

國立交通大學

電子工程學系電子研究所碩士班

碩士論文

以塑膠基板製作金屬網狀濾波器
於兆赫波段下之研究



**Studies of metal mesh filter device on polymer
substrate in Terahertz Frequencies**

研究生：張廷誠

指導教授：顏順通 教授

中華民國一〇〇年十一月

以塑膠基板製作金屬網狀濾波器
於兆赫波段下之研究

**Studies of metal mesh filter device on polymer
substrate in Terahertz Frequencies**

研究生:張廷誠

Student : Ting-Cheng Chang

指導教授:顏順通博士

Advisor : Dr. Shun-Tung Yen



A Thesis

Submitted to Department of Electronics Engineering & Institute of Electronics

College of Electrical Engineering and Computer Engineering

National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electronics Engineering

November 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇〇年十一月

以塑膠基板製作金屬網狀濾波器 於兆赫波段下之研究

學生：張廷誠

指導教授：顏順通 博士

國立交通大學

電子工程學系電子研究所 碩士班



在本論文中，我們使用 PET 塑膠薄膜作為基板，利用簡單的半導體製程製作出薄金屬網狀濾波器，並藉由傅立葉轉換紅外線頻譜分析儀來量測元件的穿透頻譜。我們試著解釋在不同波段下，塑膠薄膜對元件濾波效果的影響。另一方面，我們同樣利用 PET 塑膠薄膜作為基板，結合微機電製程中的準分子雷射加工技術來製作獨立型的厚金屬網狀濾波器。實驗數據與理論計算，在定性上可獲得一致的結果。

Studies of metal mesh filter device on polymer substrate in Terahertz Frequencies

student : Ting-Cheng Chang

Advisor : Dr. Shun-Tung Yen

Department of Electronics Engineering & Institute of Electronics

National Chiao Tung University



We have fabricated terahertz thin metal mesh filter device on polymer substrate using simple semiconductor fabrication techniques. The transmission spectra of the thin metal mesh filter was measured using Fourier Transform Infrared Spectroscopy. We try to explain the influence of polymer substrate property on metal mesh filter in the terahertz frequency range. We also fabricated freestanding metal mesh filter using excimer laser techniques. The experimental data were in qualitative agreement with theoretical model.

誌謝

兩年多來的碩士生涯轉眼間要劃下句點了，在這段求學過程中，首要感謝的就是我的指導教授顏順通博士。謝謝老師在研究上的細心指導，老師對於研究的熱忱以及嚴謹的態度也是我們學習的目標。老師總是叮嚀我們將來不論是做研究或者是出社會工作，都必須誠實與負責，真的很謝謝老師。

接著要感謝我敬愛的佩鋼學長，學長豐富的學識以及實驗經驗，讓我受益良多。學長總是犧牲自己研究的時間陪我作量測，甚至還得費心幫我解決一堆研究上的問題，如果沒有學長的幫忙，我的論文研究不可能這麼順利，也希望學長的研究能夠早日完成，順利畢業。也要感謝德賢學長、冠成學長、泓文學長以及維倫學長，謝謝學長們平時的照顧與研究上的幫忙。當然還有我的同屆伙伴佳帆、庭宇和芳如，祝福佳帆的軍旅生涯以及芳如在日本的工作都能夠一切順利，也希望庭宇的研究能夠早日完成，開開心心的去歐洲玩。另外也祝福學弟們都能夠順利如期畢業。還要謝謝瑋婷，因為有你的陪伴讓最後這一年苦悶的生活多了許多色彩。

最後我要感謝我的家人，從小到大給了我這麼好的環境，讓我能夠無憂無慮地專心在課業上，謝謝你們不求回報的愛與付出，我愛你們。

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	v
表目錄.....	vii
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究背景.....	2
1-3 研究動機.....	4
第二章 元件參數與製程方法.....	6
2-1 元件結構參數定義.....	6
2-2 薄金屬網狀濾波器製作流程.....	7
2-3 厚金屬網狀濾波器製作流程.....	15
第三章 量測架設與原理.....	22
3-1 傅立葉轉換紅外線頻譜分析儀.....	22
第四章 以 PET 薄膜製作薄金屬網狀濾波器 之實驗結果與討論.....	26
4-1 PET 塑膠薄膜介紹.....	26
4-2 不同厚度的 PET 基板特性比較.....	27
4-3 固定 PET 基板厚度改變結構週期.....	31
4-4 在不同厚度的 PET 基板上作相同的薄金屬網狀結構.....	36
4-5 串聯兩相同薄金屬網狀濾波器.....	37
第五章 厚金屬網狀濾波器之實驗結果與討論.....	40
第六章 結論.....	48
參考文獻.....	50
簡歷.....	52

圖目錄

圖 1.1	電磁波頻譜	1
圖 1.2	結合電感性和電容性的濾波器，形成十字架金屬網狀濾波	2
圖 1.3	freestanding metal mesh	3
圖 1.4	矽基板與 3.5um PET 塑膠薄膜在兆赫波波段下的穿透率	5
圖 2.1	薄金屬網狀濾波器結構參數示意圖	6
圖 2.2	厚金屬網狀濾波器結構參數示意圖	6
圖 2.3 (a)	鋁環正面俯視圖	7
圖 2.3 (b)	鋁環側視圖	8
圖 2.4	利用螺絲將塑膠基板表面繃緊	8
圖 2.5 (a)	轉盤正面與鋁環背面結構圖	10
圖 2.5 (b)	以螺絲將轉盤與鋁環固定	10
圖 2.6 (a)	薄金屬網狀濾波器在光學顯微鏡下的拍攝結果	13
圖 2.6 (b)	拍攝結果放大圖，銀色為鋁金屬的部分，黑色的部分是基板	13
圖 2.7 (a)	拋光過的基板作完微影製程後的拍攝圖，黑色為光阻，銀色為鋁	14
圖 2.7 (b)	未拋光過的基板作完微影製程後的拍攝圖，黑色為光阻，銀色為鋁	14
圖 2.8	PS-2000 型 KrF 準分子雷射光路示意圖	17
圖 2.9	PS-2000 型 KrF 準分子雷射加工系統	17
圖 2.10 (a)	基板完成雷射加工後，正面的拍攝結果	18
圖 2.10 (b)	基板完成雷射加工後，正面的拍攝結果放大圖	18
圖 2.10 (c)	基板完成雷射加工後，背面的拍攝結果	19
圖 2.10 (d)	基板完成雷射加工後，背面的拍攝結果放大圖	19
圖 2.11 (a)	在基板正面鍍上 3000Å 的鋁，白色為鋁的部分	20
圖 2.11 (b)	在基板背面鍍上 1000Å 的鋁	21
圖 3.1	Bruker IFS 66v/S	23
圖 3.2	麥克森干涉儀示意圖	23
圖 3.3	量測穿透頻譜的光路架設圖	24
圖 3.4	量測反射頻譜的光路架設圖	25
圖 4.1	PET 結構式	26
圖 4.2 (a)	PET 塑膠基板穿透頻譜	28
圖 4.2 (b)	PET 塑膠基板反射頻譜	29
圖 4.2 (c)	PET 塑膠基板反射頻譜	29
圖 4.2 (d)	PET 塑膠基板吸收頻譜	30
圖 4.3	固定透光面積，改變結構週期的穿透頻譜圖	31
圖 4.4	基板厚度為無窮厚的薄金屬網狀濾波器示意圖	34

圖 4.5 (a) 電場在基板內衰減的模擬圖。	34
週期 $g=24\text{ }\mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=18\text{ }\mu\text{m}$	34
圖 4.5 (b) 電場在基板內衰減的模擬圖。	35
週期 $g=48\text{ }\mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=36\text{ }\mu\text{m}$	35
圖 4.5 (c) 電場在基板內衰減的模擬圖。	35
週期 $g=192\text{ }\mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=144\text{ }\mu\text{m}$	35
圖 4.6 在不同厚度的 PET 基板表面鋪上相同的金屬網結構	36
圖 4.7 薄金屬網狀濾波器示意圖	37
圖 4.8 光穿透兩個相同的濾波器元件示意圖	38
圖 4.9 (a) 光穿透過元件的頻譜圖	38
(週期 $g=24\text{ }\mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=18\text{ }\mu\text{m}$)	38
圖 4.9 (b) 光穿透過元件的頻譜圖週期	39
(週期 $g=48\text{ }\mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=36\text{ }\mu\text{m}$)	39
圖 5.1 S1 的穿透頻譜模擬圖	42
圖 5.2 S1 量測到的穿透頻譜圖	42
圖 5.3 S2 的穿透頻譜模擬圖	43
圖 5.4 為 S2 的穿透頻譜量測圖	44
圖 5.5 S1 & S2 量測到的穿透頻譜與 50 μm PET 的穿透頻譜對照圖	45
圖 5.6 (a) 基板正面加工後的拍攝結果	45
圖 5.6 (b) 基板正面加工後的放大拍攝結果	46
圖 5.6 (c) 基板背面加工後的拍攝結果	46
圖 5.7 (a) S1 基板鑽孔後剖面圖	47
圖 5.7 (b) S2 基板鑽孔後剖面圖	47

表目錄

表 5.1 正方形孔洞結構之週期 (g) 與邊長 (L) 的尺寸對照表.....	41
表 5.2 S1 dip 在模擬與實驗上的偏移.....	43
表 5.3 S2 dip 在模擬與實驗上的偏移.....	44



第一章 緒論

1-1 前言

兆赫波波段頻率範圍介於 0.1 THz ~ 10 THz，其波長範圍落在可見光與微波之間，如圖 1.1 所示。此波段範圍的電磁波十分特殊，擁有以下特性和應用：(1)兆赫波可以像微波一樣穿透許多可見光無法透射的物質，並對金屬物質有高反射率，此特性能應用於機場安檢偵測危險物品。(2)許多分子的轉動能階都落在此波段，不同頻率的兆赫波能引起不同分子的震動，在加上兆赫波本身為低能量的輻射，所以可應用在對生物細胞、癌細胞以及各類的生物分子非破壞性檢測。(3)兆赫波的高頻特性亦能滿足未來通訊所需要的大量傳輸需求。

以上種種的應用皆須建立在良好的兆赫波輻射源、偵測器、被動光學元件以及量測技術上。其中，被動元件包含了濾波器、偏振片、分光鏡等。本研究將分別針對薄金屬網狀濾波器以及厚金屬網狀濾波器作討論，透過製程與量測結果分析，期望能對日後兆赫波波段被動元件的應用有所幫助。

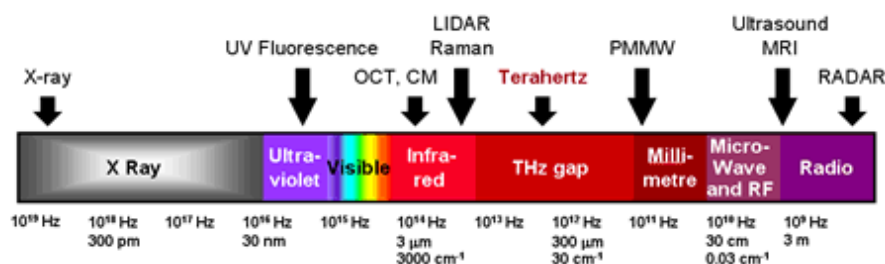


圖 1.1 電磁波頻譜

資料來源：http://www.htconsultants.com/html/terahertz_home.htm

1-2 研究背景

Ulrich 是最早對金屬網結構的穿透特性做出解釋的人。在 1967 年，他提出兩種結構的金屬網，並利用傳輸線理論去解釋其穿透行為。第一種為正方形金屬孔洞陣列，他將此種金屬網視為電感性濾波器；第二種為其互補的正方形金屬陣列，此種金屬網他視為電容性濾波器。最後，將電感性和電容性的濾波器互相結合，進一步發展出十字架結構的金屬網狀濾波器，如圖 1.2 所示。也因為十字架結構的金屬網狀濾波器其濾波效果良好，因此此結構逐漸成為了研究上的主流。〔1〕

〔2〕〔3〕〔4〕〔5〕〔6〕〔7〕1896

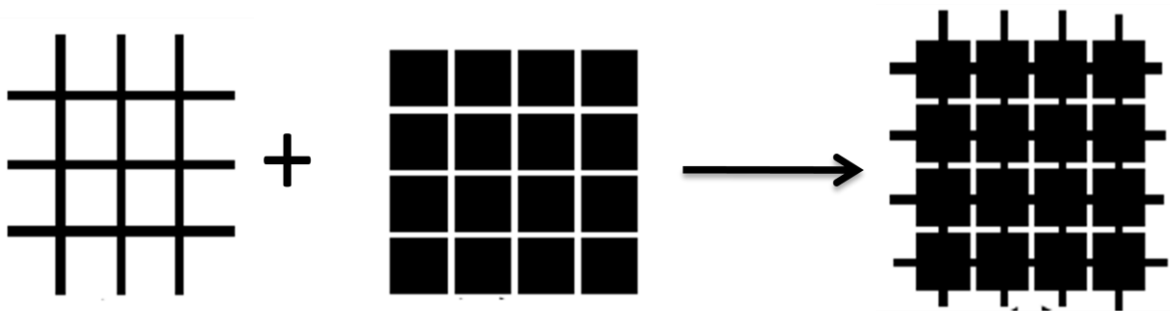


圖 1.2 結合電感性和電容性的濾波器，形成十字架金屬網狀濾波〔3〕

對於週期性金屬網狀濾波器的研究主要分為兩種：

(1) 厚金屬網：此元件結構的金屬網並無附著在基板上，即金屬網

兩面接觸皆為空氣，因此稱為獨立型的金屬網（freestanding metal mesh），如圖1.3 所示。雖然可以藉由控制金屬厚度讓元件達到良好的濾波效果，但是整個製作過程包含了厚膜光阻製程、電鑄技術以及後續的脫膜處理，十分繁雜。〔7〕〔8〕〔9〕〔10〕〔11〕。

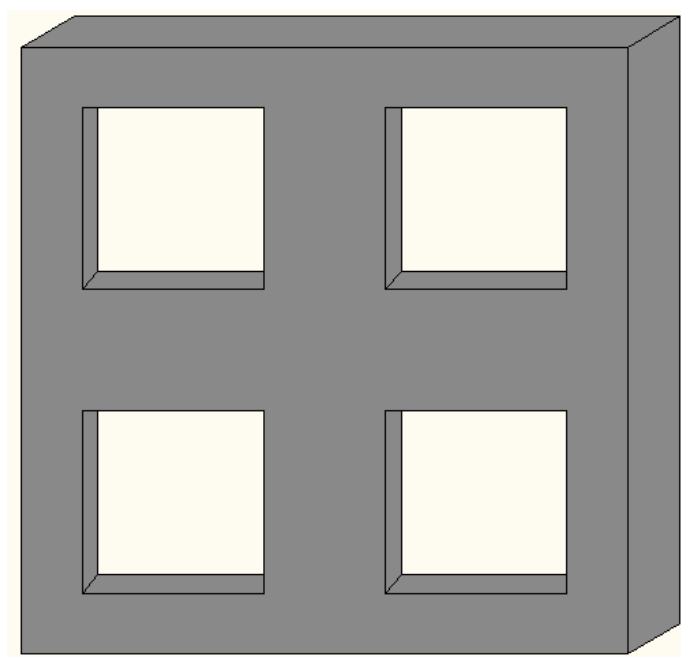


圖 1.3 freestanding metal mesh

(2) 薄金屬網：此元件的結構是在基板表面鋪上金屬網，其製程方法較為容易，只需要簡單的微影製程以及蝕刻即可完成。但是因為元件是依靠基板來支撐，所以光通過金屬網後會受到基板本身穿透率的影響，造成光強度減弱，因此其濾波效果將受限於基板本身的光學特性。而且其 stop-band 的穿透率，相較於厚金屬網狀濾波器還要來得高。

1-3 研究動機

本實驗室近年來在薄金屬網狀濾波器方面的研究已有豐富的成果，我們以矽晶圓作為基板，藉由改變孔洞形狀來比較其濾波效果。例如圓形、正方形、十字架、雪花狀等，最後證明雪花狀的薄金屬網狀結構其穿透率可以達到接近 1 的效果 [12]。但是以上的分析都是已經扣除掉矽基板的穿透特性，也就是說只討論基板表面薄金屬網的濾波行為。因為矽基板在兆赫波波段下穿透率並不高（如圖 1.4 所示），元件整體的濾波效果受限於基板的穿透率。因此在本碩論中，我們選用在兆赫波波段下，具有高穿透率的塑膠薄膜來做為薄金屬網狀濾波器的基板，討論其濾波效果。

另外，我們嘗試結合微機電製程中的準分子雷射技術來製作厚金屬網狀濾波器。首先，針對我們所設計的圖形對塑膠基板做鑽孔加工，接著再利用電子槍蒸鍍法在基板兩面和孔洞側壁鍍上金屬，使得整個基板都能被金屬包覆住，讓元件等效成厚金屬元件。此方法可大幅簡化傳統製作厚金屬元件複雜的製程步驟。

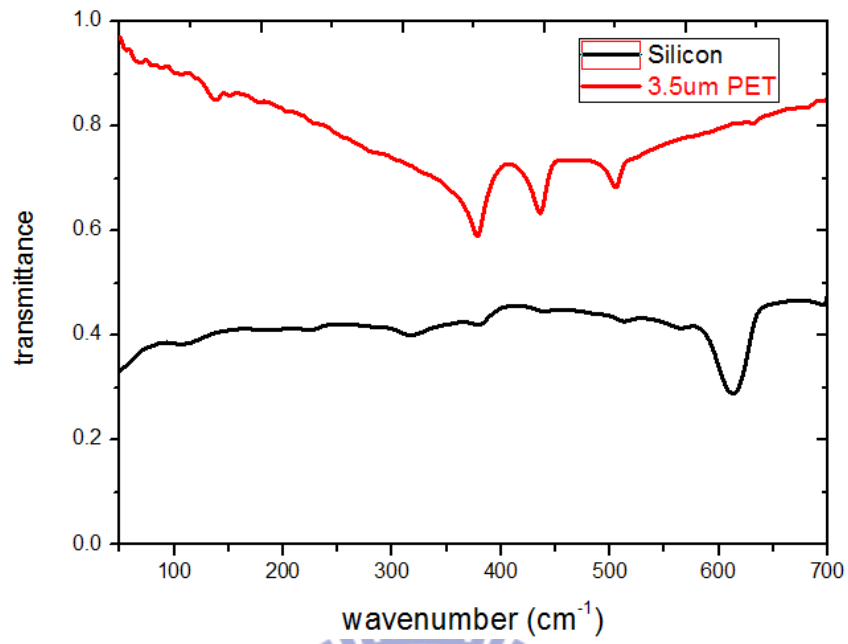


圖 1.4 矽基板與 3.5um PET 塑膠薄膜在兆赫波波段下的穿透率



第二章 元件參數與製程方法

2-1 元件結構參數定義

薄金屬網狀濾波器的結構參數如圖 2.1 所示， D 為圓洞的直徑，結構的週期為 g 。厚金屬網狀濾波器的結構參數如圖 2.2 所示， L 為正方形孔洞的邊長，結構的週期為 g 。

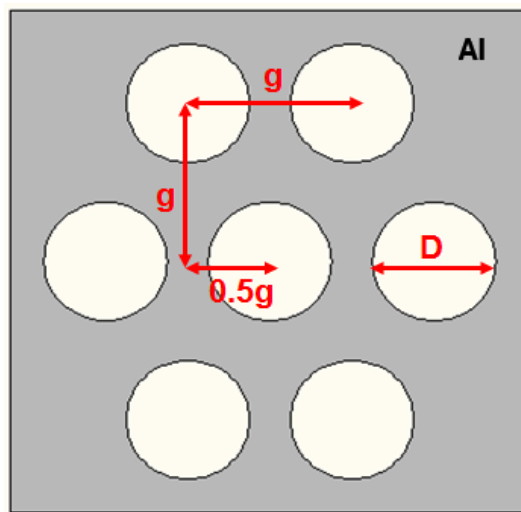


圖 2.1 薄金屬網狀濾波器結構參數示意圖

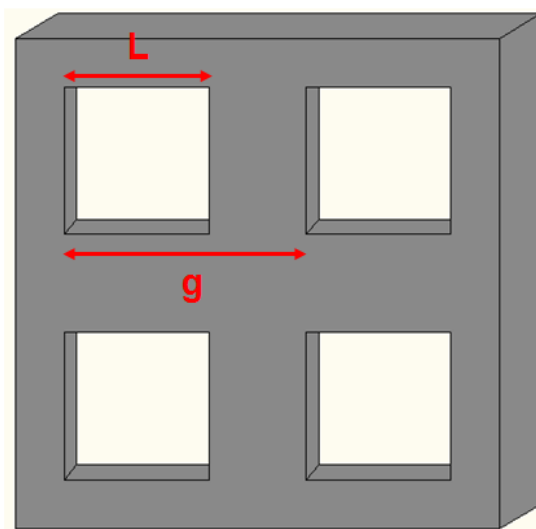


圖 2.2 厚金屬網狀濾波器結構參數示意圖

2-2 薄金屬網狀濾波器製作流程

我們以塑膠薄膜作為元件基板，並在基板上進行金屬的沉積與蝕刻。詳細製程步驟如下：

1. 塑膠基板表面平整

因為塑膠基板材質柔軟而且容易扭曲變形，為了確保後續製程品質，我們自行設計鋁環，如圖 2.3 所示，並利用螺絲將基板表面繃緊，如圖 2.4 所示。



圖 2.3 (a) 鋁環正面俯視圖



圖 2.3 (b) 鋁環側視圖



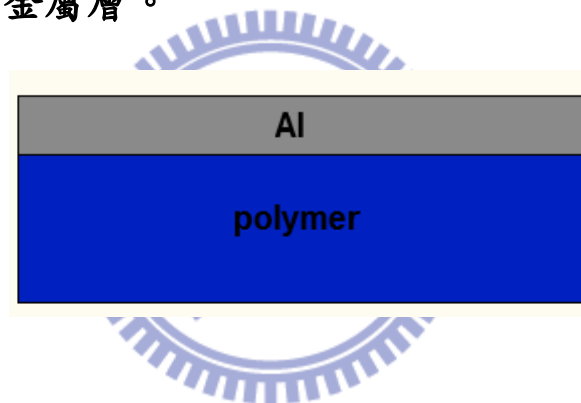
圖 2.4 利用螺絲將塑膠基板表面繃緊

2. 塑膠基板表面清潔

此步驟相當重要，一旦基板表面還殘留著油漬或其他污染物，將影響下一階段金屬薄膜沉積的品質。清潔過程如下：

- (a) 將塑膠基板浸泡於丙酮內，並以超音波震盪器震盪約 40 秒。
- (b) 取出塑膠基板後，將基板浸泡於異丙醇中約 30 秒。
- (c) 以氮氣槍吹乾。

3. 以電子槍蒸鍍的方式，在塑膠基板上沉積一層厚度約 1000\AA 的鋁金屬層。



4. 微影製程

在進行微影製程之前，因為黃光室內的晶片吸盤只適用於 wafer，所以我們設計一個能夠以螺絲固定住鋁環的轉盤，使繃在鋁環上的塑膠基板能夠利用旋轉塗佈的方式上光阻，如圖 2.5 所示。

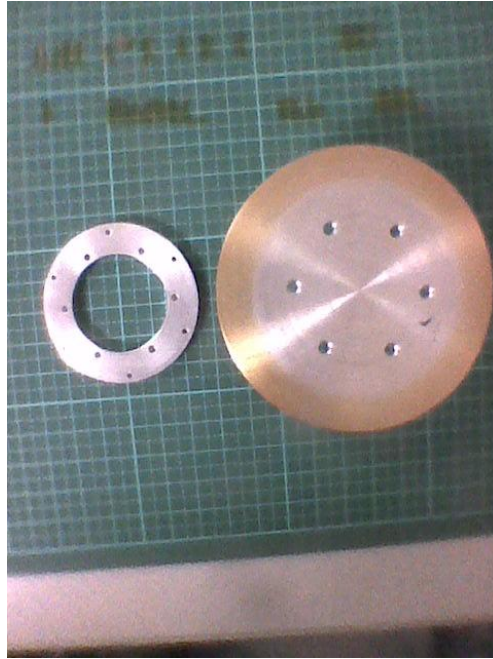


圖 2.5 (a) 轉盤正面與鋁環背面結構圖

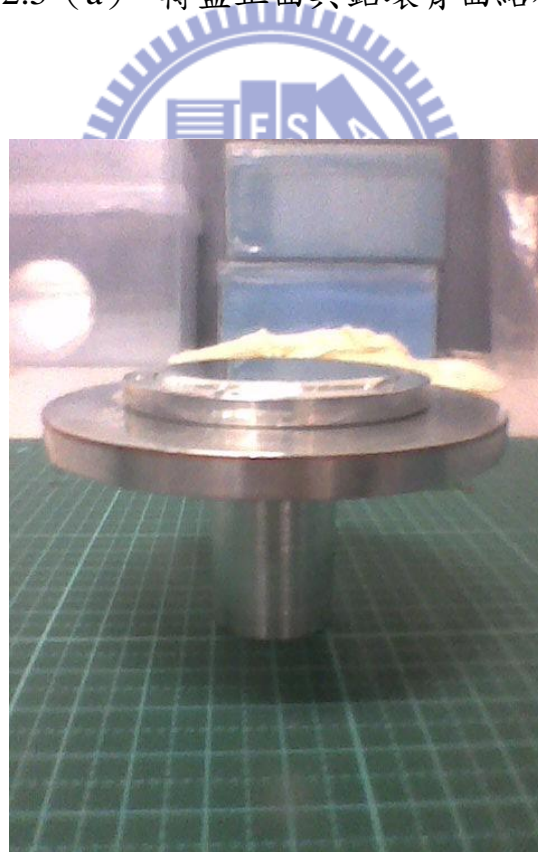
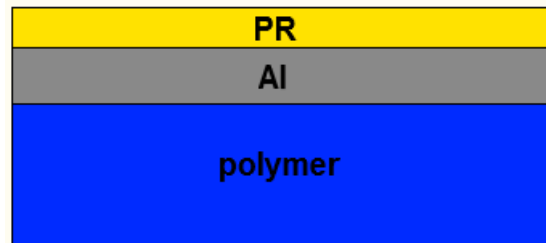


圖 2.5 (b) 以螺絲將轉盤與鋁環固定

微影製程步驟如下：

(a) 光阻塗佈：利用旋轉塗佈的方式，將光阻均勻的塗佈在基板上。

使用的光阻為 FH6400 ，轉速設定為 6000 rpm ，時間為 60 秒。

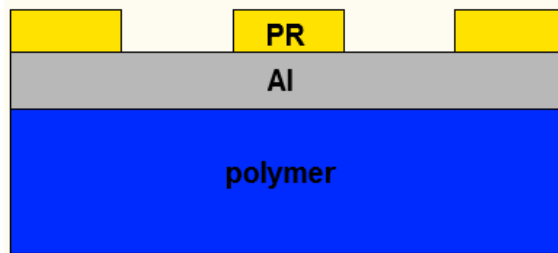


(b) 軟烤：將完成光阻塗佈的基板放入烤箱內，溫度設定 90°C ，時間為 90 秒。此過程是為了烤去光阻大部份溶劑，增加和基板附著力。

(c) 曝光：將所設計的圖案從光罩轉移到光阻上，曝光時間為 15 秒。

(d) 顯影：顯影劑為 FHD5 ，顯影時間 1 分鐘。

(e) 定影：以去離子水為定影劑，時間為 5 分鐘。



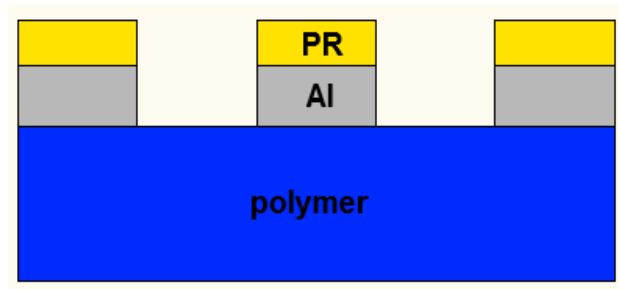
(f) 硬烤：將基板放入烤箱內，溫度設定 120°C ，時間為 150 秒。此過程是為了把光阻中樹脂成分烤硬，以利於後續蝕刻處理。

5. 鋁蝕刻

利用鋁酸來蝕刻金屬鋁，蝕刻前必須先把鋁酸加熱至約 40°C 。鋁

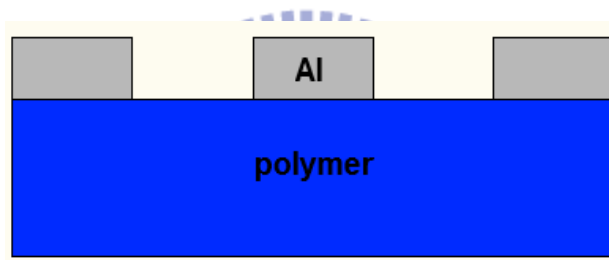
酸的調配比例為 $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{H}_2\text{O} = 50 : 2 : 10 : 9$ ，

蝕刻時間約 25 秒。



6. 去光阻

把元件浸泡於丙酮內，並以超音波震盪器震盪約 25 秒。最後將元件以去離子水清洗 5 分鐘，並以氮氣槍吹乾，元件即完成。



元件完成後，我們使用光學顯微鏡來檢視結果，並且量測元件實際的線寬，圖 2.6 為元件在光學顯微鏡下所拍攝的照片。

這邊要注意的是，用來作為基板的塑膠薄膜其表面必須先經過拋光處理。若基板表面粗糙度的問題沒解決，後續蒸鍍上去的金屬表面會不平坦，導致製程失敗。拋光過的基板與未拋光的基板作完微影製程後的比較圖如圖 2.7 所示，可以發現未拋光過的基板其表面的 roughness 明顯大了許多，導致鋁在塑膠基板表面上出現了大大小小的裂痕。因此後續在鋁蝕刻的過程中，鋁酸會沿著這些裂縫流進了光阻底下，使得原本應該受光阻保護的鋁全被蝕刻掉了。所以，如果基

板表面沒有經過拋光處理，在製作上會有問題。

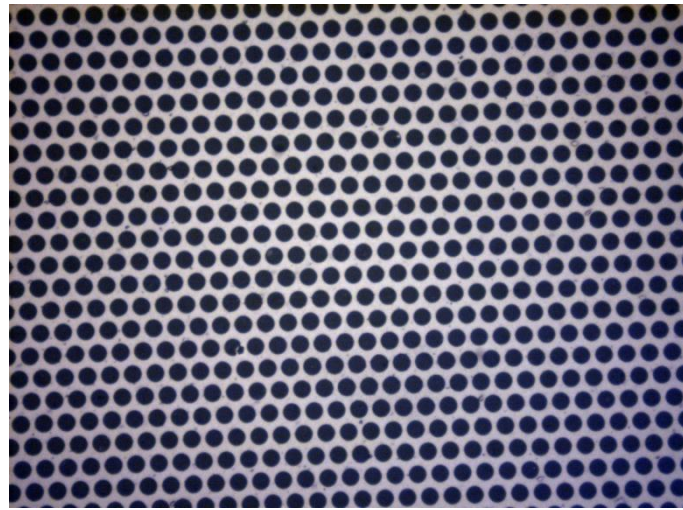


圖 2.6 (a) 薄金屬網狀濾波器在光學顯微鏡下的拍攝結果



圖 2.6 (b) 拍攝結果放大圖，銀色為鋁金屬的部分，黑色的部分是

基板

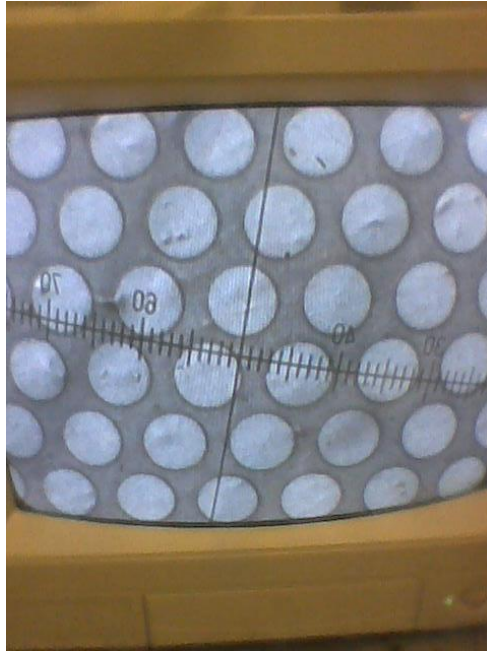


圖 2.7 (a) 拋光過的基板作完微影製程後的拍攝圖

黑色為光阻，銀色為鋁

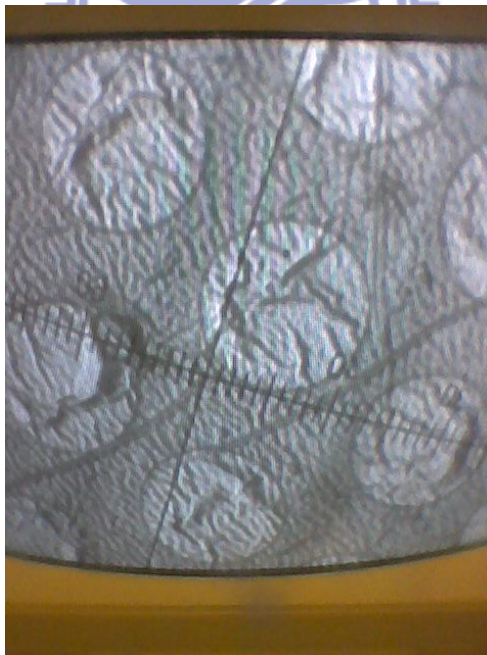


圖 2.7 (b) 未拋光過的基板作完微影製程後的拍攝圖

黑色為光阻，銀色為鋁

2-3 厚金屬網狀濾波器製作流程

我們利用微機電製程中的準分子雷射加工法來製作厚金屬網狀濾波器，以下簡單介紹準分子雷射的原理與加工機制：

準分子雷射原理

準分子雷射 (Excimer Laser) 的名稱是由 “excited” + “dimer” 兩個字而來的，意即兩個受激發的離子結合成準分子狀態，當不穩定的分子解離後釋放出的能量便是雷射光，屬於脈衝式氣體雷射。通常是以一個化學性質較活潑的鹵素原子與一個惰性氣體原子所構成的雙原子氣體分子，作為激發出雷射的介質，並將其填入雷射共振腔中，以電壓激振。當能量到達一定的程度後，雷射光便會由光諧振腔中激發射出，此雷射光再經由光學系統將其引導至元件表面進行微細加工。由於準分子雷射的光子能量大於高分子材料原子間的鍵結能量，使得雷射光照射在加工材料上時，便可以直接打斷高分子材料內部的分子鍵結，達到加工的目的。[13][14]

厚金屬網狀濾波器製作流程如下：

1. 準分子雷射加工

我們以厚度 50 μm 的 PET 塑膠膜作為基板，並且利用鋁環將基板表面繃緊。我們設計正方形陣列下，正方形孔洞的石英光罩，當雷射光經過光罩投影至基板上時，會使得基板表面被雷射光照射到的部分被挖空，因此我們所設計的圖案會從光罩轉移到基板上。值得注意的是，雷射光在到達光罩放置區時，為一個約 10mm x 10mm 的均勻分布雷射光。而雷射光通過光罩之後，再經由一個 10 倍的聚焦鏡提高能量密度，因此光罩上的圖案投影到基板上之後，尺寸會變為原來的 1/10。所以我們為了打出面積為 10mm x 10mm 的週期性孔洞結構，必須將基板固定在移動平台上，藉由移動 X、Y、Z 三軸，打出我們想要的圖案，光路圖如圖 2.8 所示。[11]

此雷射鑽孔的部分是委託國立成功大學機械工程系準分子雷射共同實驗室做準分子雷射加工，其機台型號為 PS - 2000 型之 KrF Excimer Laser (248nm)，如圖 2.9 所示。雷射鑽孔後的基板如圖 2.10 所示。

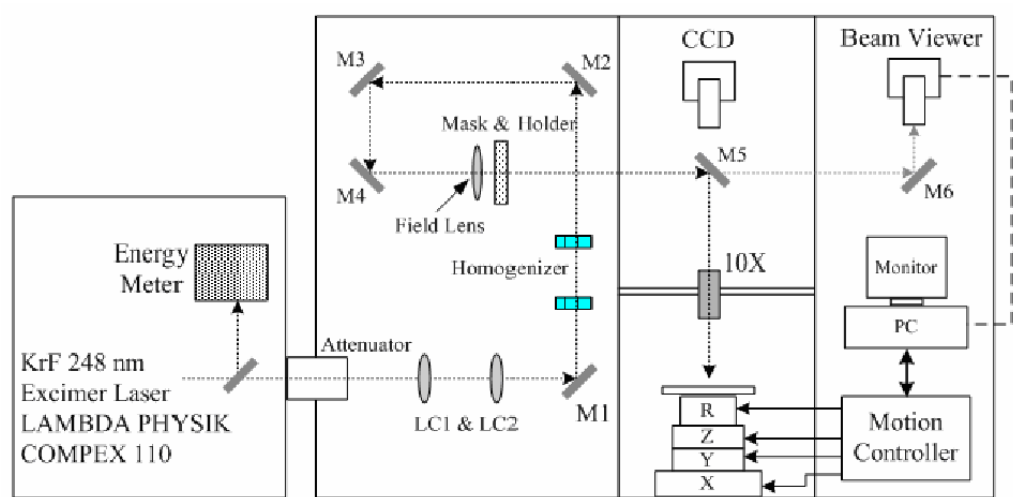


圖 2.8 PS-2000 型 KrF 準分子雷射光路示意圖 [15]



圖 2.9 PS-2000 型 KrF 準分子雷射加工系統

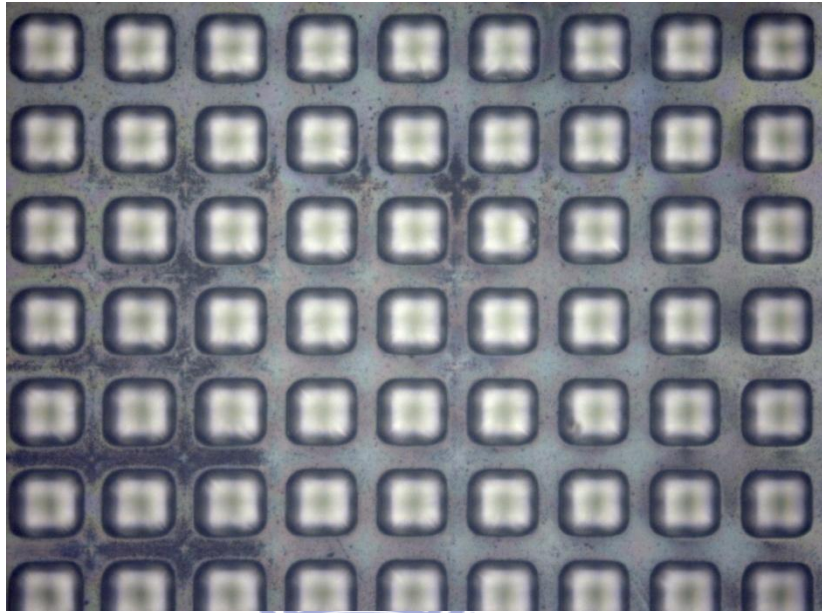


圖 2.10 (a) 基板完成雷射加工後，正面的拍攝結果



圖 2.10(b) 基板完成雷射加工後，正面的拍攝結果放大圖

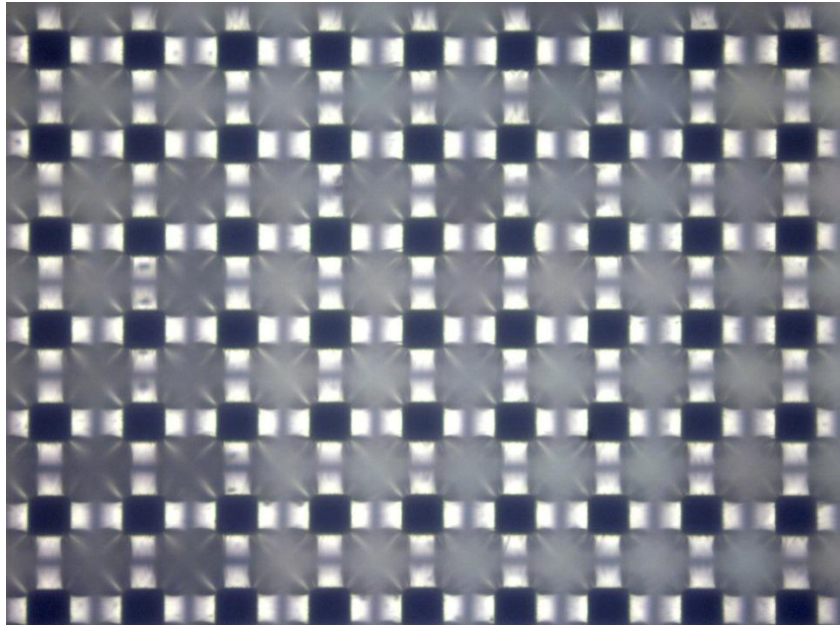


圖 2.10 (c) 基板完成雷射加工後，背面的拍攝結果

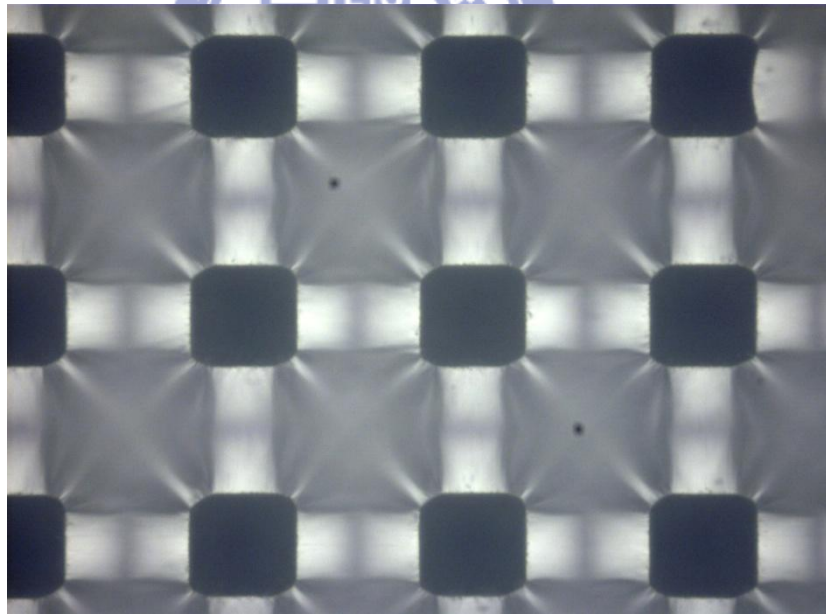


圖 2.10 (d) 基板完成雷射加工後，背面的拍攝結果放大圖

2. 塑膠基板表面清潔

經過雷射加工後的塑膠基板，其表面會有碳堆積的產生。為了不影響接下來金屬薄膜沉積的品質，必須將基板表面加以清潔。清潔步驟如下：

(a) 將經過雷射加工後的塑膠基板浸泡於酒精內，並以棉花棒在表面來回擦拭。

(b) 以氮氣槍吹乾。

3. 以電子槍蒸鍍的方式，分別在塑膠基板兩面以及孔洞側壁沉積鋁金屬層，使元件等效於厚金屬網狀濾波器，成品如圖

2.11。

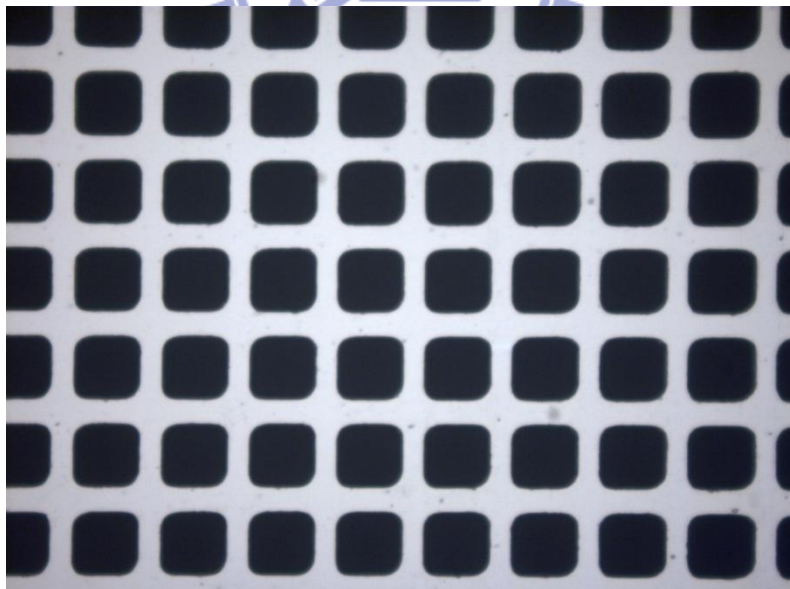


圖 2.11 (a) 在基板正面鍍上 3000\AA 的鋁，白色為鋁的部分

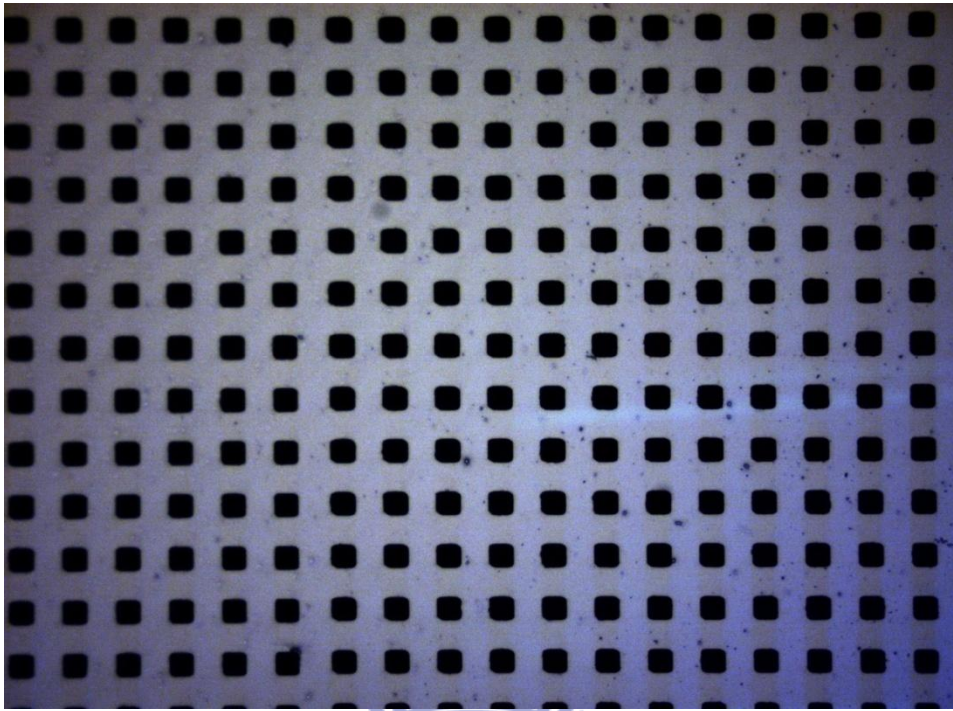


圖 2.11 (b) 在基板背面鍍上 1000\AA 的鋁



第三章 量測架設與原理

3-1 傅立葉轉換紅外線頻譜分析儀

元件完成後，我們利用本實驗室的傅立葉轉換紅外線頻譜分析儀（Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR）來量測元件的穿透頻譜，儀器型號為“Bruker IFS 66v/S”，如圖 3.1。

FTIR 量測的基本原理為麥克森(Michelson)干涉儀，如圖 3.2。S 為訊號光源，當光源由 S 出發後，會先經過分光鏡。分光鏡只允許一半的光穿透，另一半的光則會被反射。光被反射的部分會傳播到固定不能動的反射鏡 M₁ 上，並且產生全反射，再一次的回到分光鏡上，此時光所走的路程為 2L。而光穿透的部分則是傳播到可移動的反射鏡 M₂ 上，同樣地，會在 M₂ 產生全反射回到分光鏡上。但不同的是，這道光所走的路程為 2(L+X)。所以當兩道光在分光鏡交會的時候會產生 2X 的光程差，並且互相干涉，最後再聚焦在偵測器上獲得干涉圖。

但是干涉圖並不利於我們分析，所以必須透過傅立葉轉換將干涉圖轉換為頻譜響應圖，其中轉換的關係式如下 [12]：

$$S(k \cdot \Delta\nu) = \sum_{n=0}^{N-1} I(n\Delta x) \exp(i2\pi nk / N)$$

上式中， $I(n\Delta x)$ 為偵測器所量測到的干涉訊號， $S(k\cdot\Delta\nu)$ 為經過傅立葉轉換之後的頻譜資料， $\Delta\nu$ 為頻譜的解析度， N 為量測取樣的點數。其中 $\Delta\nu$ 與 N 的關係如下：

$$\Delta\nu = 1/(N \cdot \Delta x)$$

若想要提高解析度，取樣的點數就必須增加，量測的時間就必須要拉長。



圖 3.1 Bruker IFS 66v/S

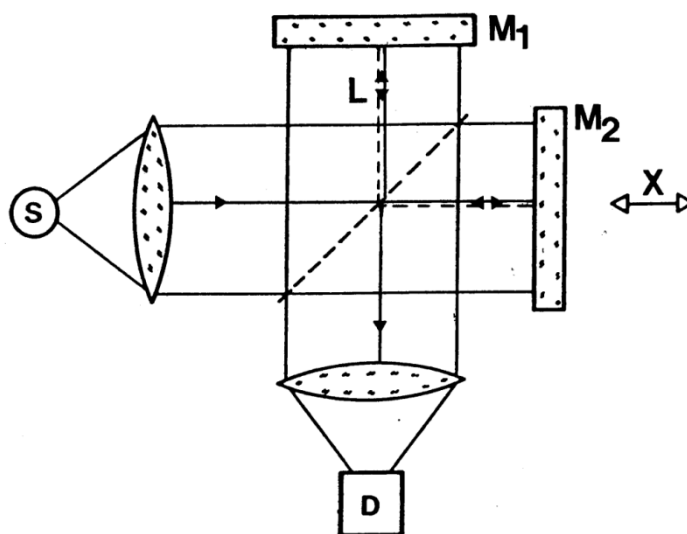


圖 3.2 麥克森干涉儀示意圖

由於量測到的訊號為汞燈光源穿透待測元件的相對強度，所以如果想要得到元件的穿透率，就必須將待測元件從光路中移開，再量測一次汞燈光源在背景中的穿透強度。最後把兩個訊號在相對應的波數下相除，即可得到待測元件的穿透率頻譜圖。量測穿透頻譜的光路架設圖，如圖 3.3 所示。

如果想要得到元件的反射率頻譜，除了要量測元件的反射強度外，還必須量測汞燈光源經過金鏡反射後的強度，最後再將兩者相除，即可得到待測元件的反射率頻譜圖。量測反射頻譜的光路架設圖，如

圖 3.4 所示。

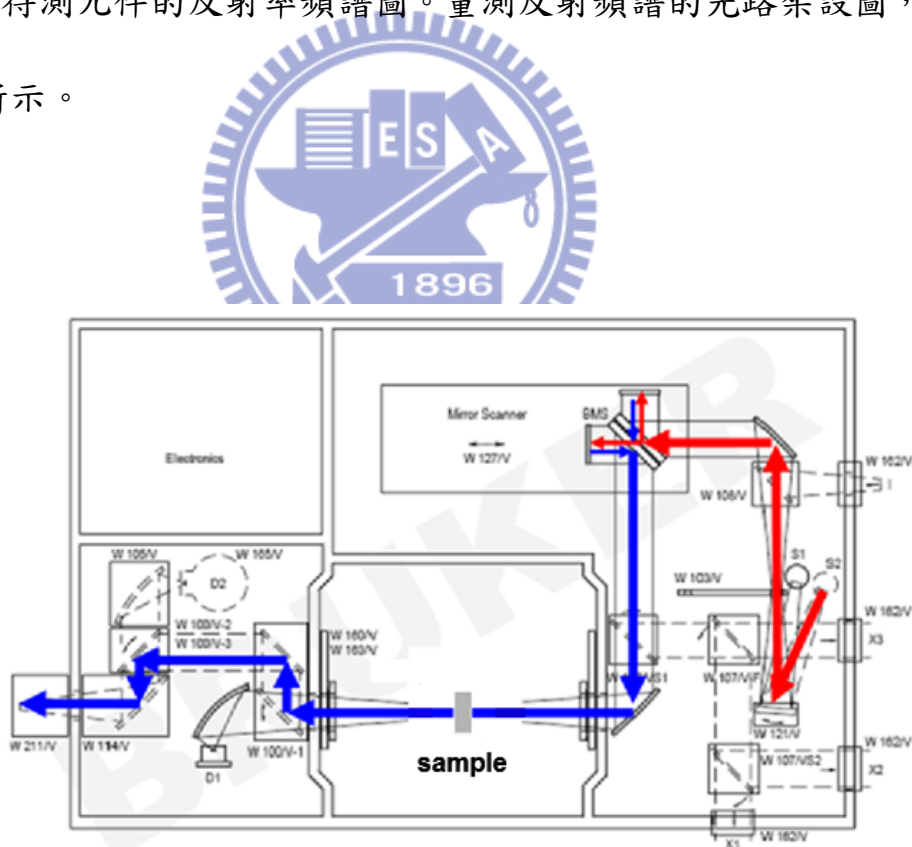


圖 3.3 量測穿透頻譜的光路架設圖

第四章 以 PET 薄膜製作薄金屬網狀濾波器 之實驗結果與討論

塑膠薄膜種類繁多，例如：PVC、PI、PMMA、PET、PP…等，我們選用較容易取得且常被使用的 PET 塑膠來做為基板[17 - 21]。本章節將針對 PET 塑膠基板的特性，以及後續用來製作元件的濾波效果做討論。

4-1 PET 塑膠薄膜介紹

PET 為英文 Polyethylene terephthalate 的簡稱，中文名稱為聚對苯二甲酸乙二酯，商品名稱又稱為 Mylar。其外觀為白色或淡黃色透明固體，具有韌性佳、質量輕、不透氣、耐酸鹼等特點。也因為以上的特性，讓 PET 成為日常生活中果汁、汽水、碳酸飲料等之常用容器。熔點為 240 ~ 260 °C，結構式如圖 4.1 所示。

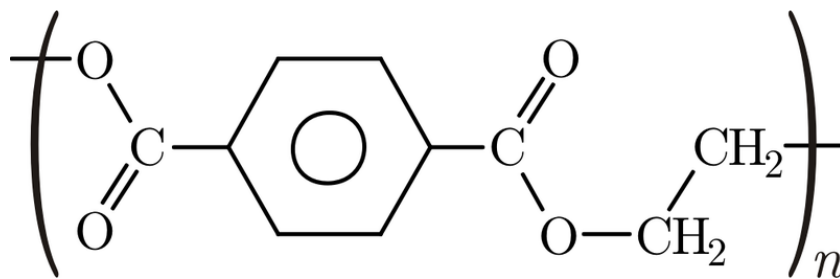


圖 4.1 PET 結構式

資料來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate

4-2 不同厚度的 PET 基板特性比較

首先我們量測在兆赫波波段下，厚度分別為 3.5 μm 、5.6 μm 、11.8 μm 、25 μm 、50 μm 、100 μm PET 塑膠基板的穿透頻譜 (T) 如圖 4.2 (a) 所示，反射頻譜 (R) 如圖 4.2 (b) 所示，並藉由 $T+R+A=1$ ，求出吸收頻譜 (A) 如圖 4.2 (c) 所示。

由圖 4.2 可以看出，PET 基板在 375 cm^{-1} 、430 cm^{-1} 以及 505 cm^{-1} 附近有明顯的吸收。並且隨著基板厚度的增加，除了原本 375 cm^{-1} 、430 cm^{-1} 以及 505 cm^{-1} 的吸收會變得更嚴重之外，140 cm^{-1} 和 630 cm^{-1} 附近的吸收也會變得越來越明顯，導致基板整體的穿透率下降。因此，選擇厚度越薄的塑膠膜，其濾波效果會越好。以目前本實驗室現有的材料來說，使用厚度 3.5 μm 的 PET 塑膠膜作為濾波器的基板，應該會是最好的選擇。但是必須注意到，在元件的設計上盡量讓穿透峰值避開 PET 塑膠基板本身吸收的波段，以免讓濾波效果受到影響。

另一方面，因為 Fabry Perot resonance 的關係，當基板厚度等於半波長整數倍的時候，反射係數會為零，也就是說會有穿透峰值的出現，因此我們可以在穿透頻譜上看到許多 resonance peak。關係式如下：

$$d = \frac{\lambda_{PET}}{2} \times m = \frac{\lambda}{2n_{PET}} \times m$$

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

d 為基板厚度， n_{PET} 為基板折射率， m 為整數。

以厚度 11.8 μm 的 PET 基板為例，當頻率為

7.57 THz (250 cm^{-1}) 的整數倍時，反射係數為零，如圖 4.2 (b)

所示。因此，我們可以透過此關係式推算出基板在這個波段下的

折射率大約為 1.67。

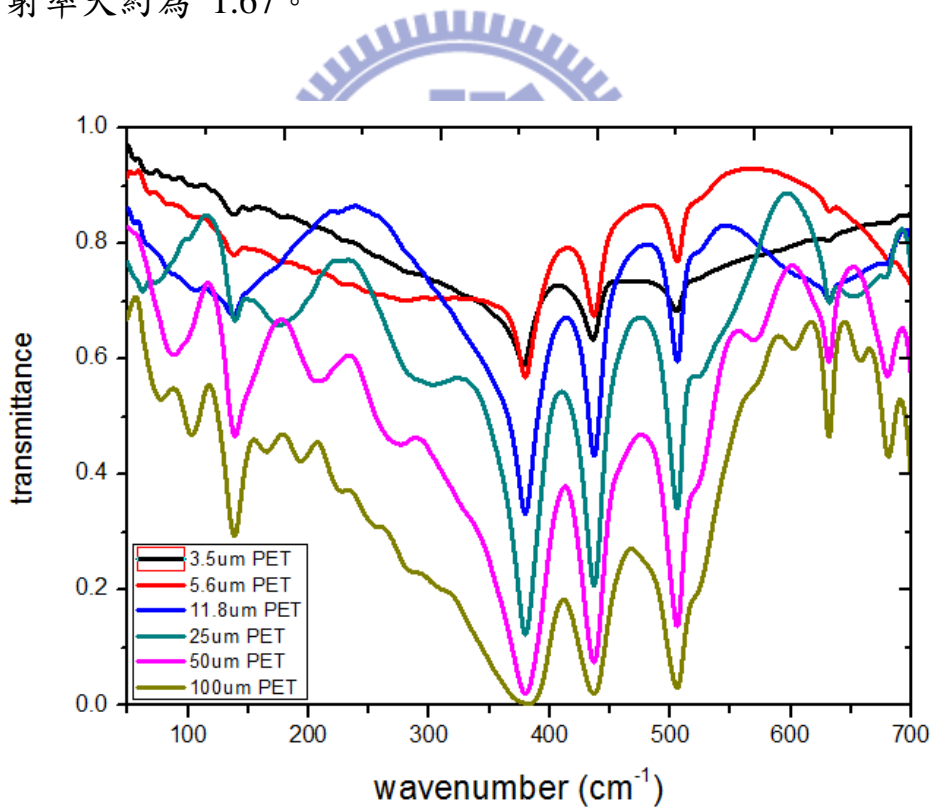


圖 4.2 (a) PET 塑膠基板穿透頻譜

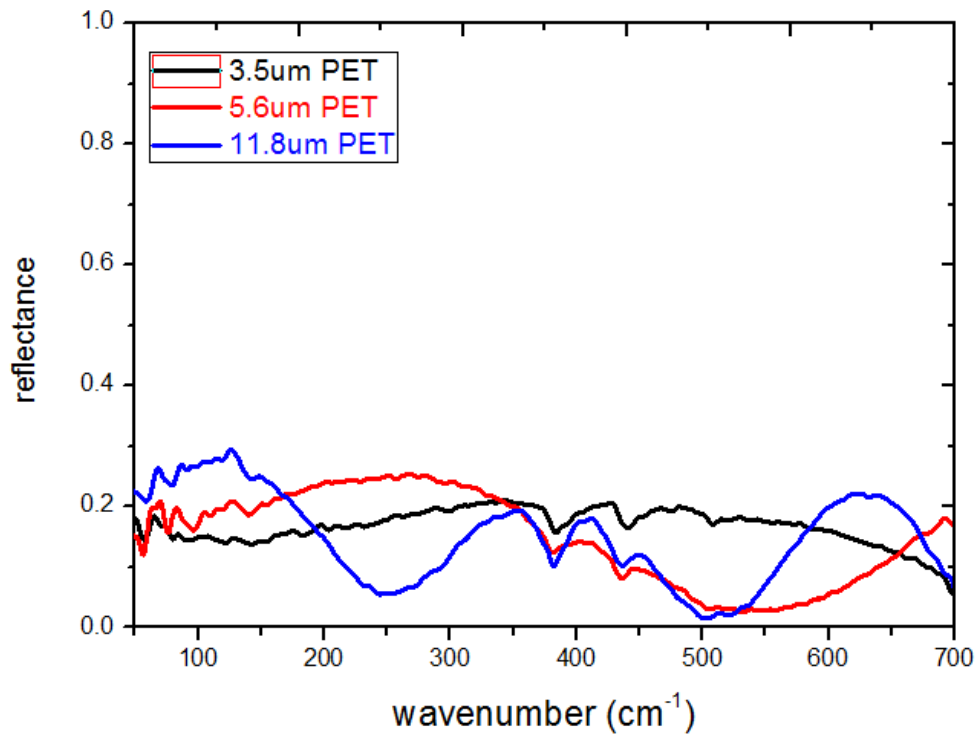


圖 4.2 (b) PET 塑膠基板反射頻譜

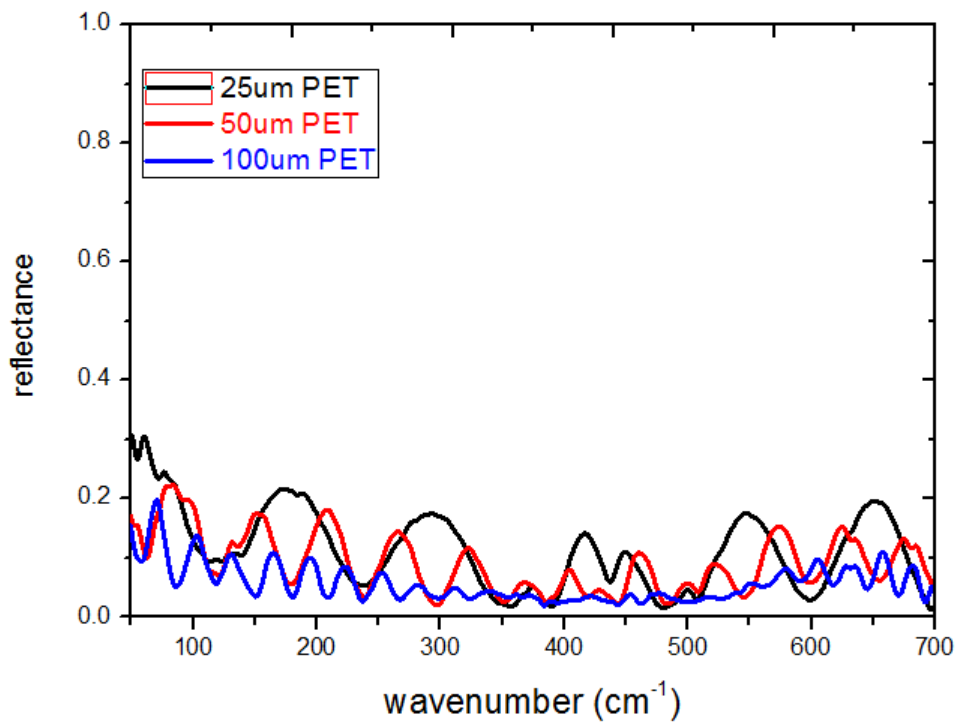


圖 4.2 (c) PET 塑膠基板反射頻譜

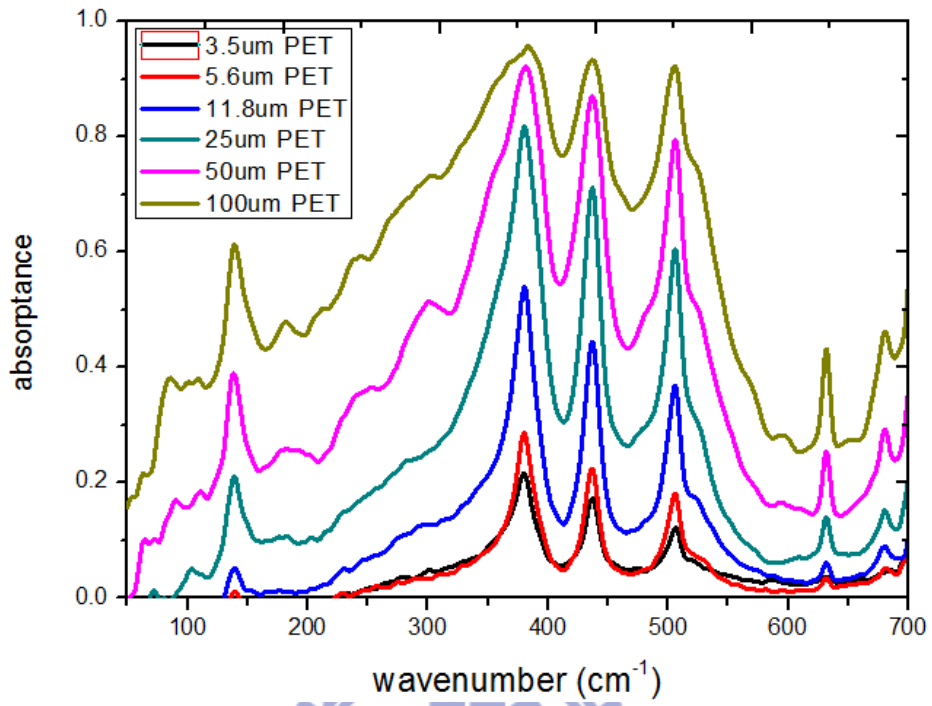


圖 4.2 (d) PET 塑膠基板吸收頻譜



4-3 固定 PET 基板厚度改變結構週期

由 4-2 所歸納出的結論，為了提升濾波效果，在此節我們所製作的濾波器，都是以厚度 3.5 μm PET 塑膠膜作為元件的基板。我們先利用週期 g 乘上 PET 基板的折射率 n 等於峰值波長的關係式設計元件 [12]，進一步討論在不同波段下，基板對濾波效果的影響。

首先，我們固定元件的透光面積，藉由改變週期來控制穿透峰值的波長。因此，我們設計三個不同金屬網結構的元件來作探討，分別是週期 $g=24\ \mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=18\ \mu\text{m}$ ；週期 $g=48\ \mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=36\ \mu\text{m}$ ；週期 $g=192\ \mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=144\ \mu\text{m}$ ，其穿透頻譜如圖 4.3 所示。

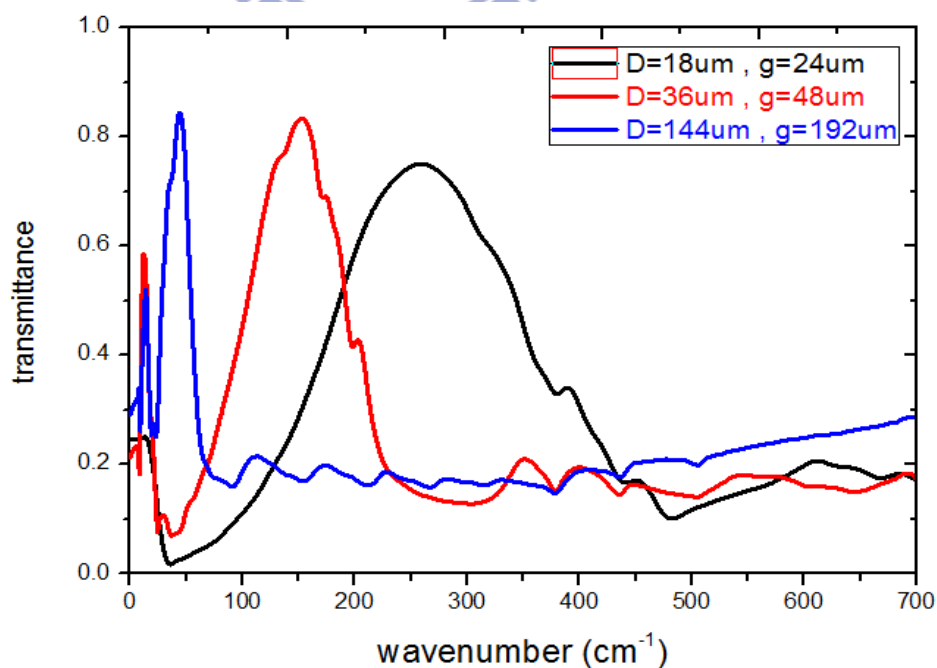


圖 4.3 固定透光面積，改變結構週期的穿透頻譜圖

由圖 4.3 可以發現一些現象：

- 【1】隨著元件週期 g 變大，穿透峰值會逐漸往長波長來移動，而且峰值的穿透率會逐漸上升，半高寬也會越來越窄。峰值穿透率會上升的原因，主要是厚度 $3.5\mu\text{m}$ PET 塑膠膜越往長波長，其穿透率會越高。而影響峰值半高寬變化的主要因素則是由基板本身的吸收係數來決定，越往長波長 PET 塑膠膜的吸收係數越小，所以半高寬也會越小。
- 【2】在上一節，我們推算出基板的折射率 n 大約是 1.67 。而我們預期，當週期 g 乘上基板的折射率 n 會等於穿透峰值波長，結果卻發現量測到的峰值波長，跟我們所計算的峰值波長有些偏差。原本我們預期週期 $g=24\ \mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=18\ \mu\text{m}$ 的元件，其穿透峰值波長應該會在 $40.08\ \mu\text{m}$ (247cm^{-1}) 出現，結果發現量測到的峰值波長偏移到了 $38.1\ \mu\text{m}$ (260cm^{-1})，而此波長對應到的基板折射率為 1.58 ；我們預期週期 $g=48\ \mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=36\ \mu\text{m}$ 的元件，穿透峰值應該會出現在 $80.16\ \mu\text{m}$ (123.5cm^{-1})，結果量測到的峰值波長偏移到了 $66\ \mu\text{m}$ (150cm^{-1})，此波長對應到的基板折射率為 1.37 ；而預期週期 $g=192\ \mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=144\ \mu\text{m}$ 的元件，穿透峰值應該會出現在 $320.64\ \mu\text{m}$ (30.87cm^{-1})，結果量測到的峰值波長偏

移到了 $253.8\mu\text{m}$ (39cm^{-1})，此波長對應到的基板折射率為

1.17。可以發現，隨著週期變大，對應到的基板折射率就越小。

為了解釋這個現象，我們做了以下的模擬，並搭配實驗來了解

其中的物理機制：

首先假設基板的厚度為無窮厚，圖 4.4 為示意圖。而且因為我們所製作的薄金屬網狀濾波器其金屬厚度夠薄，所以在孔洞內的電場還沒有損耗太多，就已經從孔洞穿透出來。因此電場主要是在基板內損耗，並且呈現 exponential decay，我們以穿透峰值的頻率來模擬，電場在基板內衰減的模擬圖如圖 4.5 所示。由圖 4.5 可發現，這三個週期的電場衰減深度都大於我們基板的厚度 ($3.5\mu\text{m}$)。而且隨著週期變大，電場的衰減深度就會越深。因此我們知道金屬表面電場同時可看到兩種不同介質，一種為空氣，而另一種為塑膠基板。隨著金屬孔洞週期增加，導致電場在空氣中所佔的比例也跟著提高，因此等效的基板折射率會比塑膠基板低，接近空氣的折射率。而基板折射率的改變，影響了穿透峰值波長，使得實際量測到的峰值波長跟我們所計算的峰值波長有些偏差。

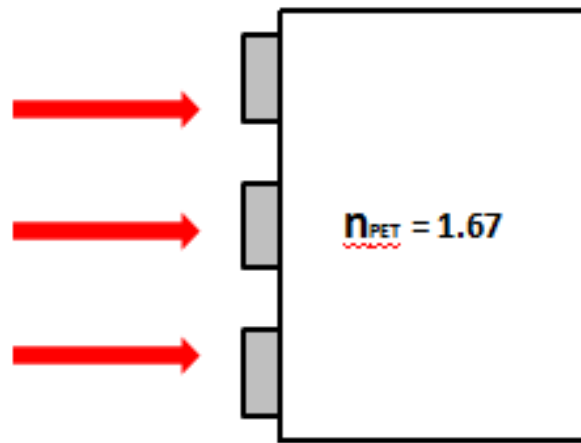


圖 4.4 基板厚度為無窮厚的薄金屬網狀濾波器示意圖

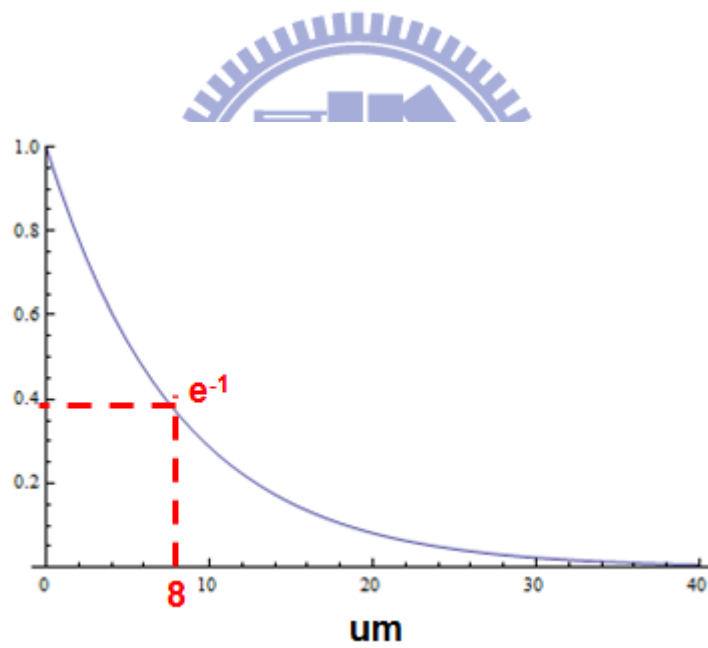


圖 4.5 (a) 電場在基板內衰減的模擬圖。

週期 $g=24 \text{ um}$ ，圓洞直徑 $D=18 \text{ um}$

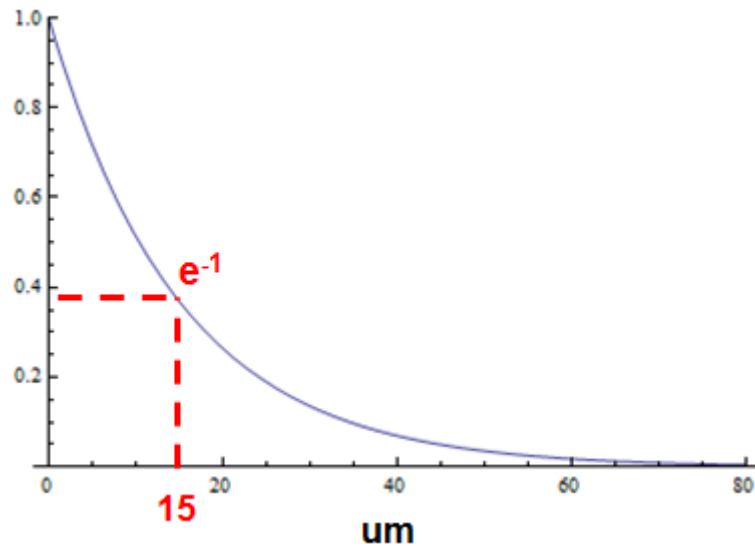


圖 4.5 (b) 電場在基板內衰減的模擬圖。

週期 $g=48 \text{ um}$ ，圓洞直徑 $D=36 \text{ um}$

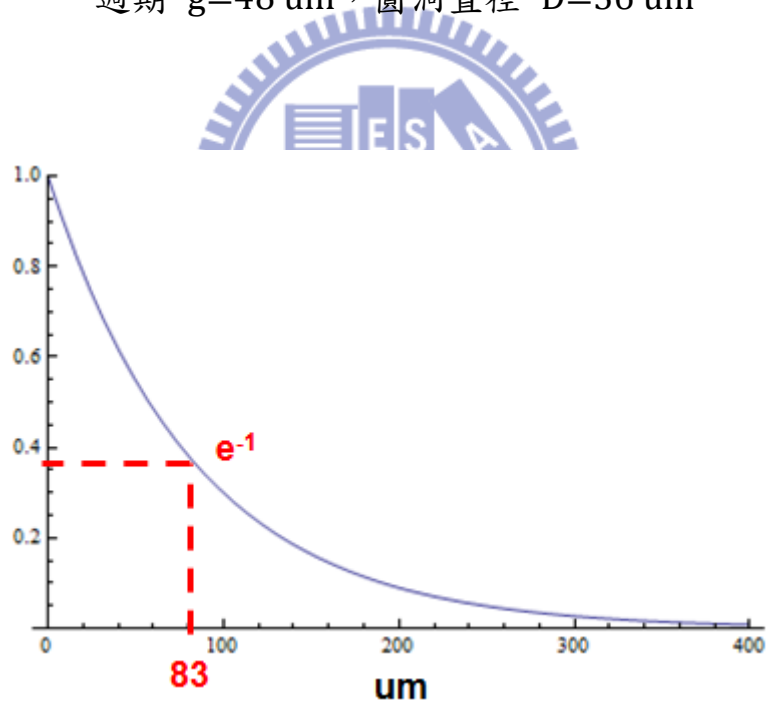


圖 4.5 (c) 電場在基板內衰減的模擬圖。

週期 $g=192 \text{ um}$ ，圓洞直徑 $D=144 \text{ um}$

4-4 在不同厚度的 PET 基板上作相同的薄金屬網狀結構

在 4-3 我們發現，當基板厚度固定，隨著電場衰減深度的變大，等效折射率會越接近空氣的折射率。因此，我們預期若電場衰減深度固定，隨著基板厚度的增加，等效折射率會越接近 PET 基板的折射率。

我們使用三種不同厚度的 PET 薄膜作為元件基板，厚度分別是 3.5 μm 、5.6 μm 、11.8 μm ，並在基板表面鋪上相同的金屬網結構（週期 $g=48 \mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=36 \mu\text{m}$ ），穿透頻譜如圖 4.6 所示。

由圖 4.6 可發現，若電場衰減深度固定，隨著基板厚度的增加，穿透峰值會逐漸往長波長來移動，換句話說，基板的等效折射率如我們所預期的變大了。

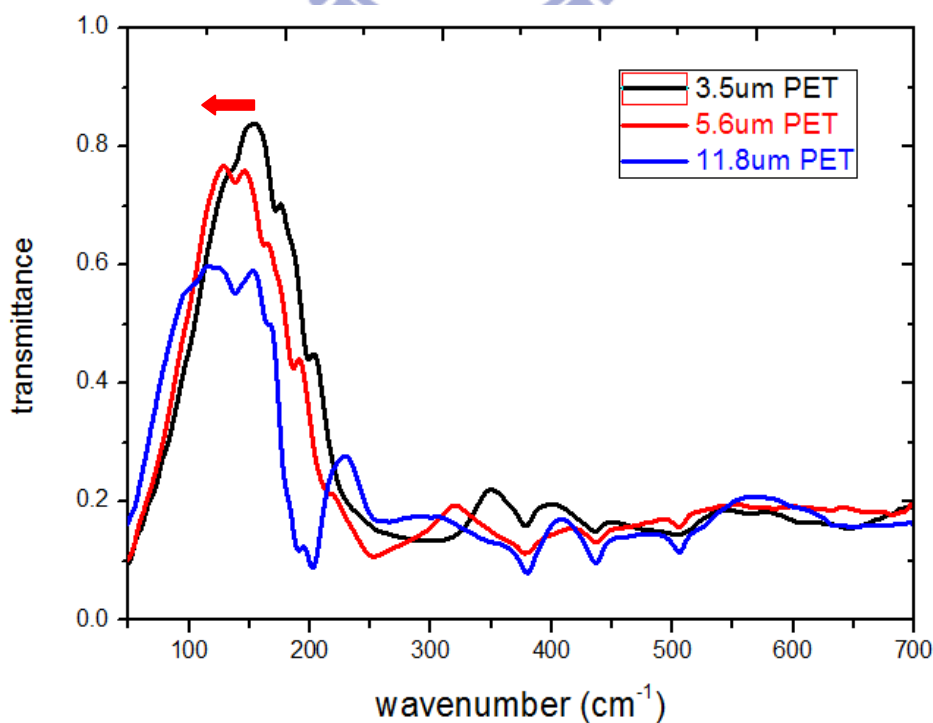


圖 4.6 在不同厚度的 PET 基板表面鋪上相同的金屬網結構

4-5 串聯兩相同薄金屬網狀濾波器

由 4-3 的實驗結果發現，以厚度 3.5um PET 塑膠薄膜作為元件基板所設計的濾波器，如圖 4.7 所示，其穿透率峰值已經可以達到接近 80% 左右，但是 stop band 的穿透率還是稍嫌高了一些，而且穿透峰值半高寬的問題也必須改善。因此，在此節我們試著從 stop band 穿透率，以及穿透峰值半高寬為出發點，提出一些實驗方法，希望能進一步提升薄金屬網狀濾波器的效能。

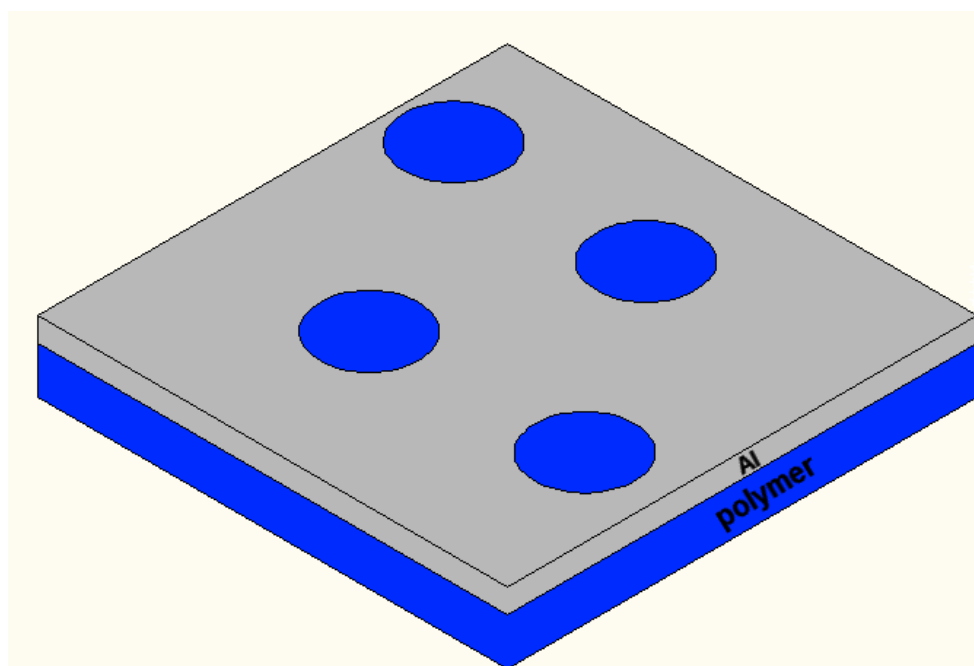


圖 4.7 薄金屬網狀濾波器示意圖

在此節我們試著串聯 2 個相同的薄金屬網狀濾波器，讓光一次通過兩個元件，如圖 4.8 所示，圖 4.9 為量測到的穿透頻譜。由此頻譜圖可以看出，的確可以經由串聯兩個相同的濾波器來降低 stop band 的穿透率，並且其穿透峰值的半高寬也會變窄，峰值尚可維持

六成以上的穿透率。

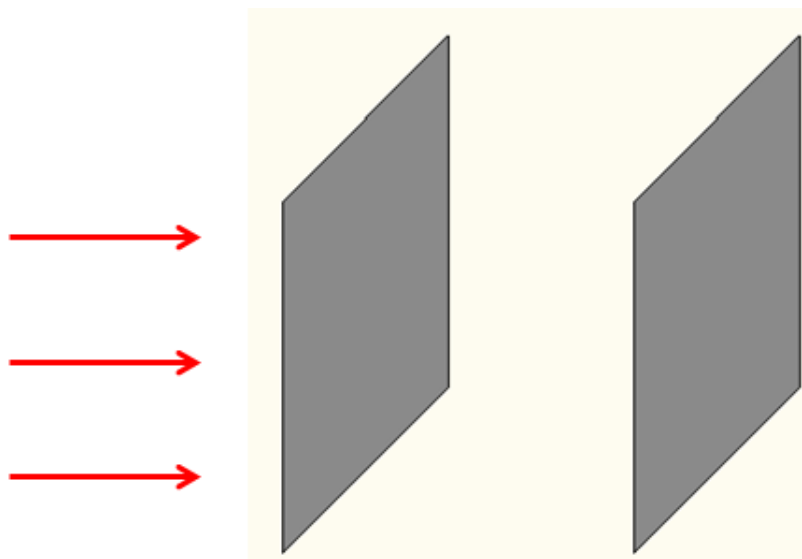


圖 4.8 光穿透兩個相同的濾波器元件示意圖

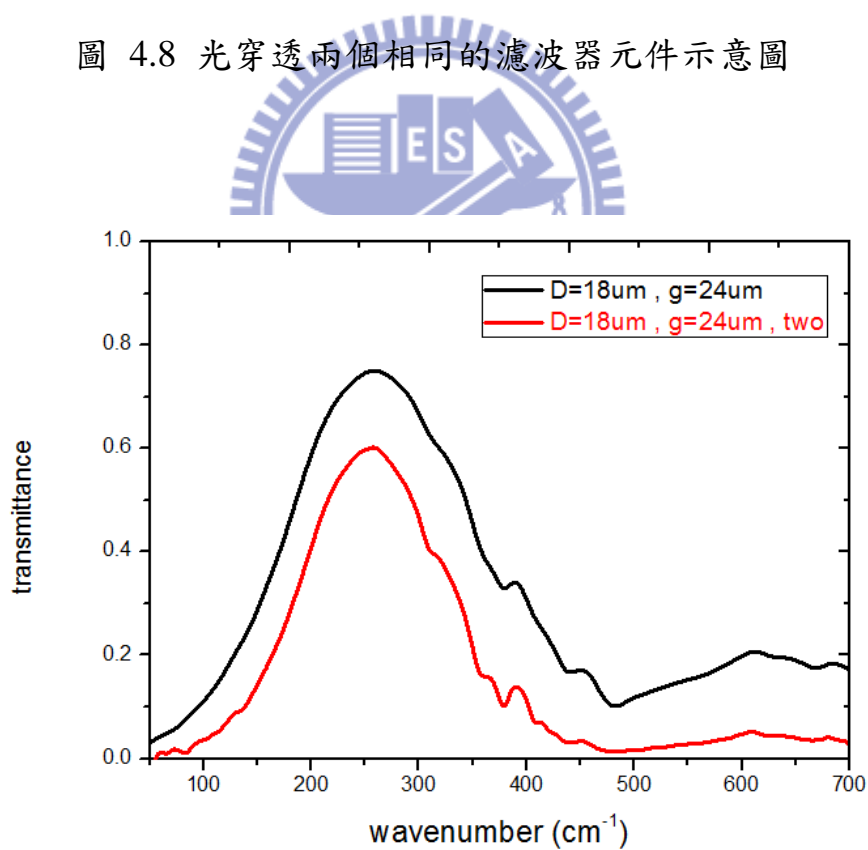


圖 4.9 (a) 光穿透過元件的頻譜圖

(週期 $g=24\text{ um}$ ，圓洞直徑 $D=18\text{ um}$)

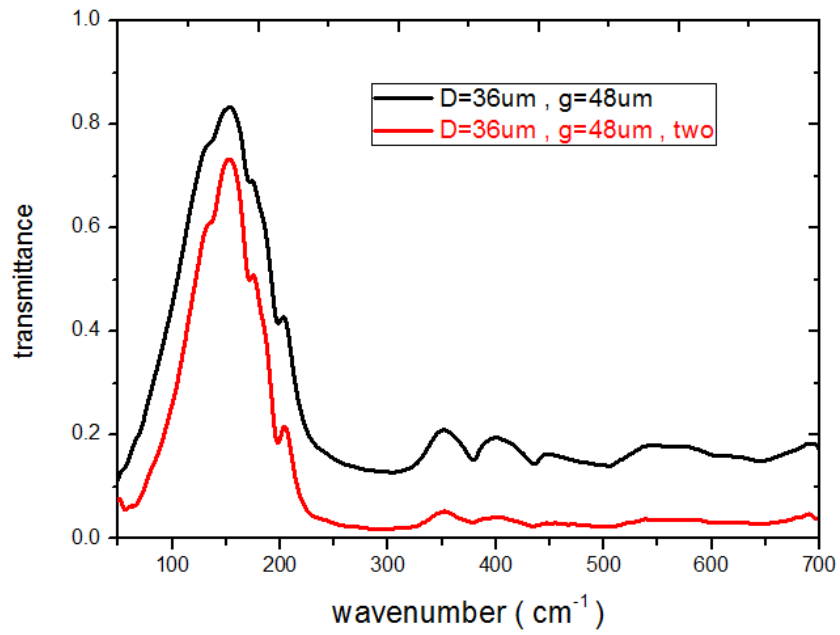


圖 4.9 (b) 光穿透過元件的頻譜圖週期
(週期 $g=48\text{ }\mu\text{m}$ ，圓洞直徑 $D=36\text{ }\mu\text{m}$)



第五章 厚金屬網狀濾波器之實驗結果與討論

本章節將針對準分子雷射加工法的加工效果，以及元件的量測結果做討論。我們使用厚度 50 μm 的 PET 塑膠基板做雷射加工，製作的金屬網結構為正方形所構成的二維週期性金屬孔洞（如圖 2.2 所示）。我們一共製做了兩種不同參數的元件，如表 5.1 所示，並且模擬其穿透頻譜。圖 5.1 為 S1 的穿透頻譜模擬圖，我們預期元件的第一個 dip 會出現在 125 cm^{-1} 附近，而第二個 dip 會出現在 176 cm^{-1} 附近（第一共振態的 $\sqrt{2}$ 倍）。

圖 5.2 為 S1 的穿透頻譜量測結果，元件的第一個 dip 出現在 134 cm^{-1} ，第二個 dip 出現在 191 cm^{-1} （第一共振態的 $\sqrt{2}$ 倍），雖然與原本預期有些偏差，但是在定性上還是符合我們的設計，如表 5.2 所示。可是定量上，峰值的強度明顯偏低許多。


而 S2 的穿透頻譜量測結果也類似 S1，dip 出現的地方與預期不同，但是在定性上符合我們的設計，如表 5.3 所示，同樣的，峰值的強度還是明顯偏低許多。圖 5.3 為 S2 的穿透頻譜模擬圖，圖 5.4 為 S2 的穿透頻譜量測圖。

值得注意的是，元件在基板會出現強烈吸收的幾個波段，其濾波效果都沒有受到影響，如圖 5.5 所示。因此我們判斷金屬已經成功的將基板整個包覆住，使得塑膠基板的特性消失了。而造成峰值偏移

與峰值強度偏低的原因，我們認為有以下兩點：

- 【1】 基板經過平台的移動之後，元件的金屬網不再是完美的週期性結構，如圖 5.6 所示。
- 【2】 經過雷射加工後，基板正面與背面的孔徑大小不一致。S1 正面的正方形孔洞邊長擴孔為 55 μm ，但是背面的孔洞邊長卻只有 33 μm ；S2 正面的正方形孔洞邊長擴孔為 46 μm ，但是背面的孔洞邊長卻只有 27 μm 加工後的孔洞呈現喇叭孔的形狀，與我們的設計不符，圖 5.7 為基板鑽孔後的示意圖。

因此，若能把移動平台的精準度提高，並且改善鑽孔後基板正反面孔徑不一致的現象，元件的濾波效果應該就可以大幅提升。



	g (μm)	L (μm)
S1	80	40
S2	50	30

表 5.1 正方形孔洞結構之週期 (g) 與邊長 (L) 的尺寸對照表

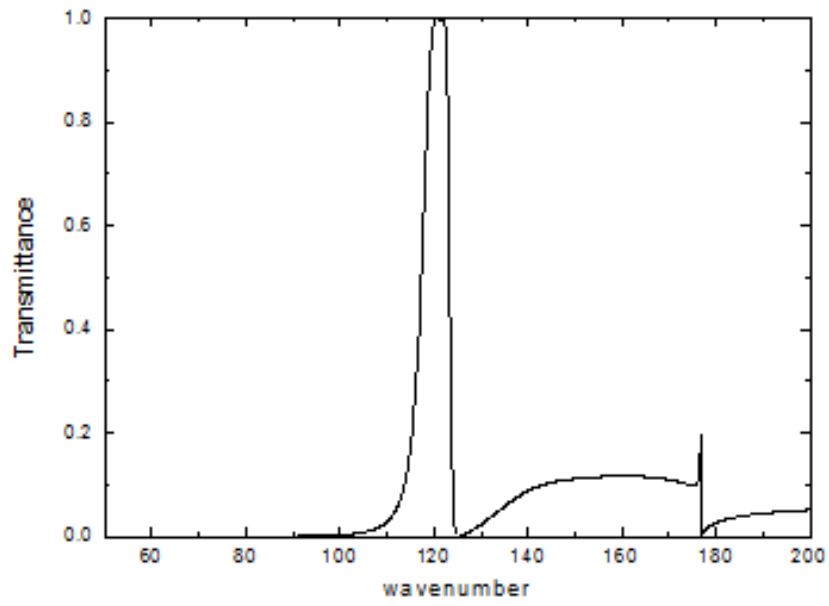


圖 5.1 S1 的穿透頻譜模擬圖

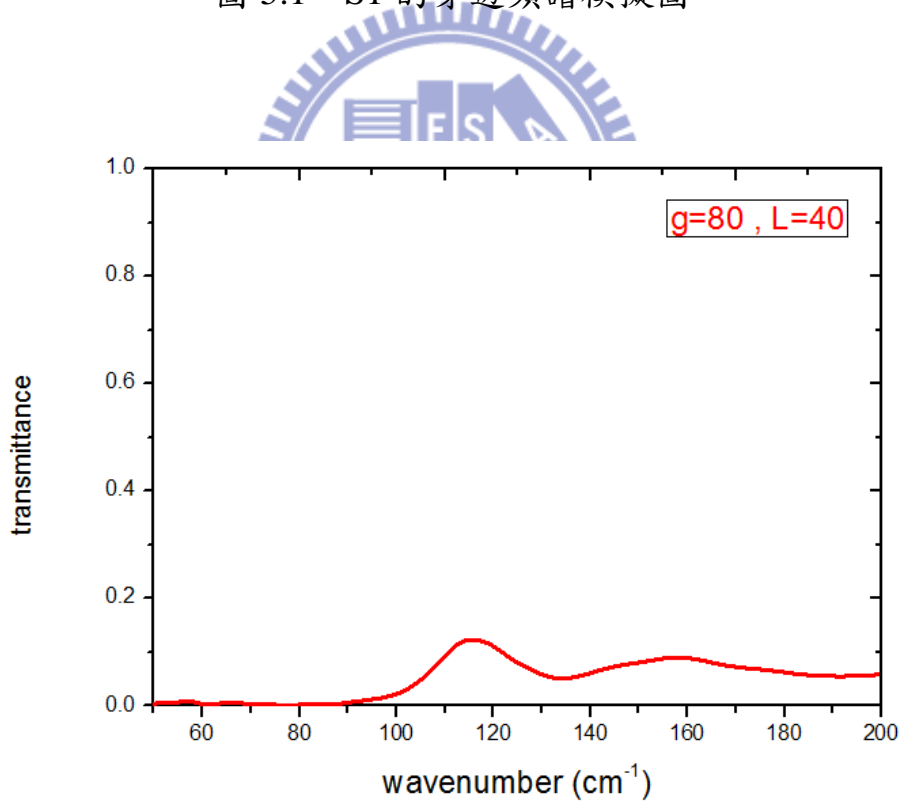


圖 5.2 S1 量測到的穿透頻譜圖

	1 st dip	2 nd dip
S1 simulate	125cm ⁻¹	176cm ⁻¹
S1 measure	134cm ⁻¹	191cm ⁻¹

表 5.2 S1 dip 在模擬與實驗上的偏移

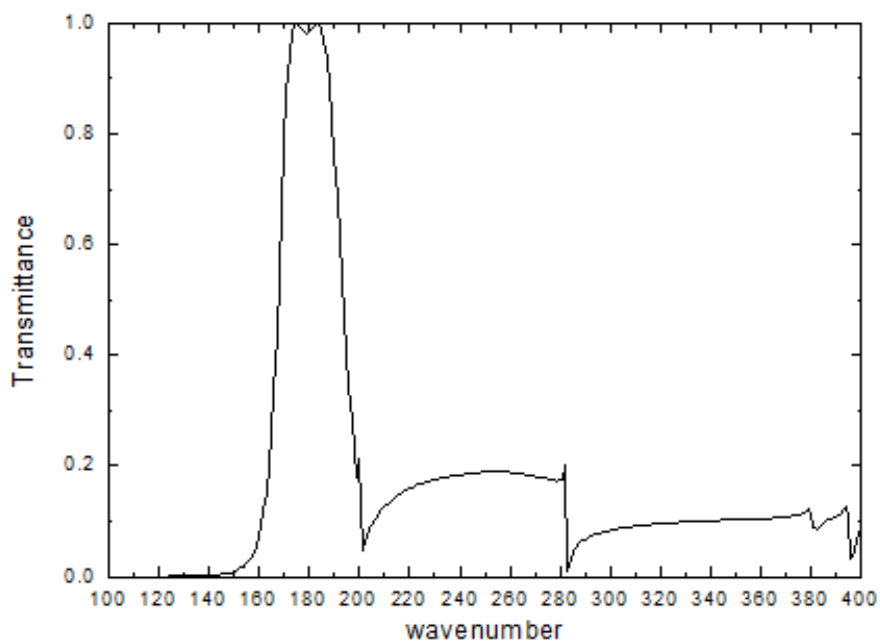


圖 5.3 S2 的穿透頻譜模擬圖

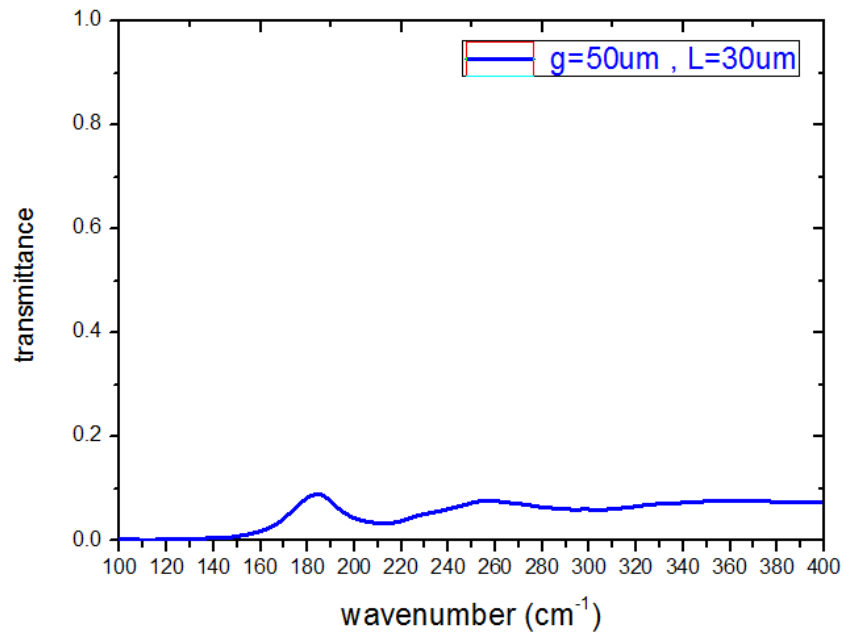



圖 5.4 為 S2 的穿透頻譜量測圖



	1 st dip	2 nd dip
S2 simulate	200cm ⁻¹	283cm ⁻¹
S2 measure	212cm ⁻¹	302cm ⁻¹

表 5.3 S2 dip 在模擬與實驗上的偏移

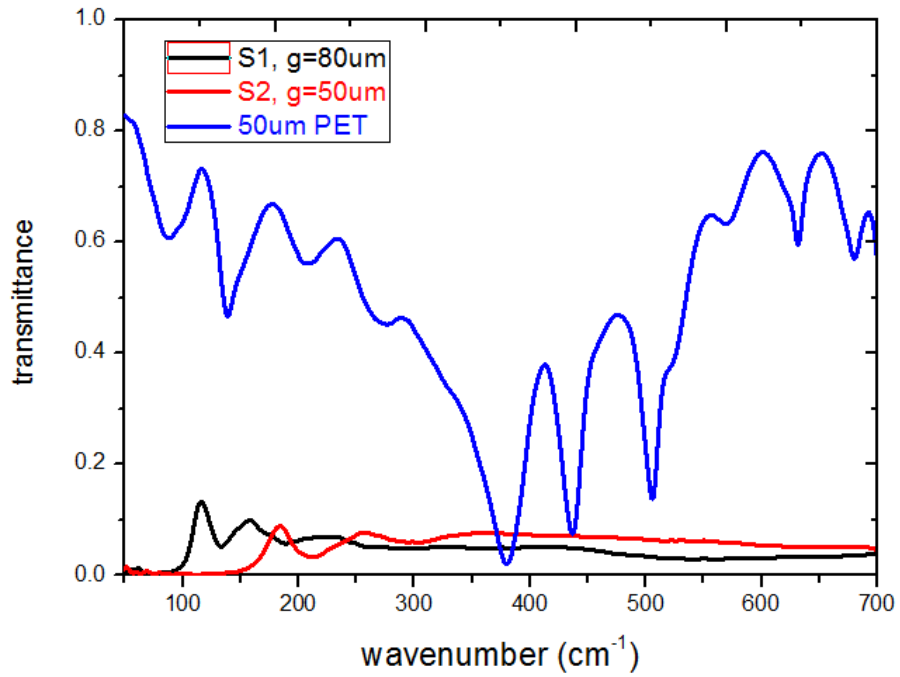


圖 5.5 S1 & S2 量測到的穿透頻譜與 50um PET 的穿透頻譜對照圖

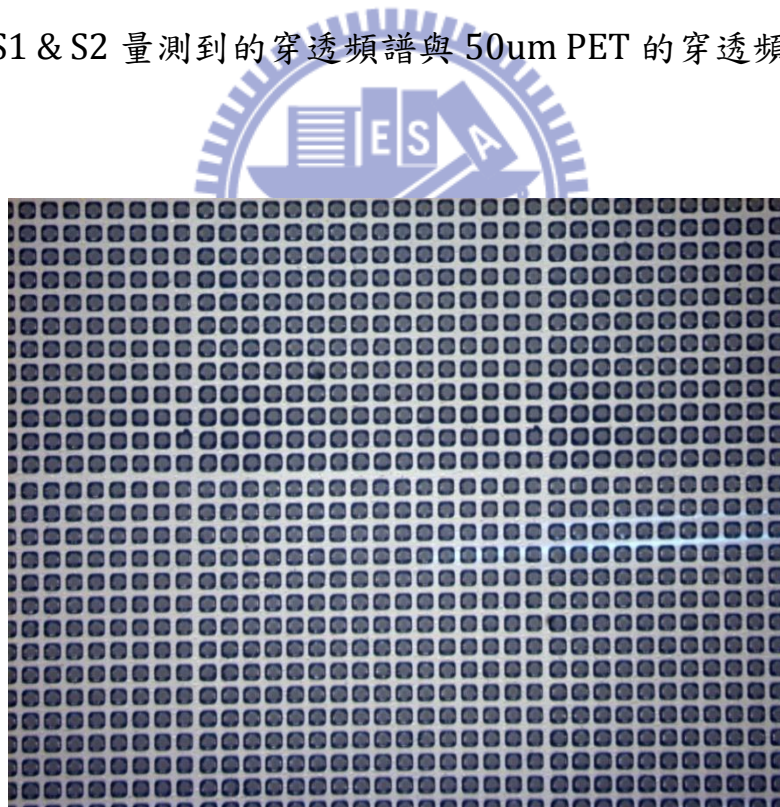


圖 5.6 (a) 基板正面加工後的拍攝結果

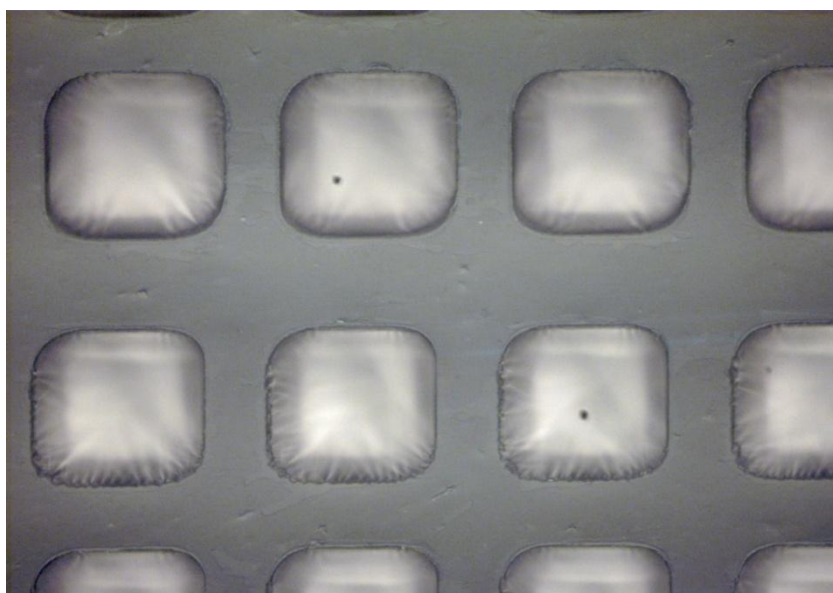


圖 5.6 (b) 基板正面加工後的放大拍攝結果

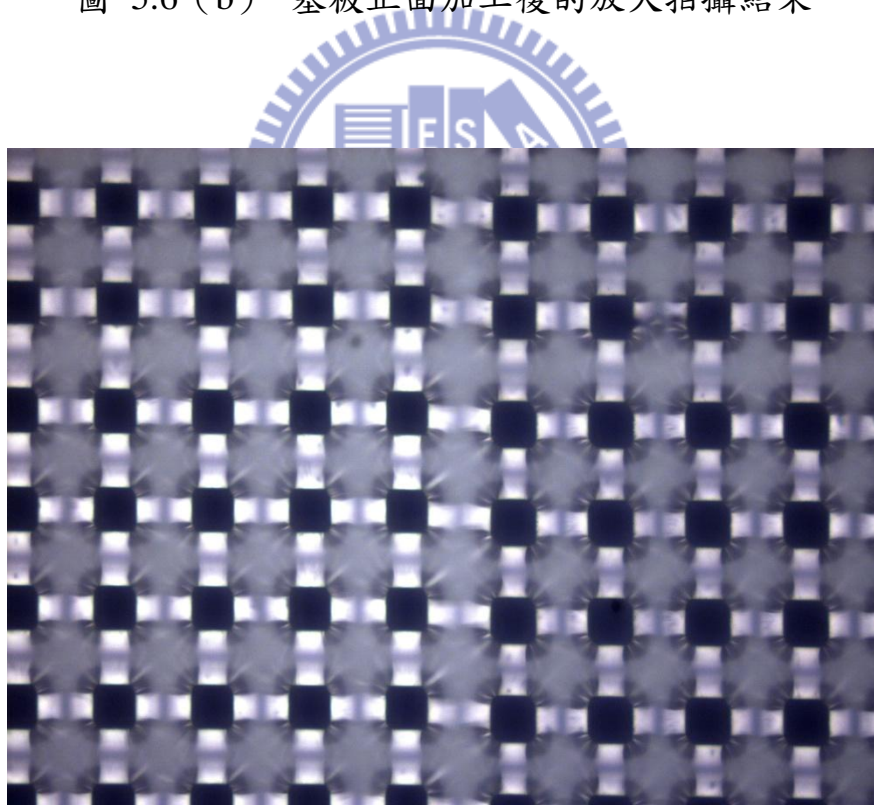


圖 5.6 (c) 基板背面加工後的拍攝結果

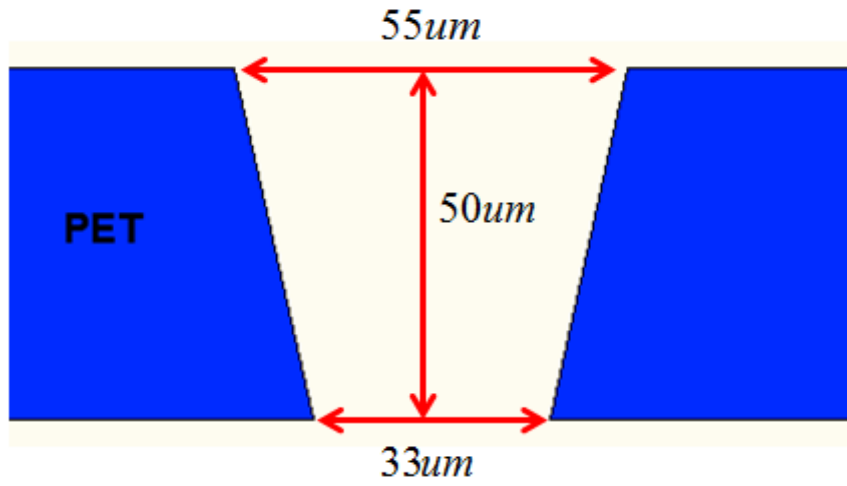


圖 5.7 (a) S1 基板鑽孔後剖面圖

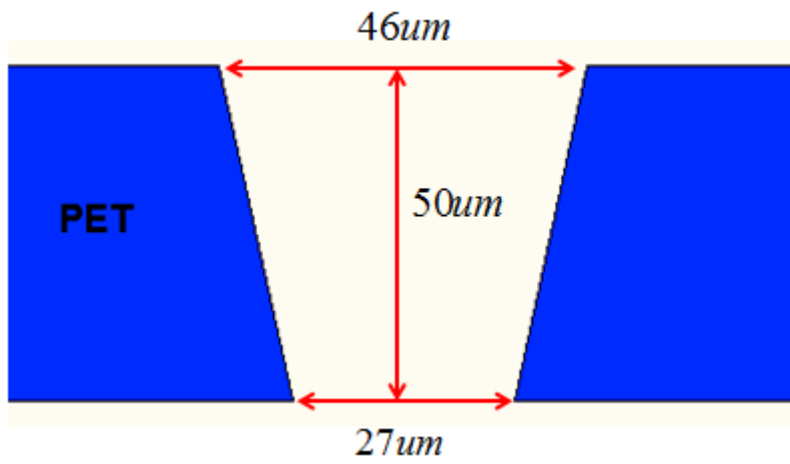


圖 5.7 (b) S2 基板鑽孔後剖面圖

第六章 結論

本論文製作薄膜與厚膜金屬濾波器，並探討其於兆赫波段的穿透特性。我們以 PET 薄膜作為基板，成功製作出適用於兆赫波波段下的薄金屬網狀濾波器。並討論在不同波段下，PET 基板對於濾波效果的影響。我們可得到以下的結論：

- 【1】 塑膠基板表面必須經過拋光處理，否則在元件的製程上會有問題。
- 【2】 以 PET 基板而言，厚度越薄其基板本身的吸收係數會越小，整體穿透率會越高。因此使用厚度越薄的 PET 塑膠基板，其濾波效果會越好。
- 【3】 若基板厚度小於電場深度，週期 g 乘上基板的折射率 n 等於穿透峰值波長的關係式將不再正確，必須使用基板和空氣的等效折射率來計算。
- 【4】 串聯兩個相同的濾波器元件，可以降低 stop band 的穿透率，並且讓峰值半高寬變窄，並維持一定量的峰值穿透強度。
- 【5】 另一方面，我們結合微機電製程中的準分子雷射加工技術來製作厚金屬網狀濾波器，此方法可以簡化傳統製作厚金屬元件繁雜的步驟。其實驗結果在定性上與預期吻合，但是在定量上有很明顯的落差。造成誤差的原因可能是作完雷射鑽孔之後，基

板整體的週期與孔洞形狀都與當初設計不符，若能將這些技術上的問題解決，元件的濾波效果應該可以提升。



參考文獻

- [1] R.Ulrich , Infrared Phys.7,37 (1967)
- [2] R.Ulrich , Applied Optics,Vol.22,No.10,October (1968).
- [3] Peter A.R. Ade, Giampoalo Pisano, Carole Tucker and Samuel Weaver, Proc. of SPIE Vol. 6275, 62750U, (2006)
- [4] Marcuvitz N., M.I.T. Rad. Lab. Ser., Mc.Graw-Hill, 280-290 (1951)
- [5] Vardaxoglou J.C., Research Studies Press ,21-24 (1997)
- [6] Davis J.E., Infrared Physics, 20, 287 (1980)
- [7] K.D.Moller,K.R.Farmer,D.V.P.Ivanov et al. , Infrared Physics & Technology 40 (1999) 475-485
- [8] R.Ruprecht, W.Bacher, P.Bley ,et al.,Jahrg.23 ,2-91, 18-123.(2003)
- [9] K.D.Moller, O.sternberg , JAP , 91, 12
- [10] Andrew J.Gatesman, Andriy Danylov, Thomas M.Goyette,et al., Proc. SPIE, Vol.6212, pp.62120E1-62120E-12. (2006)
- [11] Bortolucci, Maria Zakia, Otto Bauer, et al. ,Applied Optics, Vol.47, Issue 32, pp.6064-6069.
- [12] 黃信傑 , 民98 , 兆赫波波段金屬網狀濾波器之研究.
- [13] N.G. Basov, V.A. Danilychev, Y.M. Popov, and D.D. Khodkevich, J. of Experimental and Theoretical Physic Letters, Vol. 12,pp.329 (1970)
- [14] S. Searles, G.Hart, Applied Physic Letters, Vol. 27, pp.243 (1975)

[15] 黃冠欽，民95，準分子雷射機率式加工法應用於任意曲面三維
微結構之製作

[16] W.Herres and J.Gronholz,“ Understanding FT-IR Data
Processing. ”(Bruker).

[17] V. P. Tomaselli, D. C. Edewaard, P. Gillan, and K. D. Moller
Applied Optics, Vol.20, No.8 (1981)

[18] Yun-Sik Jin,_Geun-Ju Kim and Seok-Gy Jeon , Journal of the
Korean Physical Society, Vol. 49, No. 2, pp. 513_517 (2006)

[19] THz materials and components (TYDEX)

[20] Miguel Navarro-Cía , Sergey A. Kuznetsov , Mariem Aznabet ,
Miguel Beruete , Francisco Falcone and Mario Sorolla Ayza ,
IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 47, NO. 3
(2011)

[21] Yong Ma, A. Khalid, Timothy D. Drysdale, and David R. S.
Cumming , OPTICS LETTERS, Vol. 34, No. 10 (2009)

簡歷

姓名：張廷誠 (Ting-Cheng Chang)

性別：男

出生日期：75 年 1 月 10 日

學歷：國立成功大學物理系 (93.9~97.6)

國立交通大學電子研究所碩士班 (98.9~100.11)

碩士論文題目：以塑膠基板製作金屬網狀濾波器於兆赫波段下之研究

Studies of metal mesh filter device on polymer substrate in
Terahertz Frequencies.

