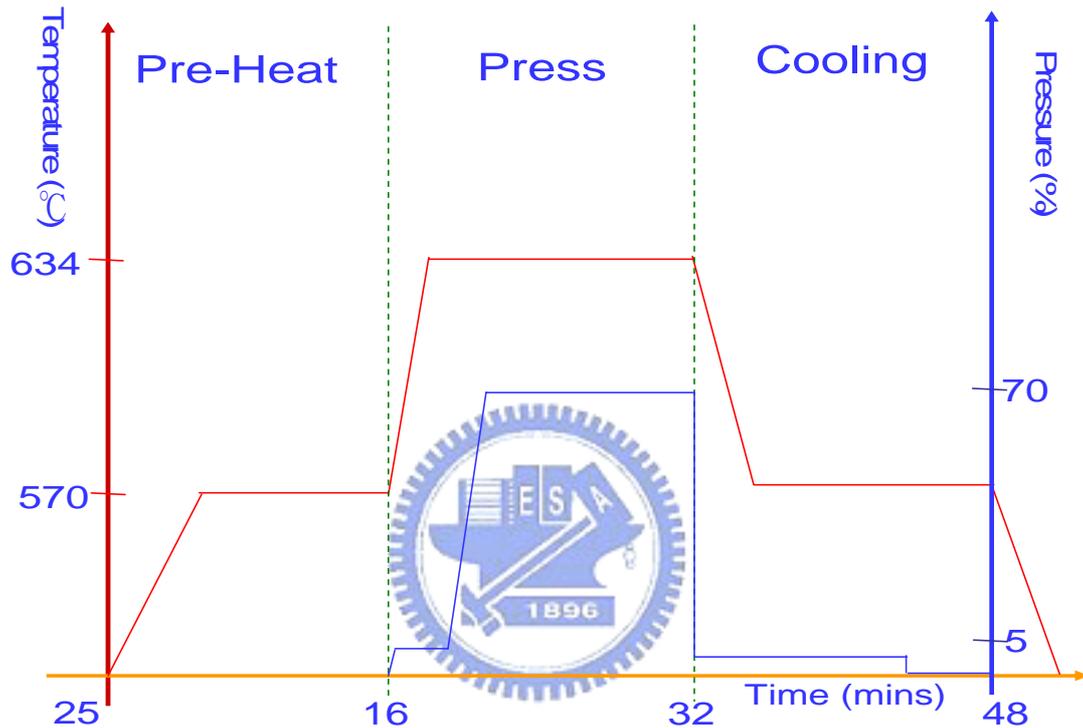


圖 3.12 熱壓模造玻璃製程參數圖

我們以電鑄模來壓印玻璃材料（BK7）。壓印的方法採取平壓式。原理為以兩塊壓印模板來工作，將電鑄好之母模及所欲壓印的玻璃材料，如 BK7，放入兩塊壓印模板之間預熱（Pre-Heat 560°C/16mins），充分預熱之後，壓印時保持固定溫度及壓力下一段時間（634°C/60% 16mins），再至冷卻室（Cooling Chamber），冷卻至 570°C/16mins，

取出脫模後，就完成了熱壓模造複製的工作，此時模仁的圖形就轉印至玻璃上了。

熱壓模造成型製成具有大量量產、精密度高級製成設備簡單的優點，我們嘗試以熱壓模造玻璃進行毫微米級的平面光波導元件( Planar Lightwave Circuit; PLC ) 製造之研究，透過時間、壓力及溫度等製程參數探討熱壓模造玻璃加工與轉印 Profile 之間的關係。

熱壓模造複製的製程參數中 Press Chamber 的溫度和壓力是決定圖形轉印能力的重要參數，以下我們將進行此實驗：

- (1) 固定壓力 (16%) / 改變溫度 (a) 604°C (b) 614°C (c) 624°C ，

如圖 3.13 所示，溫度愈高；Profile 愈佳。

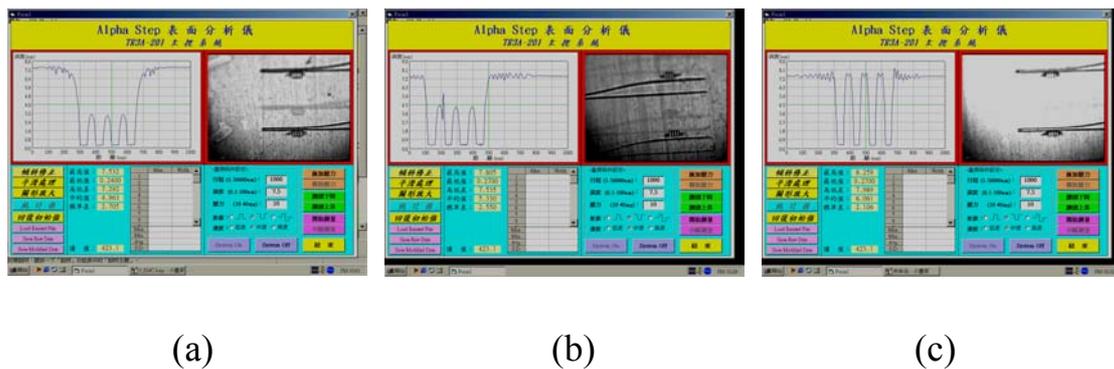


圖 3.13 溫度實驗波導的 Profile Meter 量測圖

【固定壓力(16%)/改變溫度 (a)604°C (b)614°C (c)624°C】

(2) 固定溫度 (624°C) /改變壓力 (a) 16% (b) 43% (c) 75%，如圖 3.14 所示，壓印力愈大；壓印的深度愈深，因此 Profile 也愈佳，但 40%以上就達到此溫度的壓印力極限，既結構上端直角部分圓滑 (rounding) 的現象，無法隨壓印力增大而改善圓弧區域。

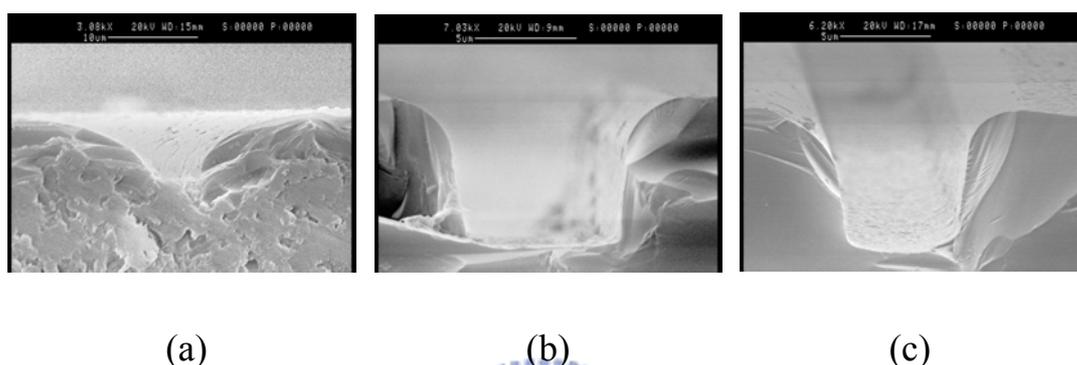


圖 3.14 壓力實驗波導的橫截面圖

【固定溫度(624°C)/改變壓力 (a)16% (b)43% (c)75%】

(3) 根據以上的實驗，再將溫度調高 10°C，固定溫度 (634°C) /改變壓力 (a) 50% (b) 60% (c) 70% (d) 80%，如圖 3.15 所示。

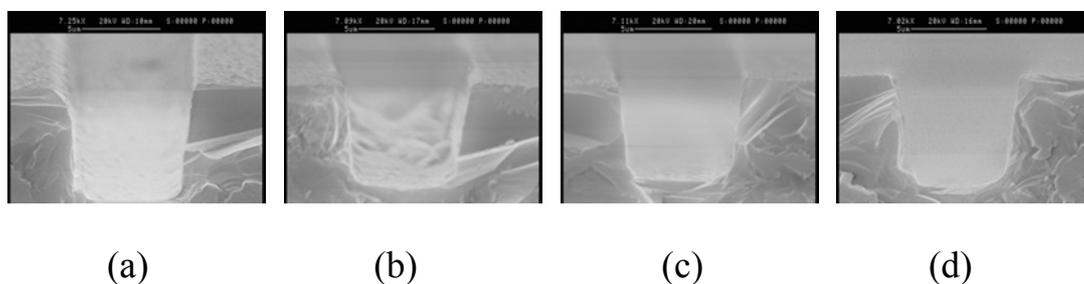


圖 3.15 壓力實驗波導的橫截面圖

【固定溫度(634°C)/改變壓力 (a)50% (b)60% (c)70% (d)80%】

由以上的實驗結果可知，溫度 624°C 時，施加壓印力至 75% 也無法完整複製我們所設計的結構，Corner 有 rounding 現象，且 75% 以上玻璃就有碎劣的情形。將溫度再調高 10°C（634°C）施加壓印力 50% 以上就可以完整複製所設計的母模結構，且壓印力 80% 時，玻璃也無龜裂（crack）現象。

由實驗的結果可知溫度是影響結構是否完全轉印的最主要的控制參數，其次才是壓印力。溫度與壓印力愈大；則模仁的壽命愈短，但由實驗可知溫度必須設定在 634°C 才能完整複製結構，而壓印力則可因溫度提高而降低至 50%，溫度與壓印力是相關聯的參數，無法同時降低。



最後以溫度 634°C、壓力 50% 為我們的條件，如圖 3.16 所示之波導的橫截面 SEM 照片：（切割玻璃造成端面玻璃碎裂，特別是溝槽的部分，填入導光層後再切割應可改善溝槽端面玻璃碎裂的情形）

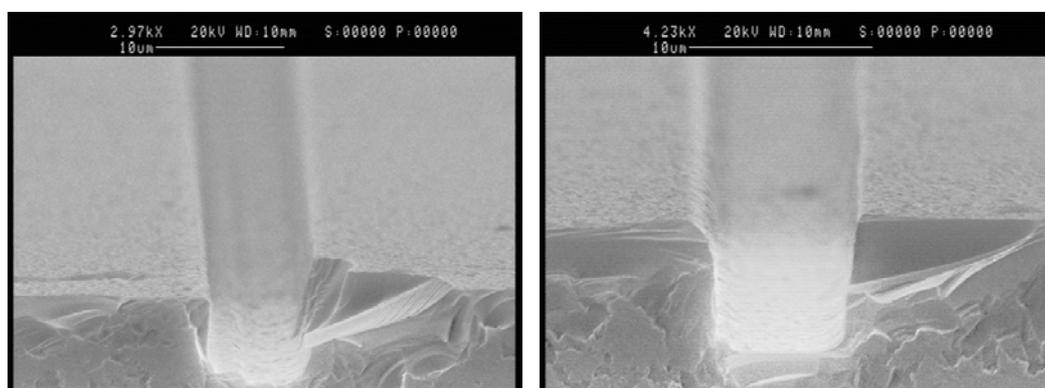


圖 3.16 條件 634°C/50% 下波導的 SEM 橫截面圖

由以上的實驗我們得知熱壓模造玻璃時會影響轉印性的要點：

- (1) 溫度：玻璃的黏滯力隨溫度升高而降低，所以複製效果愈好，
- (2) 壓印力：一般而言，壓印力愈大，圖形轉印的效果愈佳，形狀愈精確。
- (3) 模仁表面的粗糙度：模仁表面的粗糙度決定成品表面的粗糙度，影響成品的精度。
- (4) 模具與材料的熱膨脹係數：當其相差太大時，應讓降溫冷卻時間盡量延長，避免轉印的誤差。下圖 3.17 是我們所設計的圖形從 UV 膠母模→鍍金屬模仁→模造後的玻璃基板，尺寸複製轉印對應表，轉印誤差可控制在  $0.5\mu\text{m}$  以內。

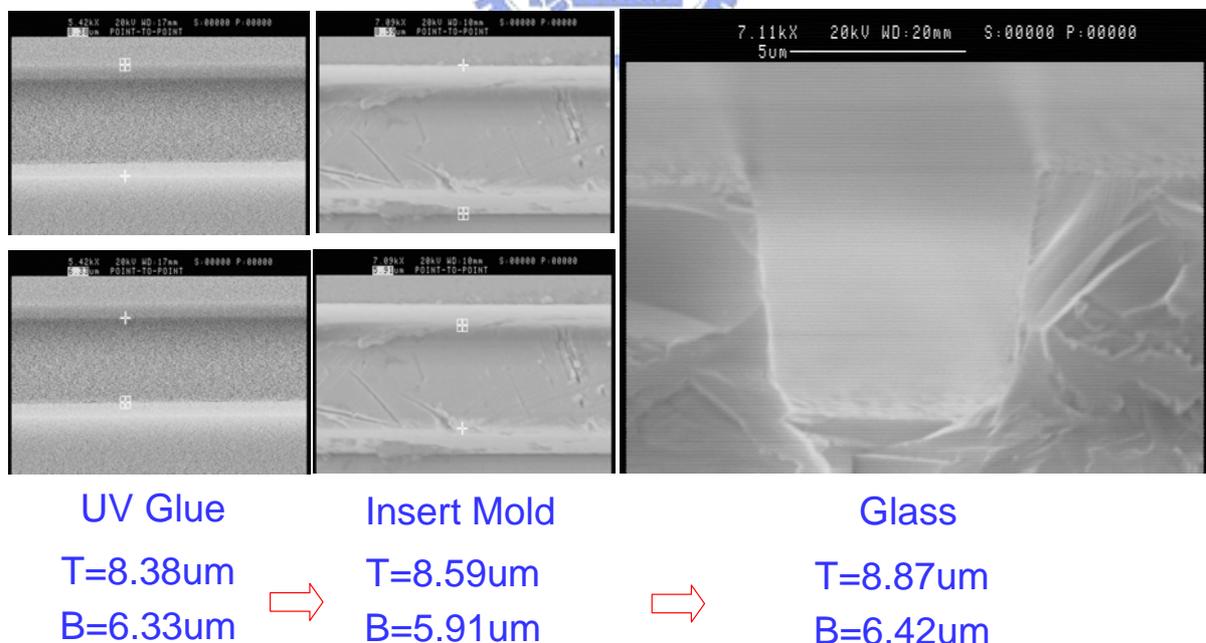


圖 3.17 圖形轉印尺寸關係圖

(5) 時間：特別是回溫的時間長短將會影響玻璃的特性及壓印複製的能力，由於實驗設備每一階段最長只能 16 分鐘，所以本實驗將時間因素排除固定在設備的極限 16 分鐘。



### 3.1.2 第二階段光波導成形 (Waveguide Formation)

此階段為將合適的 Polymer 材料填入凹槽中形成導光的部分。包括：導光層材料塗蓋 (Core Material Coating)、表面研磨 (Surface Polish)、切割 (Dicing)、端面研磨 (End-Surface Polish) 和量測。以下是詳細的製程步驟。

#### (一) 導光層材料塗蓋 (Core Material Coating)

是將我們熱壓模造後的波導，填入適當的 Polymer 材料，當作波導的 Core、玻璃基板為 Cladding，壓印完成的玻璃基板清洗乾淨後，即可將 polymer 以旋轉塗蓋 (Spin Coating) 的方式，填入波導的凹槽中如圖 3.18 所示，詳細說明如下。

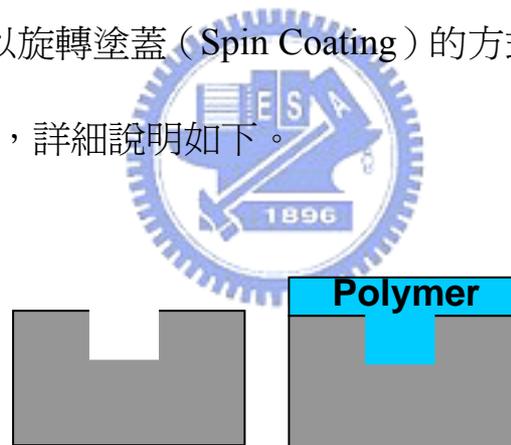


圖 3.18 塗蓋 polymer 示意圖

#### A、旋轉覆蓋 (Spin Coating)

低轉速 (500rpm) 約 5 秒，主要轉速 700rpm 約 30 秒，膜厚約  $5\mu\text{m}$ 。

#### B、固化 (curing)

polymer 塗蓋後需要熱溫固化 (thermal curing) 處理，用來

除去 polymer 材料中的有機溶劑，以增加薄膜的密度使其固化，讓折射率固定。處理的程序是先將製作好的樣品放入烤箱，由室溫慢慢加熱到 170°C，時間約 10 分鐘。固定溫度在 170°C 烘烤，時間約 60 分鐘。

## (二) 表面研磨 (Surface Polish)

使用刨光研磨機，圖 3.19(a)所。利用機械研磨將凹槽外表面多餘的 polymer 去除，如圖 3.19(b)所示。



圖 3.19 (a) 拋光研磨機

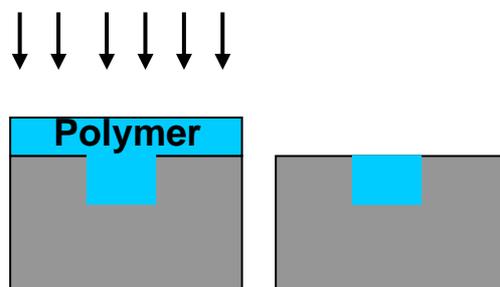


圖 3.19 (b) 研磨凹槽外的 polymer

### (三) 切割 (Dicing)

玻璃基板的切割方面一直是光波導製作上很重要的一個課題，由於光必須由波導的端面導入，所以端面在切割後的平整度非常重要。但是玻璃基板並沒有晶格結構的特性，所以在處理上會增加其困難度。我們處理步驟是先將玻璃黏在 Blue Tape 上，再以晶粒切割機 (Dicing Saw)，如圖 3.19(a)，切割我們所需的晶粒大小及光波導管的長度，如圖 3.20(b)。

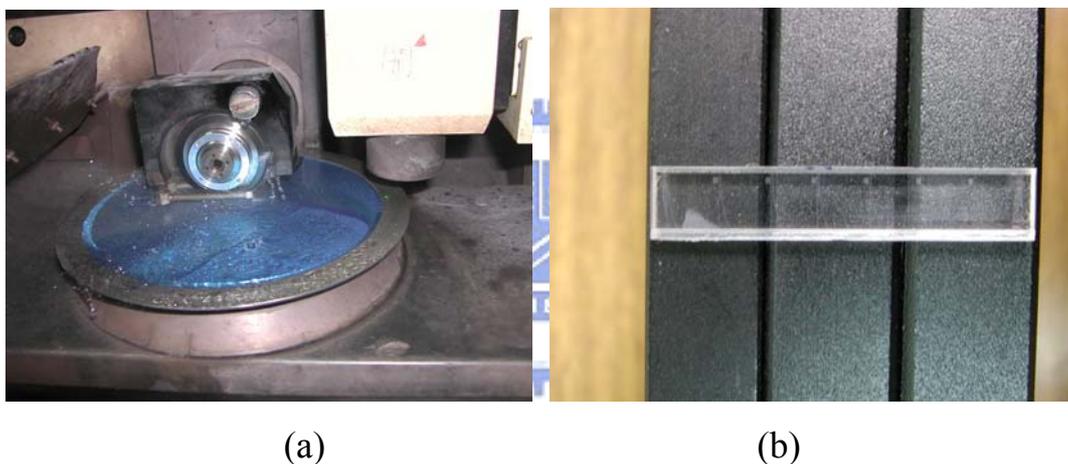


圖 3.20 (a)晶粒切割機 (Dicing Saw) (b)切割後的波導玻璃基板

### (四) 端面研磨 (End Surface Polish)

使用刨光研磨機將我們所切割下來的晶粒之端面拋光，以利後續將光導入的步驟。

以 SEM 觀察完成元件，將切割完成的元件經由濺鍍機在其表面鍍上一層薄薄的金，並以掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀察。圖 3.21 是整個 S-bend 元件的俯視圖，從圖的中間部分，我們可以明顯的看到我

們所製作完成之 S 型彎曲波導的圖形。圖 3.22 是元件的橫截面圖。

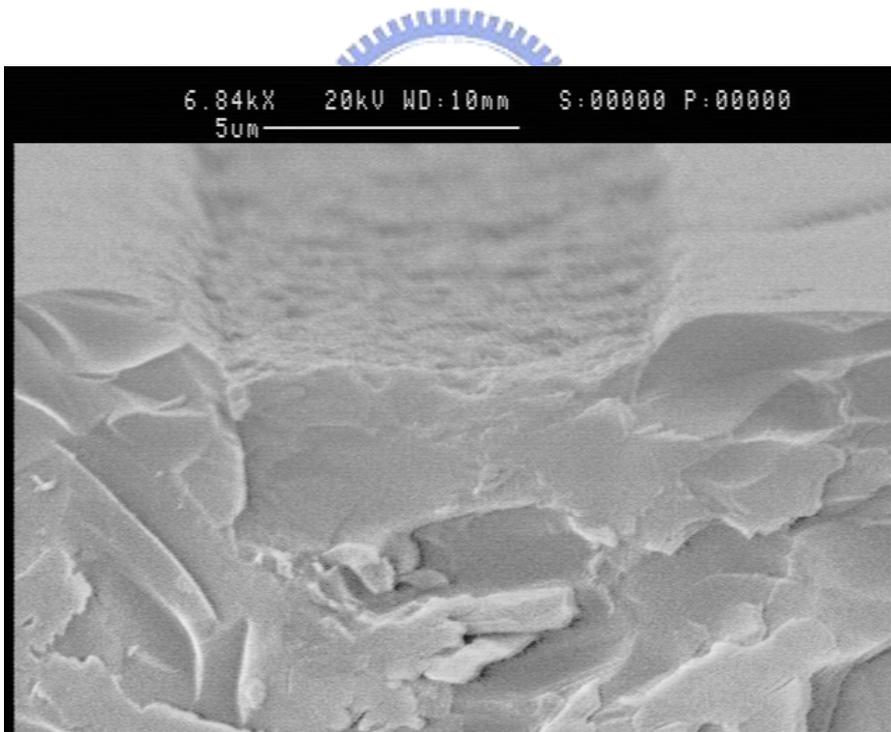
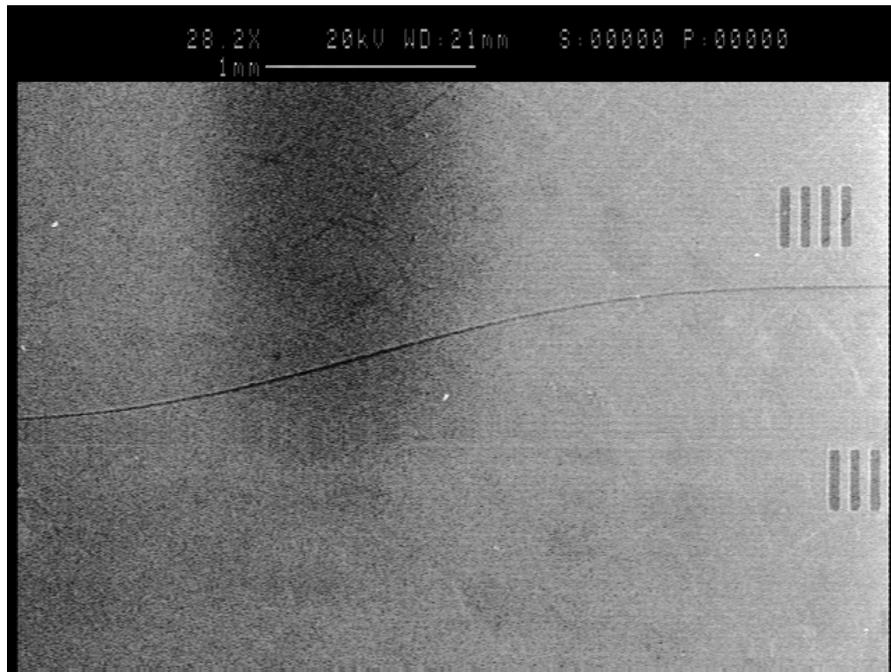


圖 3.21 元件 SEM 俯視圖 圖 3.22 元件橫切面 SEM 圖

## 3.2 製程問題與討論

### (一) 母模製程

母模製程是此模造玻璃製作技術中最重要的一環，整個轉印的精確度完全取決於母模的精度，所以在材料的選擇上必須具有良好的材料特性、對電鑄液及溫度的阻抗性強、容易脫模等等。

### (二) 精密電鑄製程

電鑄時並未加入針孔抑制劑及應力消除劑 (stress reducer)，電鑄後鍍板模仁表面有針孔及內應力過大的情形發生，如圖 3.23 所示。因電鑄系統無電腦監控電鑄液的 PH 值、溫度、比重、還有其他添加劑的濃度及電流密度的調整等等，所以對製程監控有其困難度，所以在電鑄的製程條件還有改善的空間。

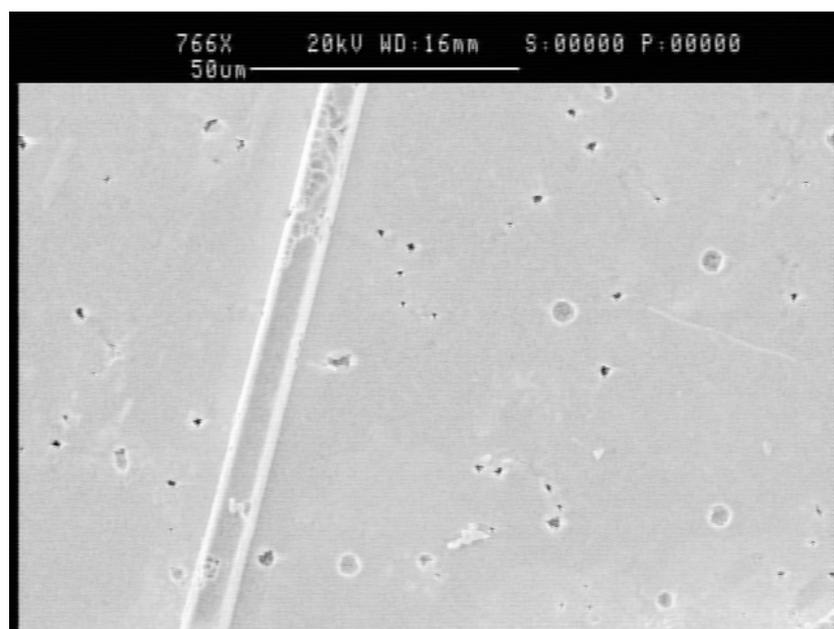
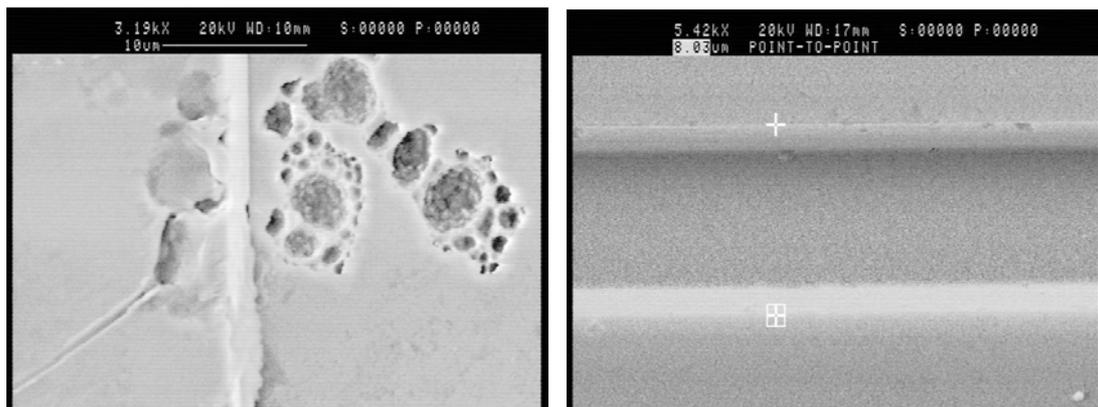


圖 3.23 (a)電鑄後鍍板模仁針孔的情形



(b)

(c)

圖 3.23 (b)電鑄後鎳板模仁針孔的情形 (c)電鑄前 UV 膠母模的情形



(d)

圖 3.23 (d)鎳板因內應力過大而彎曲

### (三) 模造玻璃製程

模仁壓印後會沾黏玻璃必須再表面塗蓋一層硬模（Hard Coating；DLC、CrN、IrReNi）以增加模仁的壽命。下圖 3.24 為模仁未塗蓋一層硬模時，模造壓印 10 次後的照片，玻璃會在壓製過程中不斷粘黏在鎳模仁表面，表面霧狀為玻璃沾黏後的狀況。



圖 3.24 壓印 10 次後模仁表面粘黏玻璃的情形

#### (四) 表面研磨製程

IPG polymer 與玻璃的黏著性 (adhesion) 並不理想，當表面研磨製程時部份材料會因研磨而完全脫落，導致導光層 (Core) 剝落，無法傳輸光線，如下圖 3.25 所示：



圖 3.25 部分材料因研磨而完全脫落

### (五) 端面研磨製程

端面研磨後並未改善其切割面粗糙崩裂的情形，如下圖 3.26

所示：

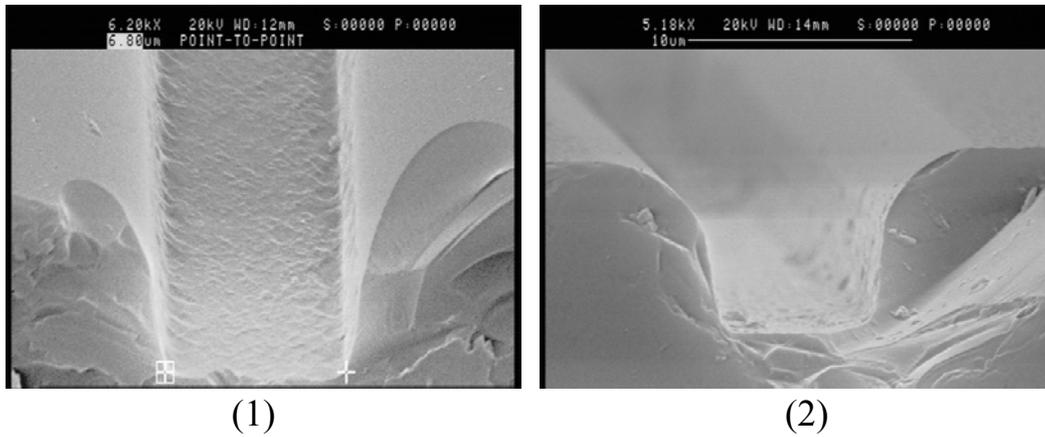


圖 3.26 (1) 研磨前 (2) 研磨後波導端面之 SEM 照片



## 第四章 波導特性量測

波導元件製作完成後，接下來就要進行量測，將光耦合進入波導內，利用手動的方式調整六軸平移台來做對光的動作。在光源的部份我們使用的光源波段是在 1550nm 附近，是屬於不可見光的部分，所以我們在波導的輸出端必須架設 IR 的 CCD 來觀察波導輸出的光場，藉此來判斷光是否有耦合到波導內。在本章的第一節我們將說明我們的量測系統的架設，第二節為量測結果及討論。

### 4.1 量測系統



光纖和波導的耦合一直是波導元件很重要的一個課題，一般比較常見的方法有(1)用物鏡直接聚焦(2)用單模光纖直接對準(3)用光纖透鏡(lens fiber)聚焦對準[28]。在我們的實驗上我們使用 1550nm Laser Diode 作為光源，連接以末端製作成錐形的光纖透鏡(Lens fiber)與光波導耦合，我們在輸入端使用顯微鏡來輔助我們準確地完成 Lens fiber 與波導元件的對光。在輸出端我們架設 IR CCD 來觀察波導輸出的光場形狀，藉此來輔助我們判斷光波是否有耦合到波導內，圖 4.1 為實際量測系統圖。

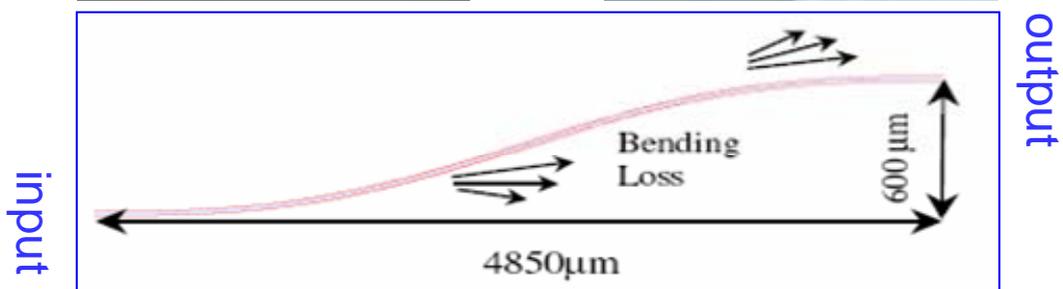
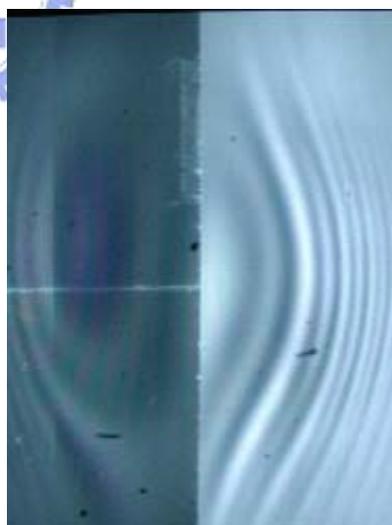
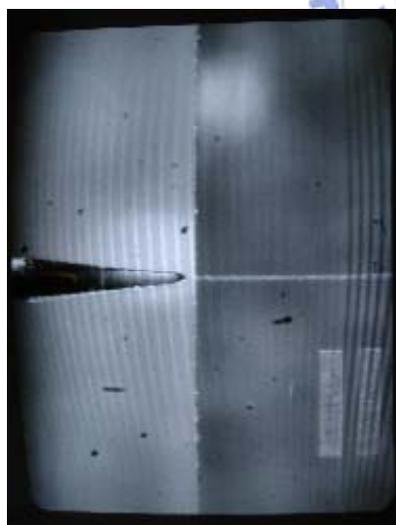
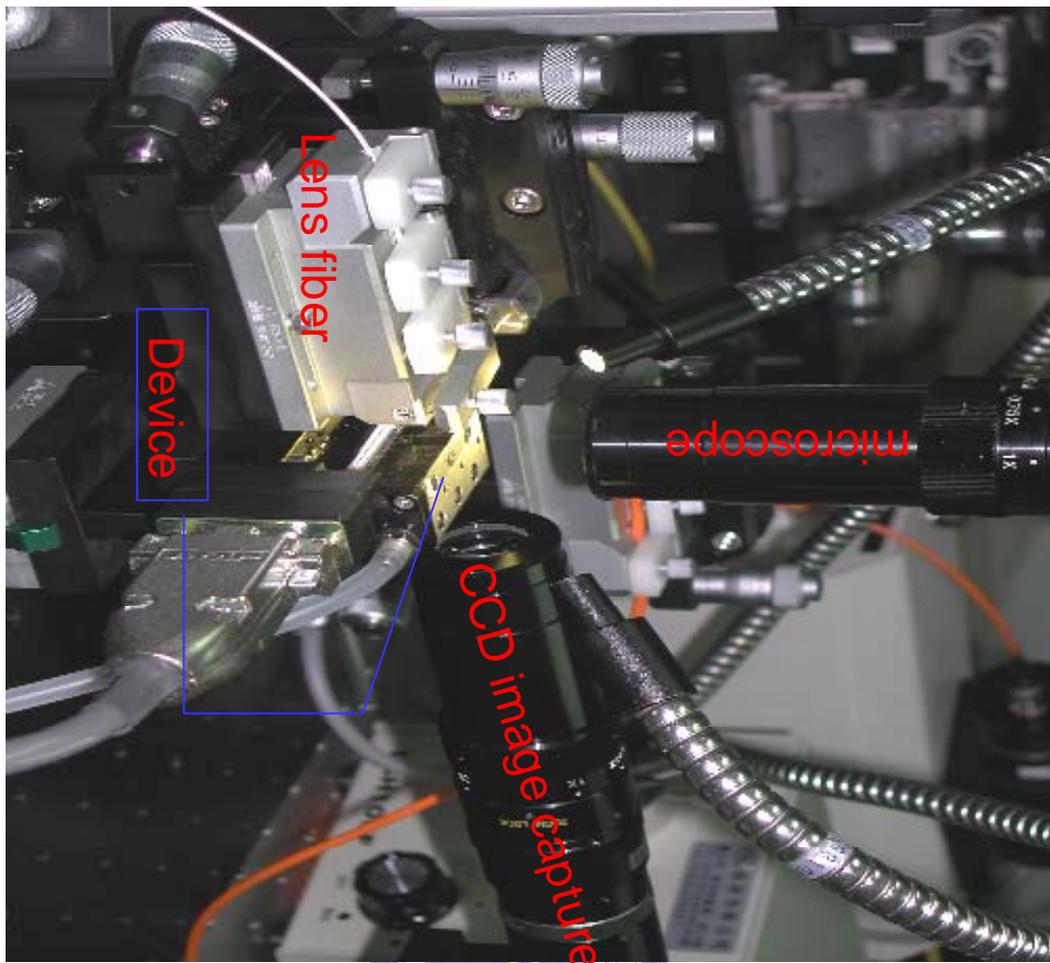


圖 4.1 量測系統圖

## 4.2 量測結果與討論

### (一) 量測

我們利用圖 4.2 的量測架構，在 S-bend 波導的一端打入 1550nm 的雷射光，經 S-bend 波導導光（Guiding）後，由另一端出光，利用 CCD 觀測出光的近場圖像。如下圖 4.3 所示：

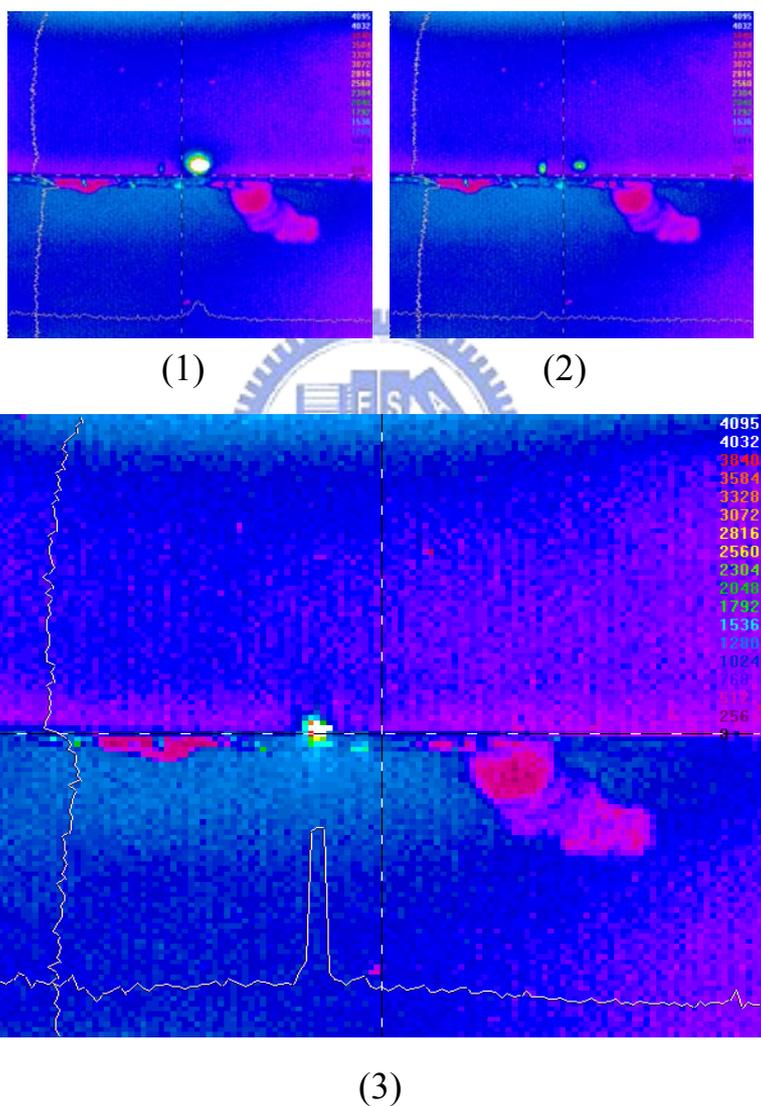


圖 4.2 (1)雷射光未導入波導時的光點 (2)雷射光一部份導入波導後出光 (3)雷射光全部導入波導後出光

## (二) 討論

我們在第一代利用蝕刻石英玻璃基板，已成功驗證我們所設計的高分子平面波導型可調式光衰減器 (Polymer Waveguide VOA) 的功能[9-10]。如下圖 4.3 所示【線條則是根據實驗量得之數據所繪之漸近線】為實驗所得與模擬數據的比較關係圖，雖然我們的波導結構呈現 V 字型的溝槽，與我們所設計的方正結構有所差別，但由此關係圖可知，理論模擬與實際元件測試的趨勢相同且實際的元件特性呈現較線性的走勢 (較小的斜率變化)，因此在元件的溫度控制上將較穩定 (光衰減量隨溫度的波動率較小)，有較佳的元件特性。

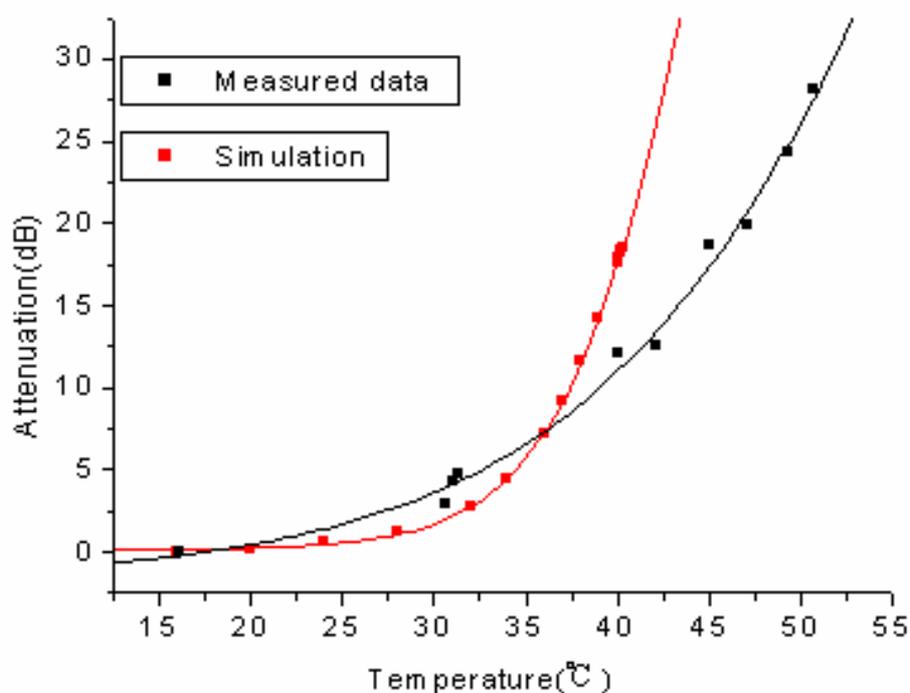


圖 4.3 第一代 VOA 元件在波長 1550nm 時之傳輸損耗與溫度之關係

對可調式光學衰減器而言，工作溫度在 16.1°C 到 50.7°C 的區間，

調變溫度區間只有  $34.6^{\circ}\text{C}$ ，可調變的衰減範圍為  $0\text{dB}\sim 30\text{dB}$ ，約  $-1\text{db}/^{\circ}\text{C}$  足以滿足光通訊之規格要求。從量測的結果印證了我們所設計的可調式光學衰減器的理論是可行的：以波導的彎曲來造成能量衰減，利用具有高 T/O 係數的高分子材料做導光層，藉由改變導光層的溫度來改變導光層的折射率進而來調變衰減值。

圖 4.4 為第一代蝕刻石英玻璃基板 VOA 的截面圖，由於石英玻璃（Crystal Silica）較硬因此較難蝕刻出垂直的結構。

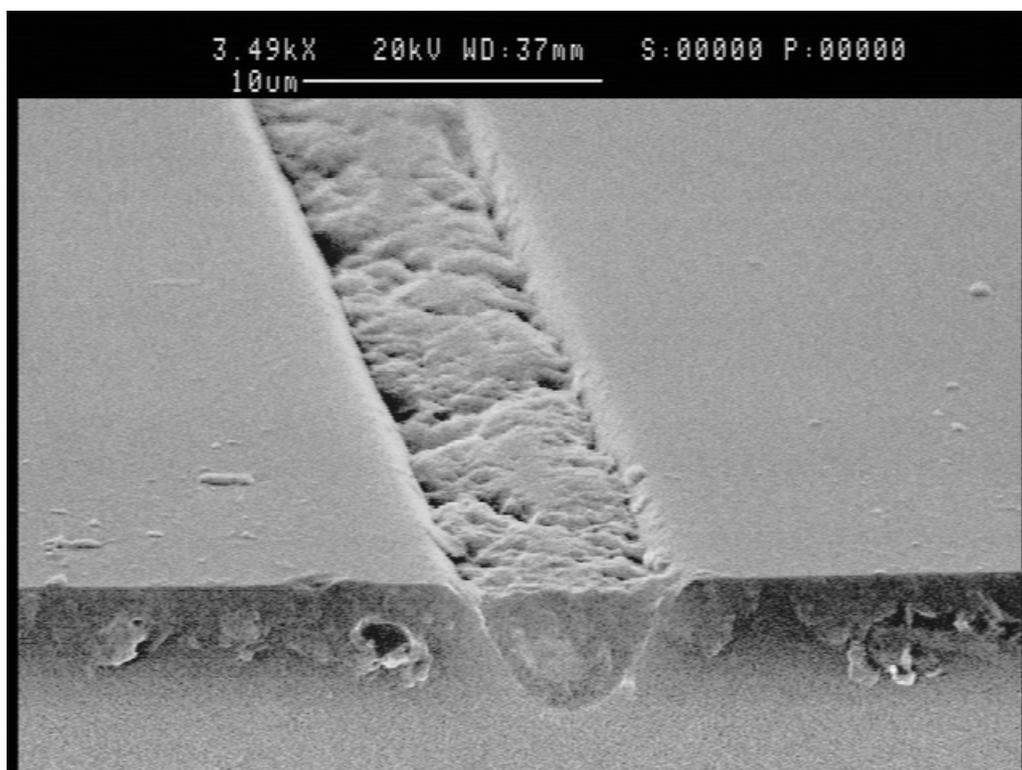


圖 4.4 第一代蝕刻石英玻璃基板 VOA 的截面圖

因此我們發展出第二代以熱壓模造玻璃的技術壓印複製所設計的平面光波導元件。可以製造出垂直的側壁，完整的複製設計的結構，如下圖 4.5 所示。

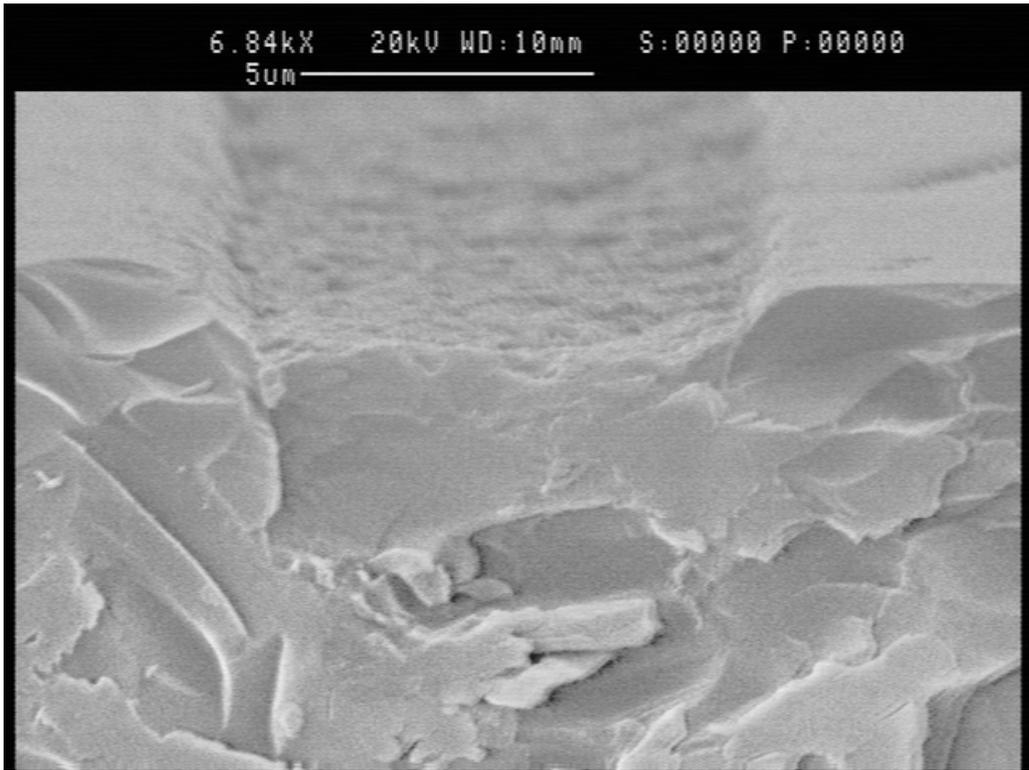


圖 4.5 第二代熱壓模造玻璃 VOA 的截面圖



## 第五章 結論

我們已經成功的利用熱壓模造玻璃的製程技術，製造出平面光波導型的元件。

第一代的 VOA 元件已成功驗證元件的功能[10]，製程技術是利用蝕刻技術蝕刻石英玻璃，由於石英玻璃是結晶的二氧化矽質地較堅硬，因此蝕刻率較低不易蝕刻，想要蝕刻出垂直的結構需利用乾蝕刻側壁保護技術，蝕刻出垂直的溝槽，所以必須在側壁保護及蝕刻的條件取得平衡，否則但容易蝕刻出 V 型溝槽的結構，較難蝕刻出垂直的結構。



第二代 VOA 元件採用相同的設計，採用新的製程技術以熱壓模造玻璃的方式可製作出方正的溝槽，利用控制時間、溫度及壓印力等製程參數，可在玻璃上製作出完全複製母模的結構，因此母模表面的粗糙度、結構尺寸的精密度及形狀就相對的重要，將影響後續電鑄及熱壓模造玻璃的複印製程精確度。從實驗結果可知：熱壓模造玻璃的溫度愈高、壓印力愈大；則複製能力就愈高愈完整，由實驗結果歸納：溫度是最主要的製程參數，溫度 624°C 時，壓印力超過 80% 玻璃就有碎裂的現象發生，且開口直角部分呈圓弧狀無法壓印出直角的圖形；但溫度 634°C 時，壓印力只要 50%，甚至更低的壓印力就可 100% 複

製母模的結構。

但溫度與壓印力愈高，模仁的壽命愈短。未延續模仁的使用壽命，必須再模仁表面塗蓋一層硬模（Hard Coating）或採用鎳鈷、鎳鎢合金電鑄模仁以增加模仁的硬度及耐高溫。由於我們所採用的設備是一般模造玻璃透鏡的機台，有機器先天上的極限，若能採用單一 Chamber 將能得到較佳的實驗條件的控制，如升降溫的速度及壓印力。

在本論文中 IPG Corp.所調配的高分子聚合物材料，它具備折射率趨近 BK7 玻璃基板，而且具有很高的 T/O 係數，在我們所研究的可調式光學衰減器是為關鍵的部分，但材料與玻璃的附著性較差，當進行表面研磨時會整個被剝離開玻璃基板，無法形成導光層，所以我們利用折射係數為 1.61 的 Polymer 填充入溝槽中形成我們的導光區，因折射係數與玻璃基板相差較大（ $\Delta n=0.1$ ），與設計的參數相差甚大，光訊號在 S-bend 區衰減會較小，且溫度可變衰減部份也不明顯，必須加到好幾百度才有明顯的效果，如此會超過高分子材料的玻璃移轉溫度( $T_g=250^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ )使得材料變質失去導光的功能。

若能取得適當的高分子材料，利用熱壓模造玻璃製程技術就可製作出性能穩定的高分子波導型可調式光學衰減器元件。此外元件的設計非常適合與其他平面光波導光通訊元件整合成各式光通訊應用模

組，再利用熱壓模造玻璃的製造技術大量複製量產。



## 參考資料

- [1] W. Bernhard, R. Muller-Fiedler, T. Pertsch, and C. Wachter, "Crosstalk reduction in switching networks by asymmetrical off-on switches," *Proc. SPIE*, vol. 3620, no. 1, pp. 24–32, 1999.
- [2] M. Lenzi, S. Tebaldini, D. D. Mola, S. Brunazzi, and L. Cibinetto, "Power control in the photonic domain based on integrated arrays of optical variable attenuators in glass-on-silicon technology," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 5, pp. 1289–1297, Sept.–Oct. 1999.
- [3] K. Hibayashi, M. Wada, C. Amano, "Liquid crystal variable optical attenuators integrated on planar lightwave circuits," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, No. 6, pp.609-611, 2001.
- [4] W. Noell, P. A. Clerc, L. Dellmann, B. Guldemann, H. P. Herzig, O. Manzardo, C. R. Marxer, K. J. Weible, R. Dandliker, N. Rooij, "Applications of SOI-based optical MEMS," *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, vol. 8, No. 1, pp. 148-154, 2002.
- [5] S. S. Lee, Y. S. Jin, Y. S. Son, T. K. Yoo, "Polymeric tunable optical attenuator with an optical monitoring tap for WDM transmission network," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, No. 5, pp.590-592, 1999.
- [6] S. S. Lee, Y. S. Jin, Y. S. Son, "Variable optical attenuator based on a cutoff modulator with tapered waveguide in polymers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 17, No. 12, pp.2556-2561, 1999.
- [7] L. Eldada, L.W. Shacklette, "Advances in polymer integrated optics," *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, vol. 6, pp. 54-68, 2000.
- [8] R. Blomquist, L. Eldada, M. McFarland, C. Poga, and L. Shacklette, "Fluorinated acrylates in making low-loss, low-birefringence, and

single-mode optical waveguides with exceptional thermo-optic properties,” Proc. SPIE, vol. 3799, no. 7, pp. 266–279, 1999.

- [9] Ying-Tsung Lu; Huang-Chen Guo; Hseng-Tsong Wang; Sien Chi; Lasers and Electro-Optics, 2003.”Polymer-based waveguide voa suitable for ultra broadband network” CLEO/Pacific Rim 2003. The 5th Pacific Rim Conference on , Volume: 2 , 15-19 Dec. 2003
- [10] 王勝聰, “可調式高分子光波導光學衰減器之設計與製作” 國立交通大學光電所碩士論文, 2002
- [11] 莊達仁 “VLSI製造技術” 高立圖書有限公司
- [12] 楊啓榮 “微機電製程之精密電鑄技術” 國立中山大學機械工程研究所
- [13] 王興邦 “玻璃微熱壓之成形特性研究” 國立交通大學機械工程研究所,2003
- [14] K. O. , “Fundamentals of Optical Waveguides”.
- [15] E. A. J. Marcatili, “Bends in optical dielectric guides,” Bell Syst. Tech. J., vol. 48, pp. 2103-2132, Sept. 1969.
- [16] D. Marcuse, “Radiation losses of tapered dielectric slab wave-guides,” Bell Syst. Tech. J., vol. 49, pp. 273-290, 1970.
- [17] D. Marcuse, “Bending losses of the asymmetric slab waveguide,” B.S.T.J., Vol. 50, pp. 2551-2563, 1971.
- [18] A. W. Snyder, I. White, and D. J. Mitchell, ”Radiation from bent

- optical waveguides,” *Electron. Lett.*, vol. 11, pp. 332-333, 1975.
- [19] D. Marcuse, “Curvature loss formula for optical fibers, ” *J. Opt. SOC. Amer.*, vol. 66, pp. 216-220, 1976.
- [20] I. A. White, “Radiation from bends in optical waveguides: The volume current method, ” *Microwaves, Opt. Acoustics*, vol. 3, pp. 186-188, 1979.
- [21] E. G. Neumann, “Curved dielectric optical waveguides with reduced transition losses, ” *Proceeding of IEE Journal*, vol. 129, no. 5 , pp. 278-280, 1982.
- [22] R. Baets and P. E. Lagasse, “Loss calculation and design of arbitrarily curved integrated-optic waveguides, ” *Journal of Optical Society of America*, vol. 73, no. 2, pp. 177-182, 1983.
- [23] J. Saijonmaa and D. Yevick, “Beam propagation analysis of loss in bent optical waveguides and fibers,” *Journal of Optical Society of America*, vol. 73, no. 12, pp. 1785-1791, 1983.
- [24] G. J. Veldhuis, F. N. Krommendijk, and P. V. Lambeck, “Integrated optic intensity modulator based on a bent channel waveguide,” *Opt. Commun.*, vol. 168, pp. 481-491, Sept. 1999.
- [25] S. M. Garner, S. Caracci, “Variable optical attenuation for large-scale integration,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, No. 11, pp. 1560-1562, 2002.
- [26] E. S. Kang, T. H. Lee, and B. S. Bae, “Measurement of the thermo-optic coefficients in sol-gel derived inorganic–organic hybrid material films,” *Applied Physics Lett.*, vol. 81, no. 8, August 2002.
- [27] Hong Ma, Alex K.-Y Jen and Larry R. Dalton “Polymer-Based Optical Waveguide: Materials, Processing, and Devices” *Adv. Mater.* 2002, 14, No.19, October 2

- [28] 楊政霖, “高分子光波導與光柵的製作與研究,” 國立交通大學光電所碩士論文, 2002.

