

國立交通大學

電子工程學系電子研究所碩士班

碩士論文

兆赫波段金屬網狀濾波器之研究

Studies of Metal Mesh Filters
in Terahertz Frequencies

研究生：黃信傑

指導教授：顏順通

中華民國九十八年七月

兆赫波段金屬網狀濾波器之研究

學生：黃信傑

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

摘要

本論文著重在研究兆赫波（1 THz~10 THz）通過各種薄金屬網狀結構的穿透率，利用簡易的製程與簡單的設計概念，得到濾波效果佳之濾波器。

我們首先研究的濾波器結構係將蒸鍍於矽基板上之薄金屬蝕刻出以正方形陣列排列之十字狀的洞。藉由改變洞的透光面積、長寬比與破壞對稱性等等，從中觀察到透光面積介於 20% 到 40% 可得到較佳穿透率之濾波器；且可藉由調整長寬比及破壞洞與陣列的對稱性來改變半高寬；而改變週期或變換不同折射率之基板可用來控制濾波器的峰值波長。

接著我們將上述結構所得到之結果運用在六角對稱結構之中，將薄金屬蝕刻出雪花狀的洞，以此設計成功製作出穿透率接近 100% 之薄金屬網狀濾波器。而此結構使我們得以串聯使用兩個相同濾波器，除可降低濾波頻帶外之穿透率，亦能保有高於 90% 的穿透峰值，提升濾波器之濾波效果。

Studies of Metal Mesh Filters in Terahertz Frequencies

Student : Hsin-Chieh Huang

Advisors : Dr. Shun-Tung Yen

Department of Electronics Engineering and Institute of Electronics

National Chiao Tung University

Abstract

In this thesis, we examine the transmittance of thin metal meshes in the terahertz region (1 THz~10 THz). By using standard litho processes and applying simple design concepts, we can fabricate THz filters with high performance.

The metal on a substrate is etched with square array of cross holes. We find that filters with 20~40% pervious area have optimal transmittance. We can adjust the bandwidth of the filters by changing the aspect ratio of the holes and by reducing the symmetry of our structures. In addition, we can adjust the main peak frequency by changing the period of the hole array or by changing the substrate material.

By applying the above results to the hexagonal array of snowflake holes, we can design the filters with transmittance close to 100%. When two filters of the same structure are placed in series, they can reduce the stop-band transmittance while keeping the main peak transmittance higher than 90%.

致謝

在交大既緊湊又充實的兩年碩士生涯一轉眼就結束了。

首先我要誠摯感謝我的指導教授 顏順通 博士，老師除了在研究上不厭其煩的給我指導，在對於學術研究上的嚴謹態度，不僅令我佩服亦是我應學習的榜樣。接下來我要特別感謝的是鐘佩鋼 學長，學長帶我進入兆赫波領域，花費時間和我在研究上的討論，以及實驗上 FTIR 量測的無私指導。我要再一次的感謝老師的指導與學長的幫忙，本論文才得以順利完成。

另外我要感謝王德賢 學長、黃品維、和謝泓文，你們給我許多研究上的知識與物理觀念，讓我得以更順利的完成此論文。當然還有要感謝的是我同屆的夥伴，石正瑜 和 李志浩，如果沒有你們，我是無法撐過那一段整天都待在奈米中心的日子。最後要感謝李冠成 學長、賴威良、實驗室的學弟們和所有在交大我所認識的人，感謝你們陪我度過這兩年。

最後我要感謝我的家人，特別是我的父母，感謝你們二十多年來對我無怨無悔的照顧與百分之百的支持，讓我可以無後顧之憂的專注於學業上；感謝你們在我面臨失敗後所給我的扶持與鼓勵，讓我得以站起來並更上一層樓；感謝你們給予我不求回報的愛與付出。

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vi
一、緒論	
1-1 前言	01
1-2 研究背景	02
1-3 研究動機	05
1-4 研究項目	06
二、製程與量測	
2-1 參數定義	07
2-2 材料選擇	08
2-3 元件製程	10
2-4 量測	12
三、薄金屬正方形陣列十字架挖洞濾波器 穿透率之實驗結果與討論	
3-0 概要說明	16
3-1 正方形陣列不同的十字架透光面積	17
3-2 不同的十字架長寬比	21
3-3 不同週期正方形陣列正方形挖洞	23

3-4 正方形陣列十字架旋轉	26
----------------	----

3-5 正方形陣列橫移	28
-------------	----

四、改良式濾波器穿透效率之實驗結果與討論

4-0 概要說明	30
----------	----

4-1 六角形陣列不同的雪花狀長寬比	31
--------------------	----

4-2 串聯兩相同金屬網濾波器元件	33
-------------------	----

4-3 正方形陣列固定透光面積不同長寬比	35
----------------------	----

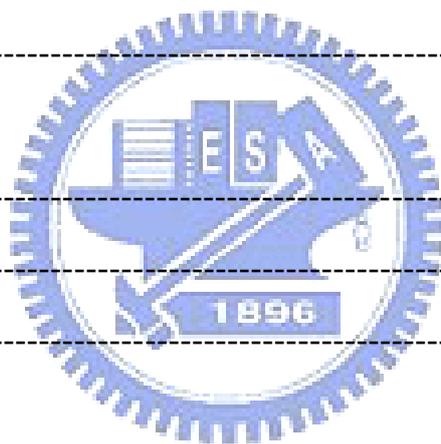
4-4 正方形陣列十字架挖洞與改良後濾波器比較	37
-------------------------	----

五、結論	39
------	----

參考文獻	40
------	----

附錄	43
----	----

簡歷	52
----	----



圖目錄

圖 1-1	電磁波頻譜	01
圖 1-2a	結合電容性和電感性的十字架 pattern	02
圖 1-2b	十字架陣列參數	02
圖 1-2c	光通過金屬網在金屬網兩邊產生表面波的剖面圖	03
圖 1-2d	光通過不同金屬網厚度的頻譜圖	03
圖 1-2e	光通過不同洞形狀的頻譜圖	04
圖 1-3	光通過十字架陣列的頻譜圖	05
圖 1-4a	正方形陣列俯視圖	06
圖 1-4b	六角形陣列俯視圖	06
圖 2-1	正方形陣列與六角形陣列參數示意圖	07
圖 2-2a	元件基本結構	08
圖 2-2b	各種不同厚度材料的穿透率	09
圖 2-3	光學顯微鏡所拍攝之金屬網俯視圖	11
圖 2-4a	本實驗室所使用的 FT-IR	13
圖 2-4b	邁克森干涉儀略圖	13
表 2-4	FT-IR 所設定的參數	14
圖 2-4c	汞燈穿透矽基板與金屬網所偵測到的穿透強度	15
圖 2-4d	將 $S_i(\nu)/M(\nu)$ 所得之穿透率頻譜圖	15
圖 3-0	量測正方形陣列長方形挖洞不同長寬比之穿透率頻譜圖	16
圖 3-1a	等比例縮小十字架示意圖	17
圖 3-1b	正方形陣列十字架挖洞不同透光面積之穿透率頻譜圖	18
圖 3-1c	模擬和圖 3-1b 相同參數之穿透率頻譜	19
圖 3-1d	透光面積比例和峰值穿透率的關係圖	19
圖 3-1e	透光面積比例和 stop-band 穿透率的關係圖	20
圖 3-1f	正方形陣列正方形挖洞不同透光面積之穿透率頻譜圖	20

圖 3-2a 十字架不同長寬比示意圖	-----	21
圖 3-2b 正方形陣列十字架挖洞不同長寬比之穿透率頻譜圖	-----	22
圖 3-2c 模擬和圖 3-2b 相同參數之穿透率頻譜	-----	22
圖 3-3a 光穿透金屬網在矽基板表面形成表面波示意圖	-----	23
圖 3-3b 正方形陣列正方形挖洞不同週期之穿透率頻譜	-----	24
圖 3-3c 模擬和圖 3-3b 相同參數之穿透率頻譜	-----	24
圖 3-3d 週期 g 和峰值波長關係圖	-----	25
圖 3-4a 將金屬網視為二維晶格結構示意圖	-----	26
圖 3-4b 正方形陣列十字架挖洞十字架旋轉之穿透率頻譜圖	-----	27
圖 3-5a 將十字架橫移示意圖	-----	28
圖 3-5b 正方形陣列十字架挖洞十字架橫移之穿透率頻譜圖	-----	29
圖 4-0 正方形陣列與六角形陣列俯視圖	-----	30
圖 4-1 六角形陣列雪花狀挖洞不同長寬比之穿透率頻譜圖	-----	32
圖 4-2a 光穿透過兩個金屬網濾波器元件示意圖	-----	34
圖 4-2b 光穿透過六角形陣列金屬網之穿透率頻譜圖	-----	34
圖 4-3a 固定透光面積不同長寬比形狀示意圖	-----	35
圖 4-3b 正方形陣列固定透光面積不同長寬比之穿透率頻譜	-----	36
圖 4-3c 模擬正方形陣列相同面積不同長寬比長方形洞 之穿透率頻譜	-----	36
圖 4-4a 光穿透過一元件不同對稱結構之穿透率頻譜	-----	38
圖 4-4b 光穿透過不同對稱結構兩相同元件之穿透率頻譜	-----	38
圖一-a 正方形陣列圓形挖洞不同透光面積之穿透率頻譜	-----	43
圖二-a 正方形陣列正方形挖洞改變其晶格之穿透率頻譜	-----	44
圖三-a 正方形陣列圓形挖洞改變其晶格之穿透率頻譜	-----	45
圖四-a 改變直立長方形的長 b 示意圖	-----	46
圖四-b 不同直立長方形的長 b 所量測之頻譜圖	-----	46

圖五-a	改變直立長方形的寬 e 示意圖	-----47
圖五-b	不同直立長方形的寬 e ，所量測之頻譜圖	-----47
圖六-a	週期為 $g=24\mu\text{m}$ ，相同透光面積不同 pattern 的蝕刻	----48
圖六-b	相同透光面積，不同挖洞形狀之頻譜圖	-----49
圖七-a	不同透光面積光柵示意圖	-----50
圖七-b	不同透光面積光柵之頻譜圖	-----50
圖八-a	不同透光面積長條狀光柵示意圖	-----51
圖八-b	不同透光面積長條光柵之頻譜圖	-----51



一、緒論

1-1 前言

現今所謂的兆赫波波段，一般泛指 0.1 兆赫~10 兆赫(波長為 30um~3mm) 的電磁波。兆赫波波段是非常重要的頻譜波段，它可以穿透許多電磁波無法穿透的材料，且對水分子非常敏感(易被水吸收)，再加上它本身為低能量且為非游離性輻射，對人體較無害，另外許多分子的轉動或震動能階皆落於此波段，不同兆赫波波段頻率會引起不同生物分子的振動。故可運用在醫學領域對生物細胞、癌細胞等的探測、防恐偵測、各類生物分子檢測等；且由於上述特性，我們可預期在未來的許多應用，如：物理、化學、天文等，兆赫波相關技術將會是不可或缺的。最後由於高速資訊時代的來臨，元件操作頻率未來亦將邁向兆赫波段領域。

然而目前由於兆赫波源輸出強度極低且昂貴，故上述許多運用仍無法普及。不過由於兆赫波已受到越來越多科學家矚目，故其技術亦日益進步。而本實驗室目前利用偵測兆赫波欲觀察其中的物理機制，且除了兆赫波產生器外，本實驗室在偵測器和濾波器亦有所研究，期許對兆赫波廣泛應用的世代來臨有所幫助。

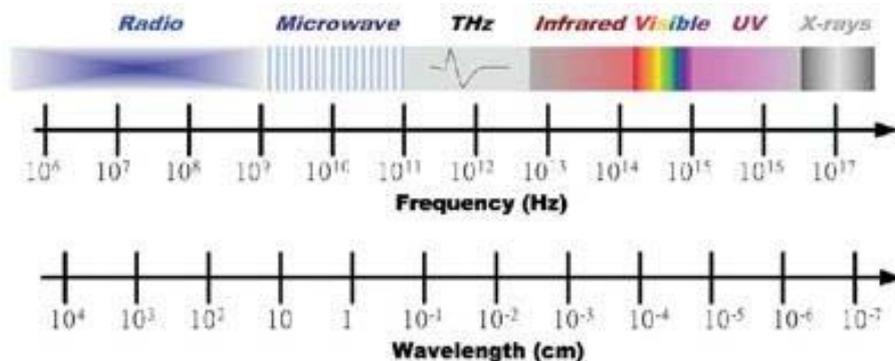


圖 1-1 電磁波頻譜。

資料來源：<http://www.itrc.org.tw/Publication/Newsletter/no87/p08.php>

1-2 研究背景

現今在兆赫波波段幾種最常見的光濾波器，以在基板上（矽或塑膠等等）鋪上陣列對稱薄金屬網（金或鋁等等）最廣為使用。其最大的原因在於製程相對容易。且由於製程技術的進步，此元件在製程上以往會遇到的問題，如：金屬表面的不平坦，patterns 最小線寬限制等等已可以輕易克服；其次是由於它設計容易，且穿透率可以介於 80%~90%。然而在實際運用上，目前還有些問題極需克服。而在討論如何解決這些問題之前，我們先來回顧此類型濾波器的發展。

最早在 1967 年，Ulrich 運用週期性的方形金屬陣列以及其互補金屬網狀陣列發展出所謂的電容性以及電感性的濾波器，並結合電容性和電感性，發展製造出十字架金屬網狀陣列，如圖 1-2a 所示；並使用傳輸線理論去建立其共振模型[1][2]。而由於十字架金屬網狀陣列濾波效果大大提升，也成為之後應用上研究的主流。

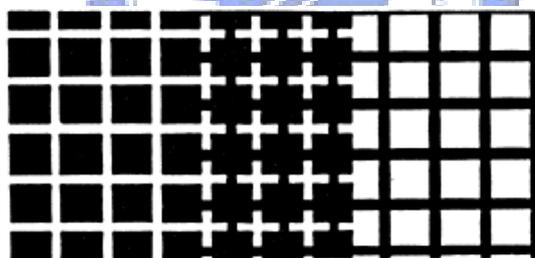


圖 1-2a 結合電容性和電感性的十字架 pattern[5]。

週期：首先我們來看看光濾波器產生穿透峰值（波峰，即 main peak）的原因，主要是金屬網週期 g ，如圖 1-2b 所示，和基板的介電

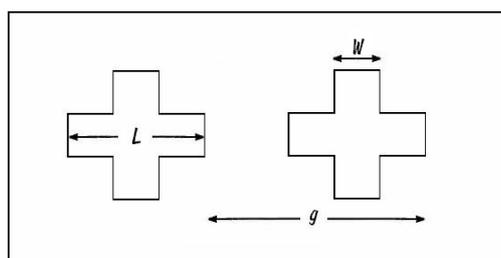


圖 1-2b pattern 陣列參數。

常數 (dielectric constant) 所影響。T. Timusk 和 P. L. Richards 提到，光在通過金屬週期陣列時，由於金屬網一邊是空氣，另一邊是基板材料，而入射光會在金屬網兩邊皆會產生表面波，如圖 1-2c 所示。其共振波長會是週期乘以一個常數，而這個常數即圖所表示的 shift factor，其中 n_1 和 n_2 為空氣和基板的折射率[3][4]。而製作所謂的 freestanding metal mesh，即金屬無附著在基材上，其 $n_1 = n_2 = 1$ ，則波峰波長會等於 g 。因此我們可以輕易且精準控制濾波器波峰位置。

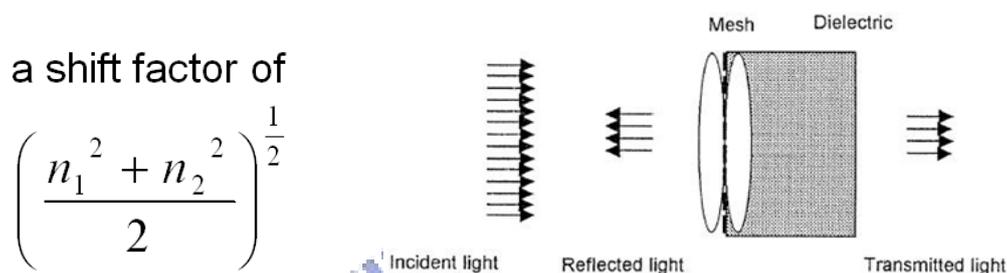
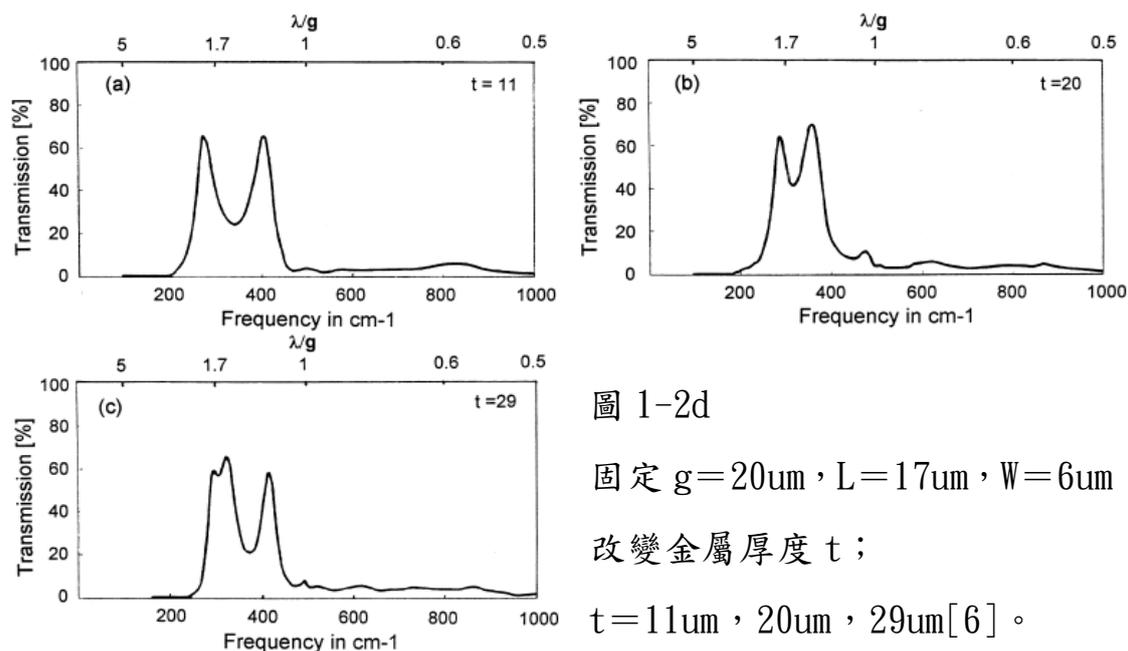


圖 1-2c 光通過金屬網時在金屬網兩邊會產生表面波[3]。

厚度：接下來討論的是金屬厚度。K. D. Moller 和 O. Sternberg 等人提到，當金屬網達一定厚度（一般金屬厚度 $> 0.1g$ 以上，即視為厚金屬網）時，就會有所謂的 thickness peak 出現。如圖 1-2d 所示，當厚度每增加 $0.5g$ ，就會增加一個新的 peak，而隨著厚度的改變，



於頻譜上它會往 main peak 移動，最後結合在一起並提升穿透率 [5][6][7]。故我們可以適當的控制金屬網厚度，設計出穿透率更佳之濾波器 [8][9]，唯其有個致命的缺點，就是製作太過於繁雜且 pattern 易形變 [10][11]。

最後來談談金屬挖洞的形狀對濾波器所造成的影響。我們由實驗可知，不同的形狀挖洞，例如圓形、正方形、十字架等，如圖 1-2e 所示，皆會有不同的共振穿透，其中十字架 pattern 的濾波效果明顯優於正方形與圓形 [12]。

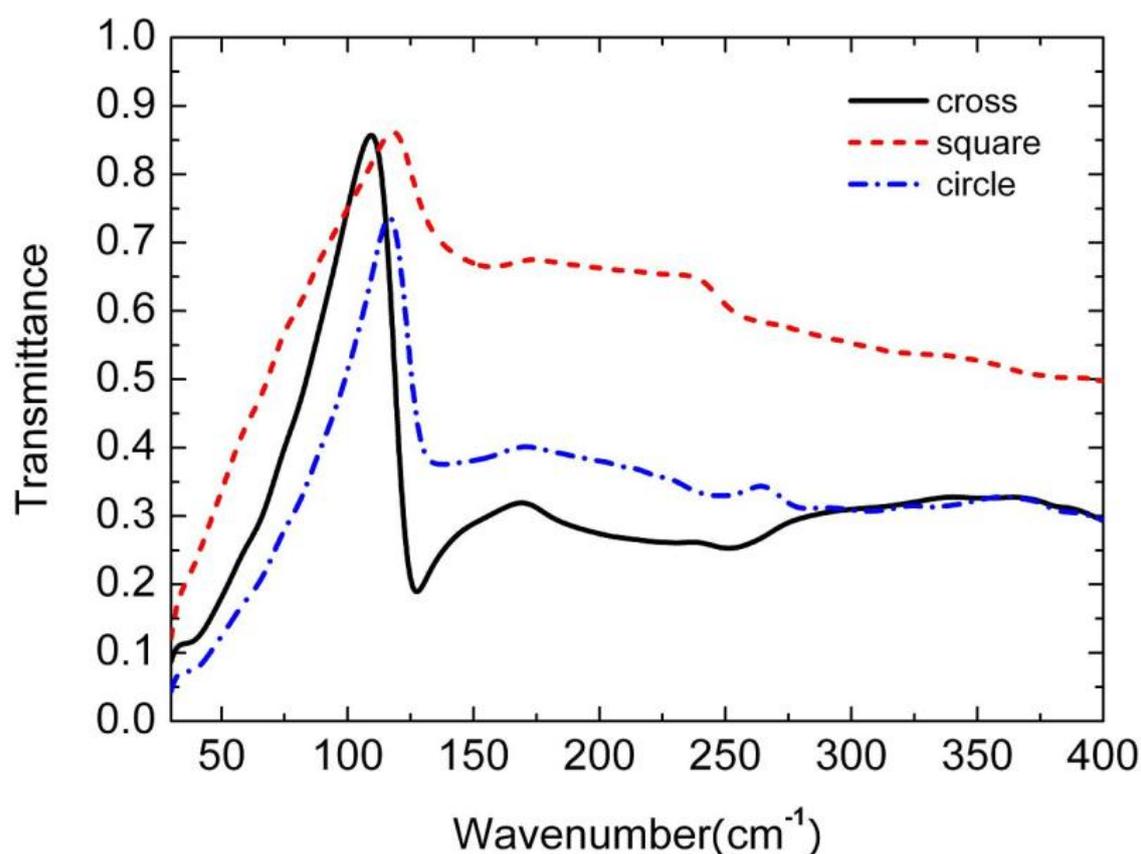


圖 1-2e 週期 $g=24\mu\text{m}$ ，pattern 不同之穿透率頻譜。

另外為了進一步提升濾波器效能，亦有人嘗試將光穿透過兩片相同的金屬網率波元件 [13][14]，藉以降低 stop-band 之穿透率。

1-3 研究動機

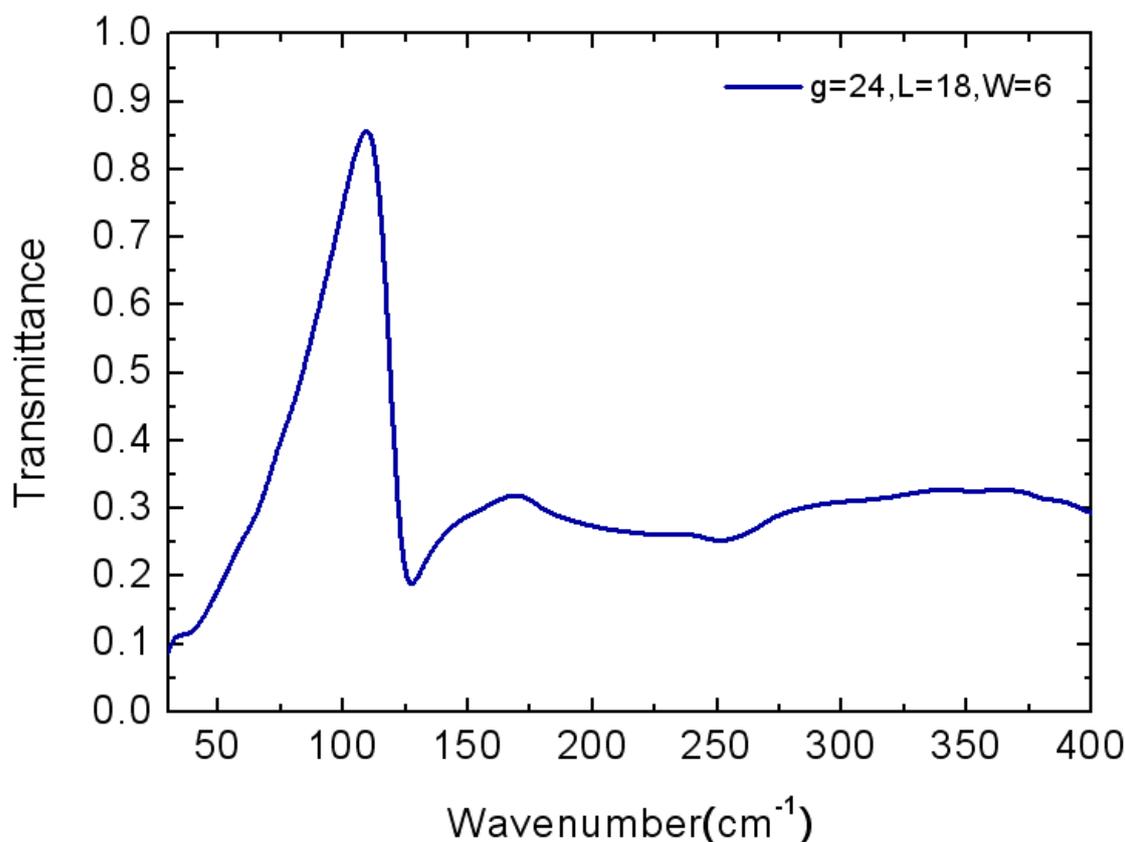


圖 1-3 週期為 24 μm ，長寬為 18 μm \times 6 μm 十字架陣列濾波器。

目前厚金屬網狀濾波器已經可以有很好的濾波效果，然而其元件製程卻非一般簡單微影、蝕刻步驟即可完成。至於薄金屬網狀陣列濾波器，雖然其製程步驟相對簡易，但卻無法有厚金屬網狀濾波器的濾波效果，如圖 1-3 所示：

- 其 main peak 穿透率僅約 90%，無法接近 100%。
- 其 stop-band 穿透率太大，無法小於 20%。
- 目前尚未可以準確預測及控制半高寬。

因此我們希望利用薄金屬網狀濾波器元件之簡易製成，結合簡單的設計概念來改善其濾波效能，期望能達到接近厚金屬網狀陣列濾波器之效果。

1-4 研究項目

首先是討論觀察光源在穿過週期性正方形對稱的金屬網，其濾波效果與物理機制。其中我以十字挖洞為主，並利用調整其週期以控制濾波之波段；並進一步改變其透光面積、長寬比、破壞對稱性等等，以期達到最佳濾波之效果並進一步的控制半高寬。

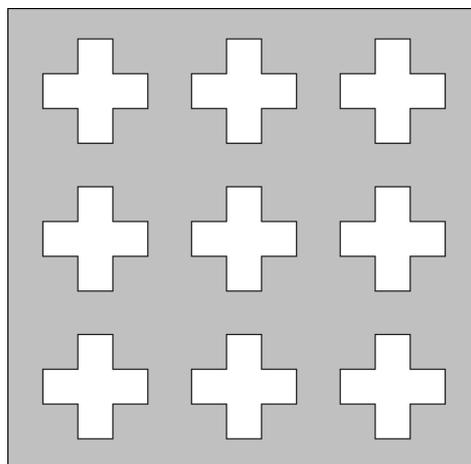


圖 1-4a 正方形陣列。

接下來將正方形陣列概念運用在六角形對稱上，同樣週期性蝕刻挖洞，並利用其週期性對稱所造成的異常性穿透，預期可獲得比正方形對稱穿透率更高之濾波器；並串聯兩個相同元件，預期可進一步提升濾波效果。

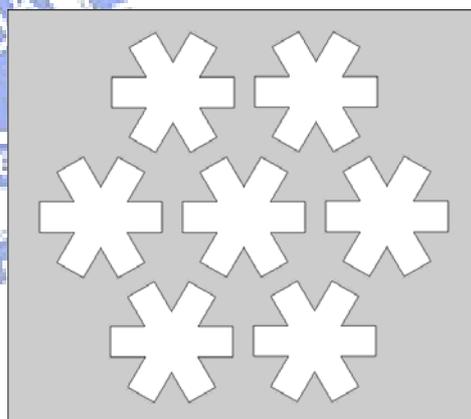


圖 1-4b 六角形陣列。

二、製程與量測

2-1 參數定義

在正方形陣列下，如圖 2-1 所示，我們定義週期為 g ，並定義紅色方塊區長方形的長和寬分別為 L 和 W ，並將此長方形旋轉 90° 形成十字架。

在六角型陣列下，如圖 2-4 所示，我們同樣定義週期為 g ，亦同樣定義紅色方塊區長方形的長和寬分別為 L 和 W ，不同的是我們將此長方形分別旋轉 60° 和 120° ，使其形成雪花狀。

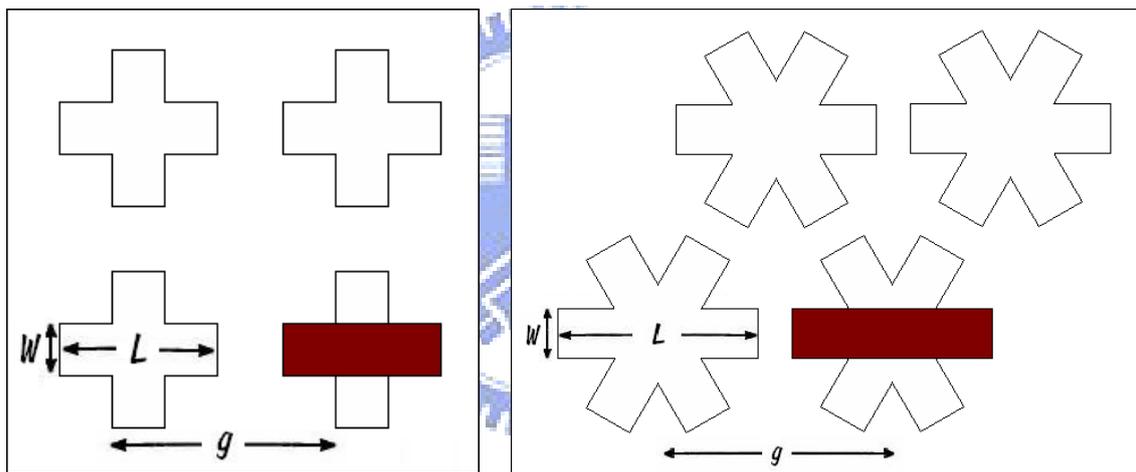


圖 2-1 正方形陣列和六角行陣列參數示意圖。

2-2 材料選擇

元件基本的結構為在基板上鋪上網狀金屬，如圖 2-2a 所示。

基板：矽、白色塑膠、黑色塑膠和鐵氟龍為目前本實驗室可選用的基板。圖 2-2b 為其在兆赫波波段的穿透率，透過觀察我們發現，白色塑膠的穿透率最強，理論上將會是最好的基板材料，然而在本碩論我所選用的材料並不是白色塑膠，最主要的原因是塑膠無法耐高溫，在製程上會有比較多的限制；且金屬（我們選用鋁）鍍在塑膠上，在後續的蝕刻製程易產生形變（pattern 會變形），如欲解決這些問題，將會使製程步驟困難化且複雜化。因此我選擇用矽來當基板。

金屬：一般最常使用的有鎳、銅、金、鉑…，而我選用的金屬材料為鋁，最主要的原因是後續蝕刻製程最為方便。

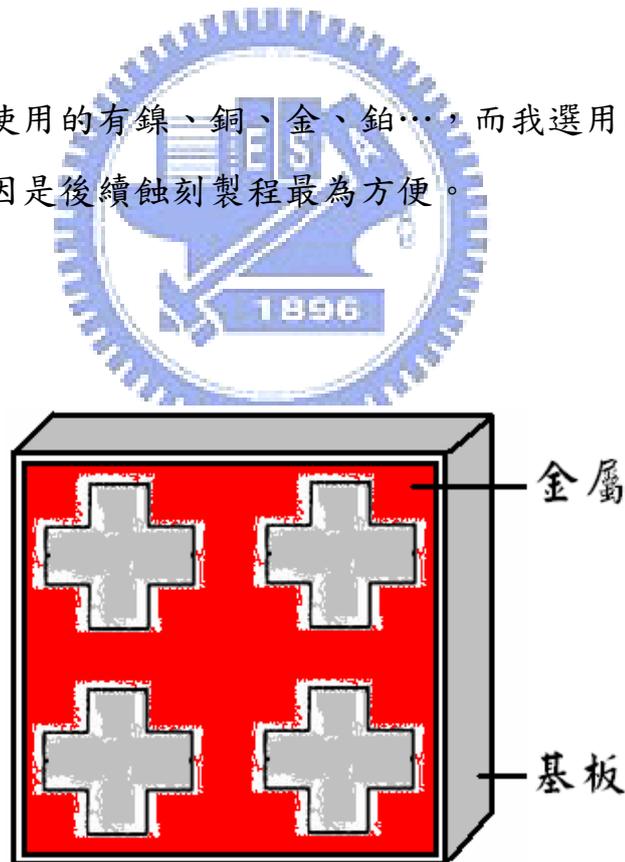


圖 2-2a 元件基本結構。

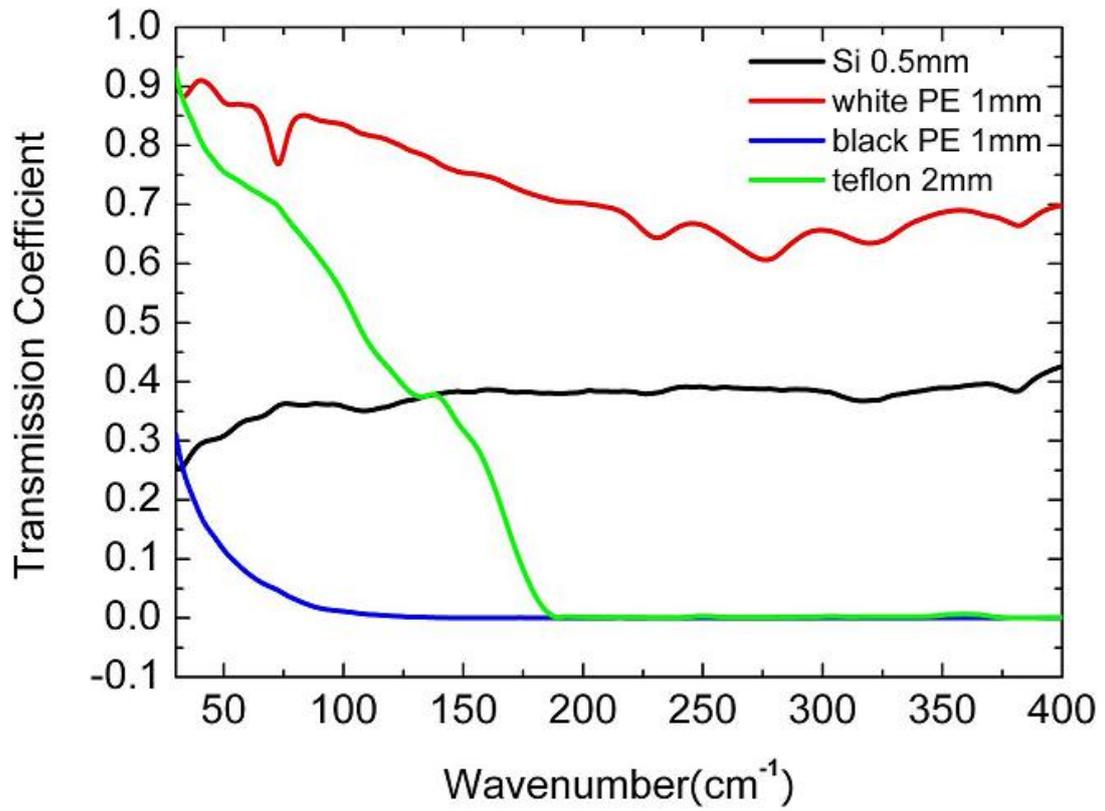


圖 2-2b 各種不同厚度材料在兆赫波波段的穿透率。

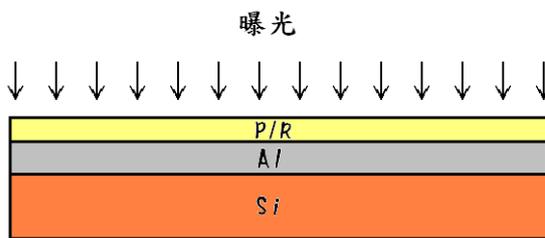


2-3 元件製程

製程步驟如圖所示：



- a. 將 Si 做 RCA cleaning。
- b. 在 Si 上鍍上厚度為 0.2um 的鋁。



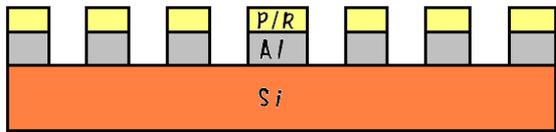
- c. 上 HMDS：用以加強金屬和光阻的附著力。
- d. 光阻：使用 FH6400 光阻液。
- e. spinner：1500 轉 15 秒；
3500 轉 25 秒。
- f. 軟烤（90°C）：時間 90 秒。
- g. 曝光：不加濾鏡，時間 20sec。

汞燈功率：中間 6.7；上 6.7；下 5.6；左 5.7；右 6.5。

（單位：mV）。



- h. 顯影：使用 FHD5 顯影液，時間 1min。
- i. 定影：用水定影，時間 5min。
- j. 硬烤（120°C）：時間 30min。

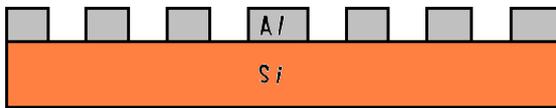


k. 蝕刻：用鋁酸蝕刻鋁，

加熱器刻度調八，加熱溶液 330 秒（約 40~45°C 即可），

浸泡時間以目測為主（約 60 秒）。

鋁酸比例： $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{H}_2\text{O} = 50 : 2 : 10 : 9$ 。



l. 去光阻：用丙酮去光阻，以震盪器震一分鐘即可。

m. 最後用 D. I. water 沖泡五分鐘，以氮氣吹乾，元件即完成。

圖 2-3 為週期為 15 μm ， $L=9\mu\text{m}$ ， $W=3\mu\text{m}$ 之金屬網，其中白色部分為金屬鋁，黑色部分為 Si。其中 3 μm 為此製程的極限，之後的元件設計線寬都將會大於 3 μm 。

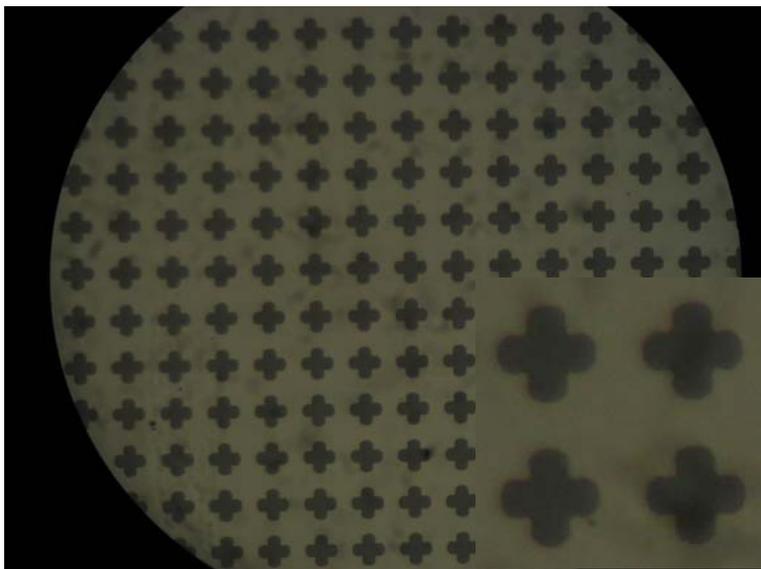


圖 2-3 光學顯微鏡所拍攝之金屬網。

2-4 量測

我們所使用的量測儀器是型號為“Bruker IFS 66v / S”的 FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)，如圖 2-4a 所示。

首先我先簡單介紹其基本的量測原理。如圖 2-4b 所示[15]。S 為訊號光源，M 為可將光源全反射的鏡子，其中 M1 是被固定住不可移動，而 M2 則是允許有 x 的位移，D 則是偵測器。而我們所使用的光源為汞燈。

當汞燈光源發射後首先碰到的是分光鏡，而此時分光鏡可以將光源一半反射，一半穿透，而反射的光源會在 M1 產生全反射後並再一次回到分光鏡，此時反射的光源所走過的距離為 $2L$ ；同樣的穿透的光源亦會在 M2 產生全反射並再一次的回到分光鏡，但此穿透的光源所走過的距離為 $2(L+x)$ 。故當兩道反射後光源在分光鏡重新結合時，由於兩道光源有 $2x$ 差距的光延遲，故因而產生干涉。最後由偵測器偵測出其干涉圖。

然而干涉圖並不利於我們的分析，故接下來我們將所量測到的干涉圖透過傅立葉轉換為頻譜圖，如下：

$$\Rightarrow S(k \cdot \Delta \nu) = \sum_{n=0}^{N-1} I(n \Delta x) \exp(i2 \pi nk/N) \quad \dots\dots[01]$$

其中 $I(n \cdot \Delta x)$ 為量測所得之干涉的資料， $S(k \cdot \Delta \nu)$ 為轉換後的頻譜資料。其中 $\Delta \nu$ 所代表的是頻譜的解析度，當 $\Delta \nu$ 愈小，解析度會越高。然而 $\Delta \nu = 1/(N \cdot \Delta x)$ ，其中 N 為量測的點數，故為了提升解析度， N 必須增加，此時量測的時間就會變長。而表 2-4 為我們量測時 FTIR 所設定的參數。



圖 2-4a 本實驗室所使用的 FT-IR。

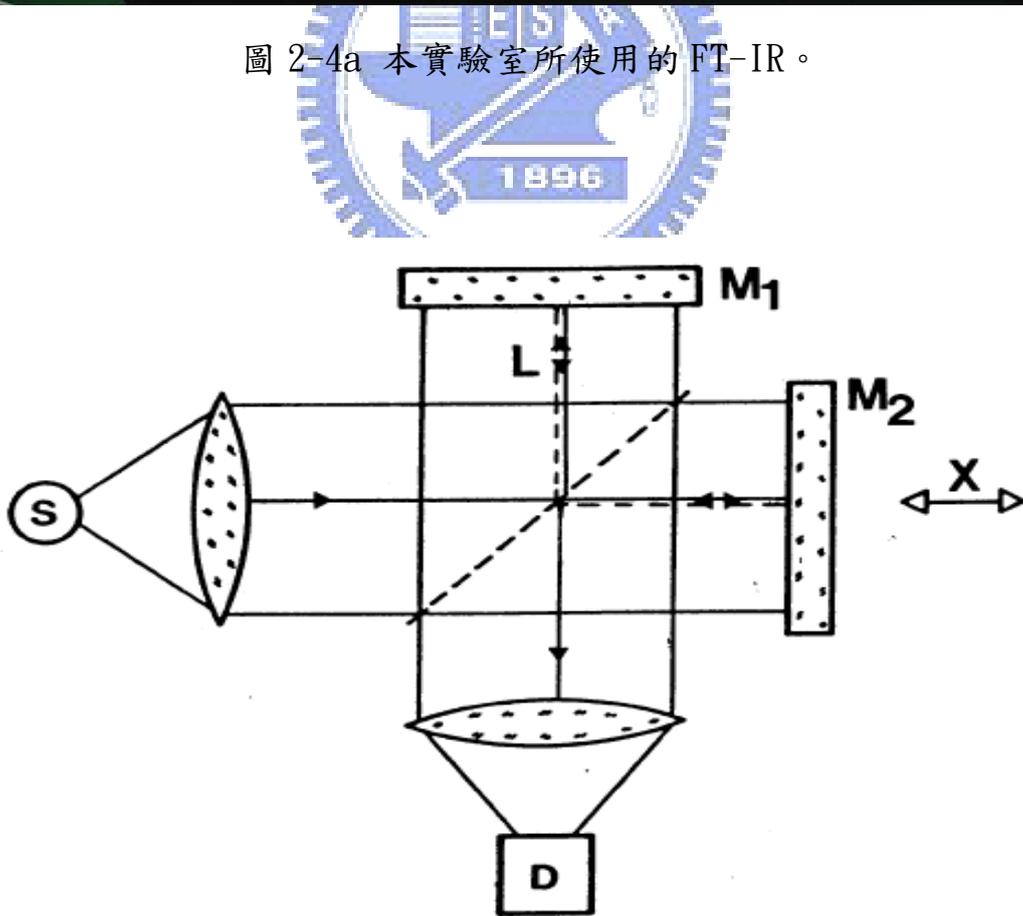


圖 2-4b 邁克森干涉儀略圖[15]。

由於我們所量到資料為相對強度，並非穿透率。為了獲得穿透率，我們首先必須量測的是汞燈穿透矽基板的強度 $S_i(\nu)$ ，如圖 2-4c 所示，接下來要量測的則是汞燈穿透濾波器元件的強度 $M(\nu)$ ，如圖 2-4c 所示，最後將兩者相除，即 $T(\nu) = M(\nu) / S_i(\nu)$ ，如圖 2-3d 所示，則可得金屬網的穿透率。

另外由圖 2-4c 我們還可以發現，在 $30\text{cm}^{-1} \sim 50\text{cm}^{-1}$ 間，由於穿透過矽基板的訊號非常微弱，故誤差相對於其他波數 ($50\text{cm}^{-1} \sim 400\text{cm}^{-1}$)，亦會較大一點。

Apodization Function	Blackman-Harris 3-Term
End Frequency Limit for File	1436.000000
Start Frequency Limit for File	0.000000
Phase Resolution	113.000000
Phase Correction Mode	Power Spectrum
Stored Phase Mode	No
Zero Filling Factor	32
Aperture Setting	9 mm
Beamsplitter Setting	Mylar 6
Measurement Channel	Front
Detector Setting	Bolometer
Low Pass Filter	1 ; 16 KHz
Source Setting	FIR source
Scanner Velocity	6 ; 10.0 KHz
Signal Gain, Sample	1
Signal Gain, Background	1
Acquisition Mode	Double Sided, Forward-Backward
Correlation Test Mode	No
Delay Before Measurement	0
Stabilization Delay	0
Wanted High Frequency Limit	1436.000000
Wanted Low Frequency Limit	0.000000
Sample Scans	500
Result Spectrum	Transmittance
Resolution	4.000000

表 2-4 量測時，FT-IR 所設定的參數。

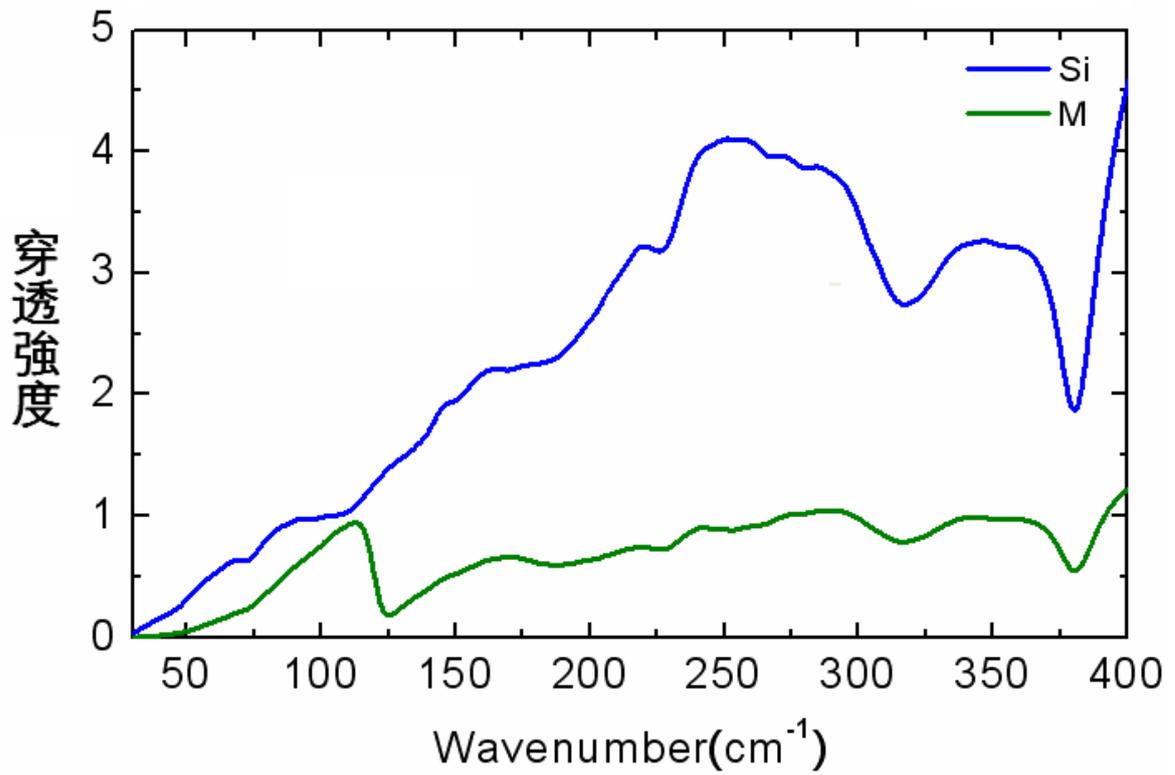


圖 2-4c 汞燈穿透矽和金屬網所偵測到的穿透強度。

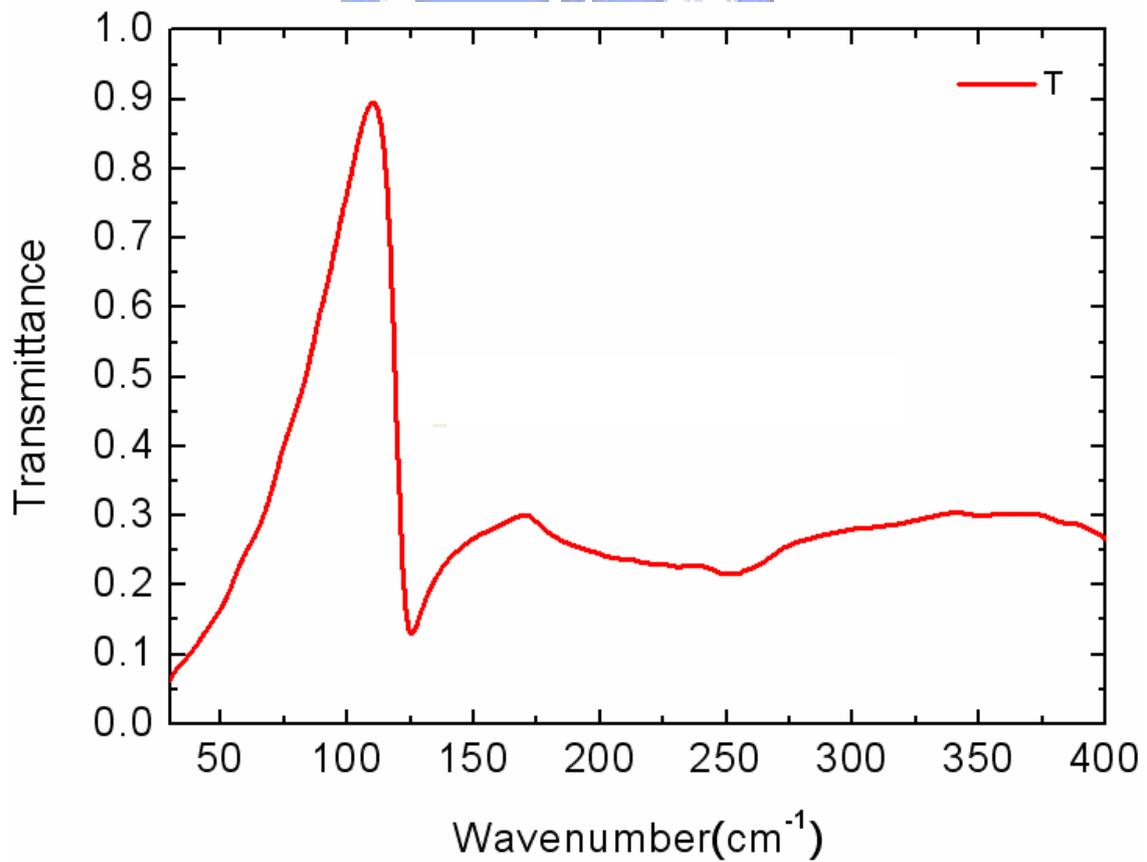


圖 2-4d 將 $M(\nu) / Si(\nu)$ ，所得之穿透率 T。

三、薄金屬正方形陣列十字架挖洞濾波器穿透率之實驗結果與討論

概要說明

在兆赫波波段下 (1T~10T)，目前在使用薄金屬，正方形陣列下，已有許多人討論利用長方形挖洞，改變其透光面積，長寬比，入射角度等所造成的異常穿透[16]。然而由於長方形挖洞其穿透率並不像十字架挖洞所擁有的較大穿透率之峯值以及較窄之半頻寬，如圖 3-0 所示，因此我們改用十字架挖洞，透過調整週期以控制穿透率之峯值，並改變其透光面積、長寬比、破壞對稱性等等，期望從中得到最佳濾波效果之濾波器。

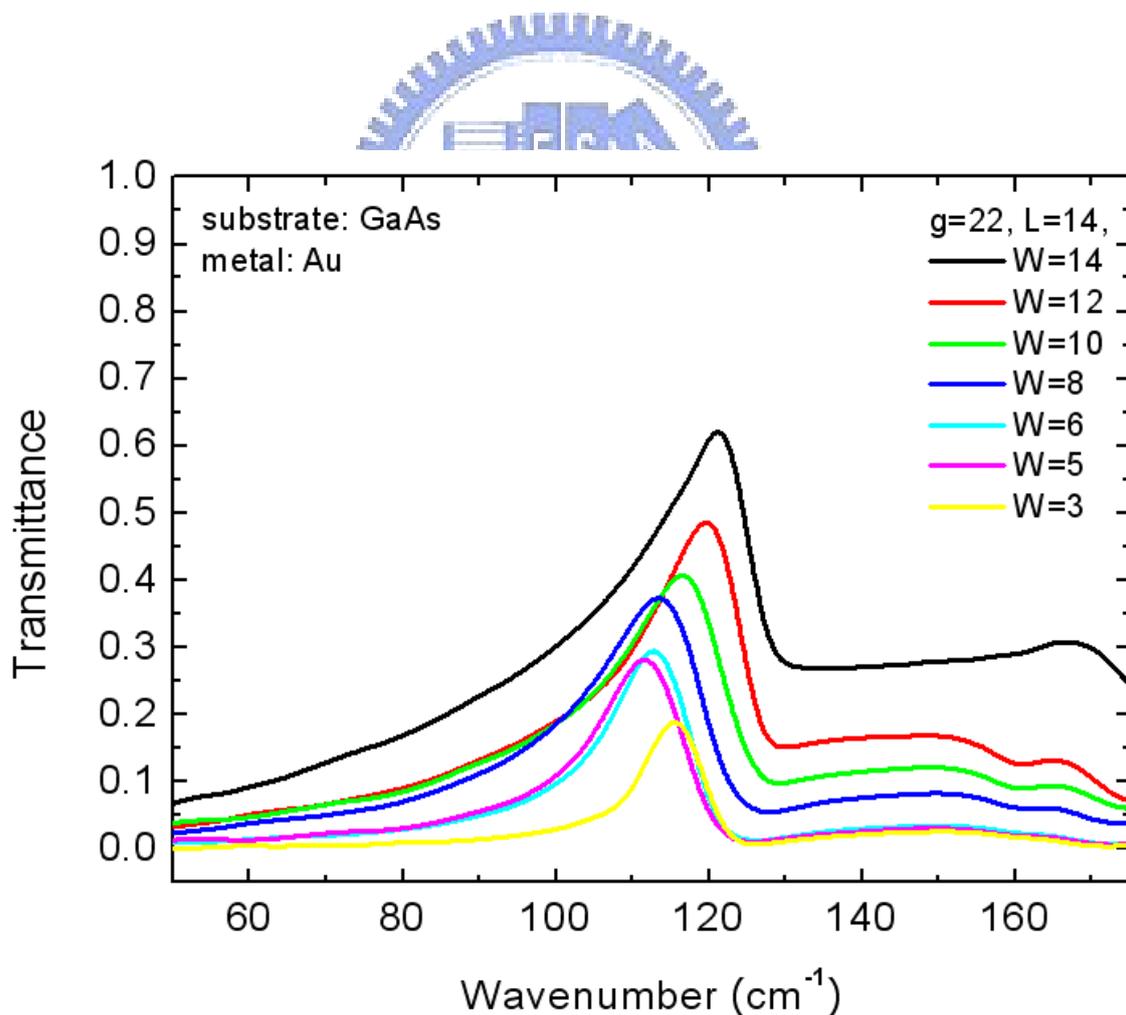


圖 3-0 我們在正方形陣列，長方形挖洞下，固定週期為 22μm，改變其長寬比所量測之穿透率頻譜。

3-1 正方形陣列不同的十字架透光面積

首先我們先簡單談一下何謂異常穿透，在傳統幾何光學概念中，當光穿透一金屬網時，其穿透率應該恰為：

$$\text{透光面積} / \text{總面積} \quad (\%),$$

但由於金屬網週期結構，在某些特定波段會發生強烈共振，使穿透率遠遠大於透光面積比例，我們即稱此現象為異常穿透。

在光穿透過一金屬網濾波器後，若不考慮異常穿透的情況下，當透光面積越大，則穿透率會等比例跟著提高；而在考慮異常穿透情況下，此時穿透率雖不正比於透光面積，但亦會受透光面積大小所影響。因此此節我們固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ，以及長寬比 $L/W=3$ ，改變其透光面積，如圖 3-1a 所示，我們使 $L=3W=21\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ 、 $9\mu\text{m}$ ，所量測出來的頻譜如圖 3-1b 所示，相同參數之模擬如圖 3-1c 所示；另外我們將透光面積比例與峰值穿透率與 stop-band 穿透率做關係圖，如 3-1d、3-1e 所示。由此頻譜圖我們發現三個現象：

- <1> 峰值（異常穿透處）穿透率會隨著透光面積比例變小而下降，然而當透光面積比例低於 20%，其鋒直穿透率會驟降，如 3-1d 所示。由此可以知道，為了得到一穿透率高的濾波器，我們的透光面積比例必須使其大於 20%。
- <2> stop-band 穿透率會隨著透光面積比例變小而下降，如圖 3-1d 所示。因此，由<1>和<2>我們知道，為了得到一可用之濾波器，我們必須將透光面積比例控制在 20%~40%之間。
- <3> 此外，我們還意外發現了一個現象，就是當透光面積越來越小，其峰值會藍移（紅移：往常波長移動；藍移：往短波長移動）。而當我們將十字架 pattern 改成正方形，同樣改變其透光面積，邊長 L 分別等於 $21\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 和 $12\mu\text{m}$ ，如圖 3-1f 所示。我們卻發現此時其鋒值並不會隨著透光面積紅移或藍移。

然而關於這個奇特的現象，我們目前尚無法明確了解明白其中主要的原因。

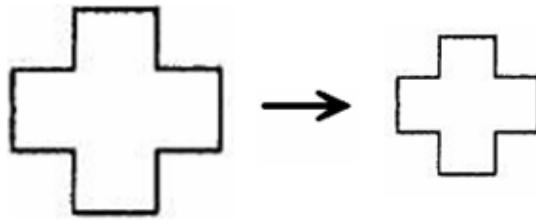


圖 3-1a 十字架等比例縮小示意圖。

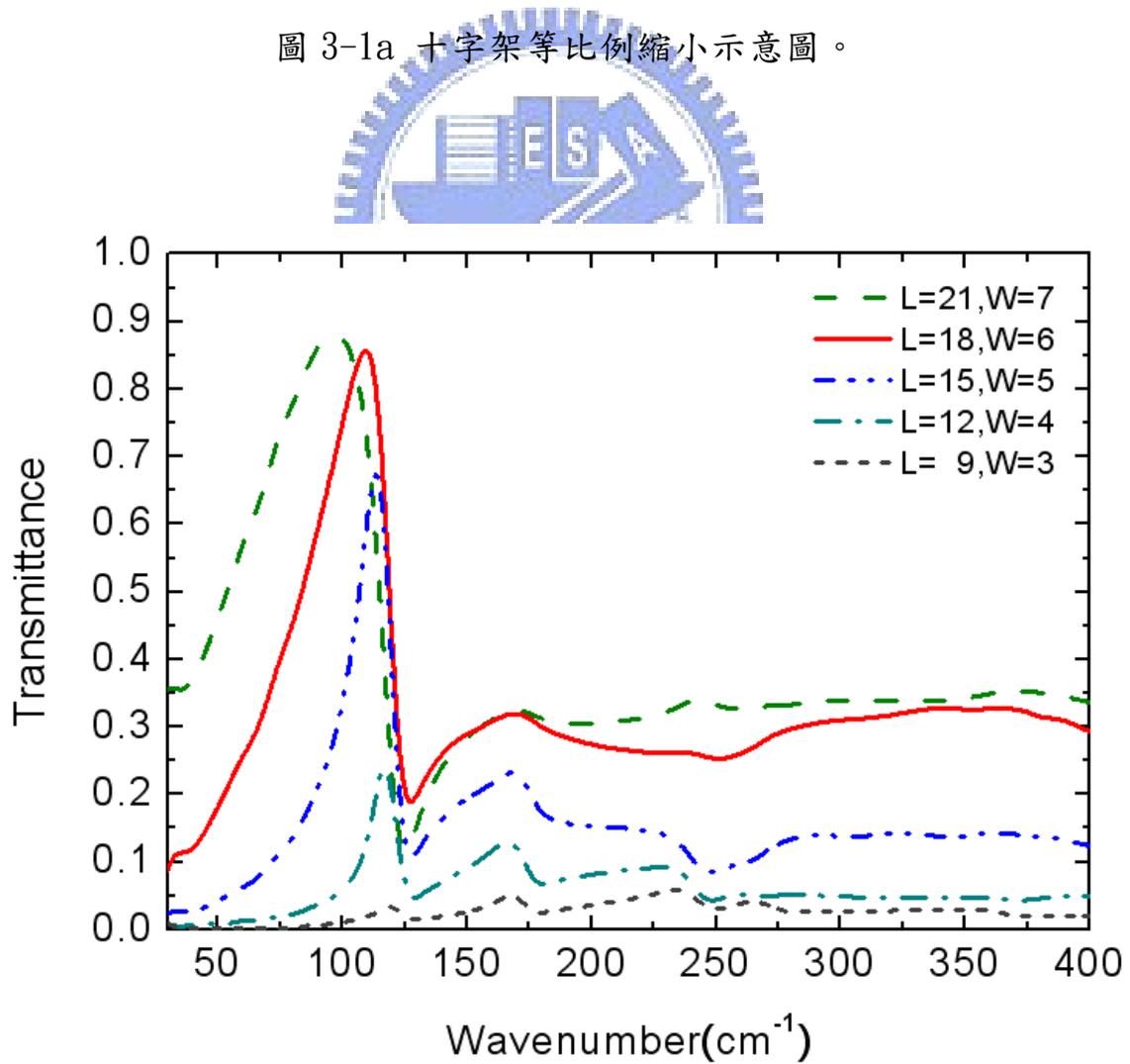


圖 3-1b 正方形陣列，十字架挖洞，不同透光面積。

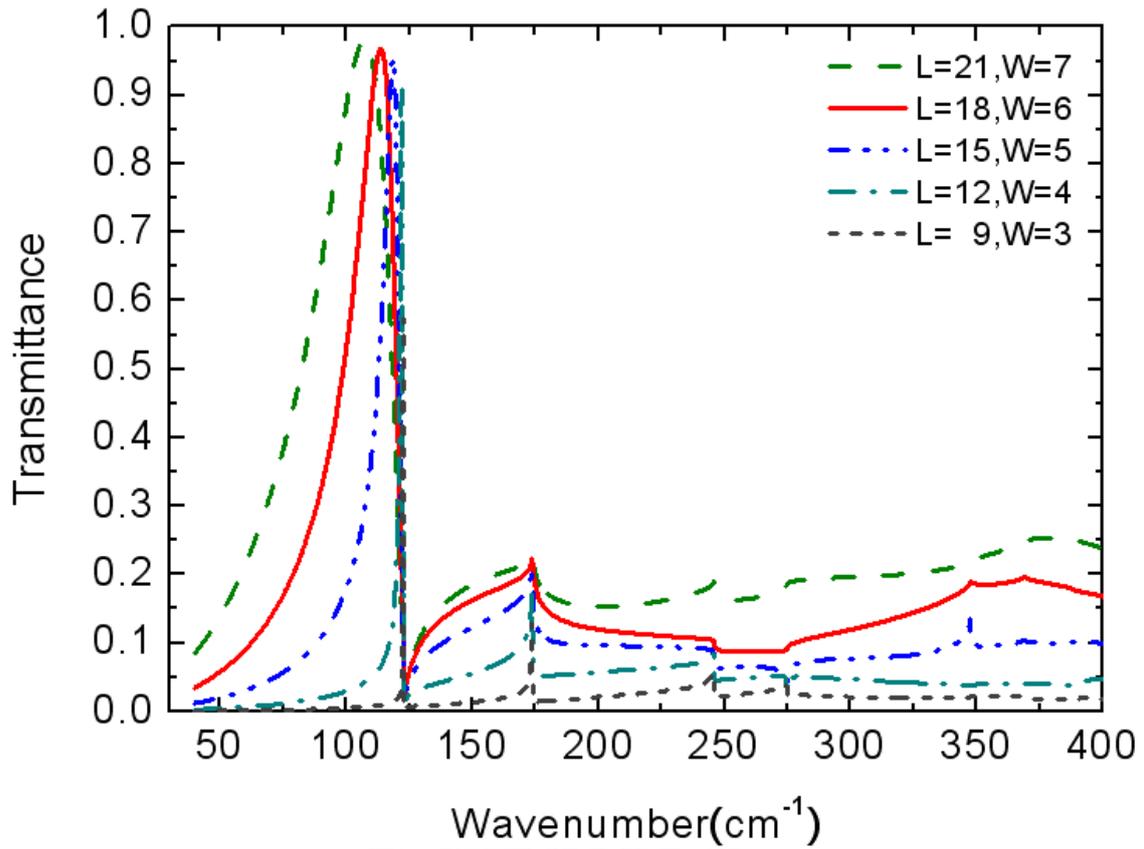


圖 3-1c 參數同 3-1b 之模擬。

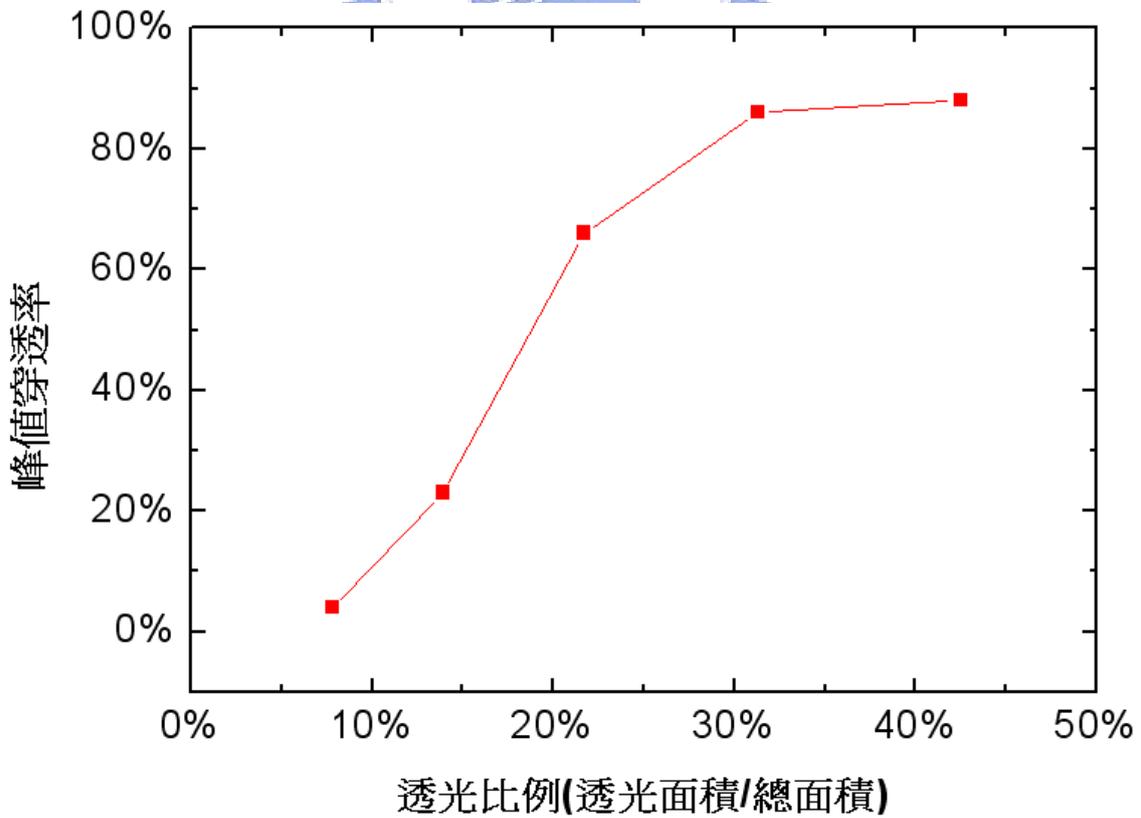


圖 3-1d 透光面積比例和峰值穿透率的關係圖。

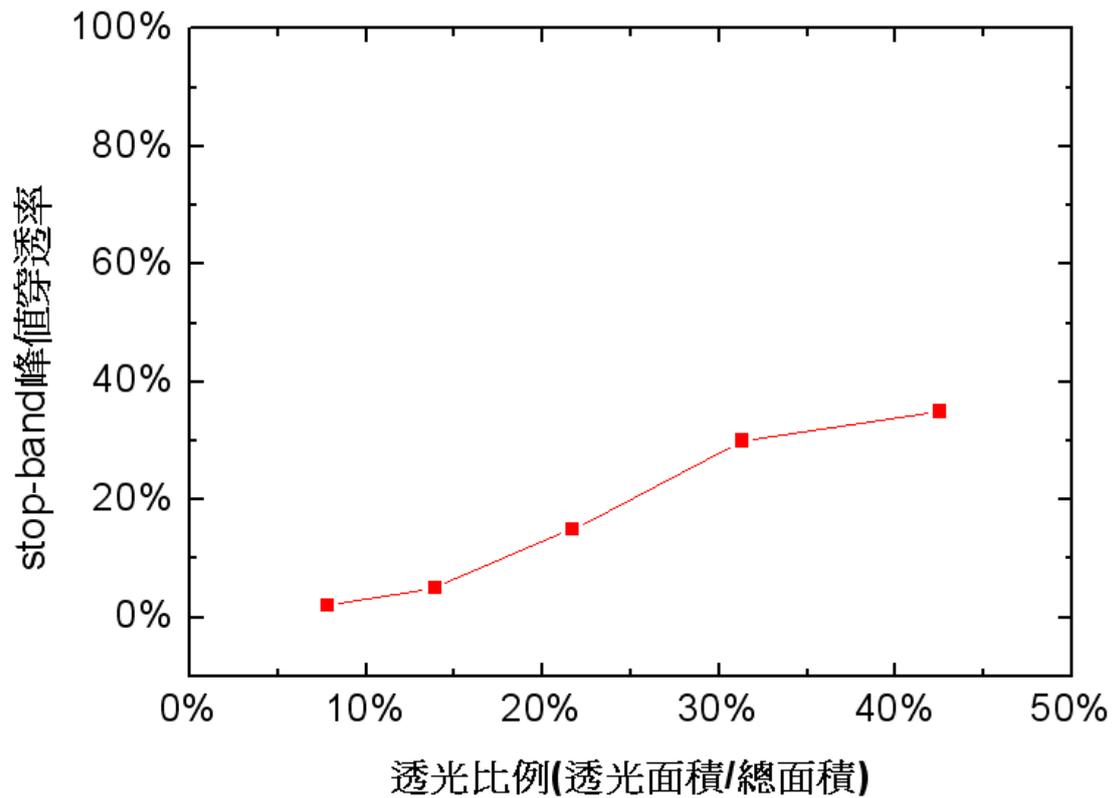


圖 3-1e 透光面積比例和 stop-band 穿透率的關係圖。

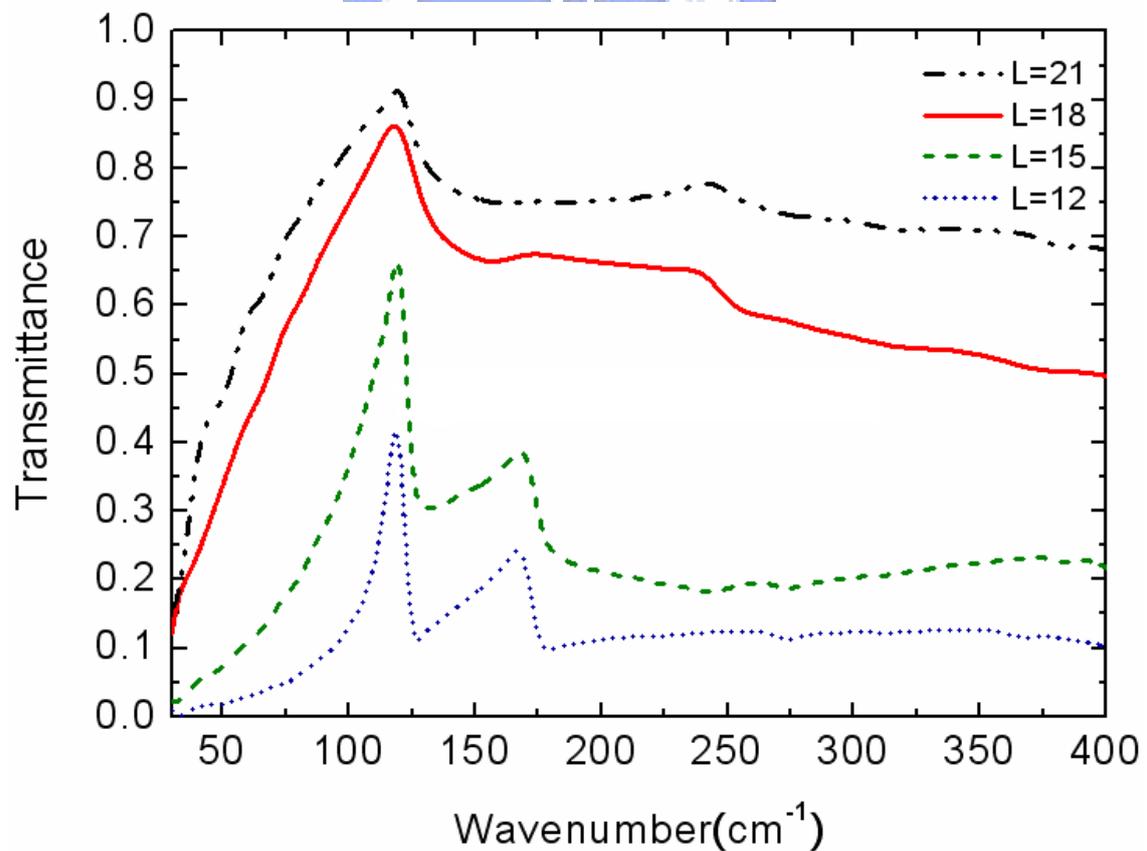


圖 3-1f 正方形陣列，正方形挖洞，不同透光面積，其中 L 為邊長。

3-2 正方形陣列不同的十字架長寬比

週期和洞形狀大小是造成與影響共振的主因。而在當十字架越來越細，我們預期週期造成的共振態不變，但十字架洞造成的共振態會減少，使半高寬下降。因此接下來我們要改變的參數是十字架的長寬比，如圖 3-2a 所示。我們固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L=18\mu\text{m}$ ，控制 $W=18\mu\text{m}$ 、 $14\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $6\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ ，其中 $L=18\mu\text{m}$ ， $W=18\mu\text{m}$ 實際上為正方形 pattern，所量測出來的頻譜如圖 3-2b 所示，相同參數之模擬如圖 3-2c 所示。由此頻譜圖我們同樣可以發現一些現象如下：

- <1> 穿透率會隨著長寬比變大而下降，但會發生此現象並不是長寬比所造成，而是透光面積。因為我固定的參數是 g 和 L ，變數是 W ，當 W 變小，長寬比雖然會變大，但同時透光面積亦會變小。
- <2> 半高寬會隨著長寬比變大而下降，這和我們的預期是相吻合的。我們可以使用不同的長寬比去控制其半高寬。但由於長寬比越大，相對透光面積就會越小，而由 3-1 我們知道，透光面積比例不要低於 20% 才能使峰值穿透率維持一定大小，因此實際運用上，長寬比並不能夠無限縮小，因此濾波器之半高寬會有其極限。
- <3> 隨著長寬比越來越大，其峰值會紅移。然而由於此時我們的透光面積亦越來越小，而由 3-1 我們知道透光面積比例會改變峰值波長，因此造成峰值紅移的原因不單單只是長寬比所造成的。而透過 3-1 和此節，我們還是無法明確了解其峰值會發生偏移主要的原因。

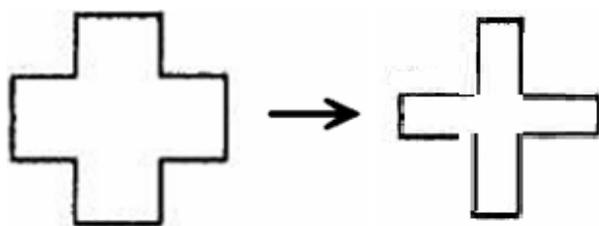


圖 3-2a 十字架不同長寬比示意圖。

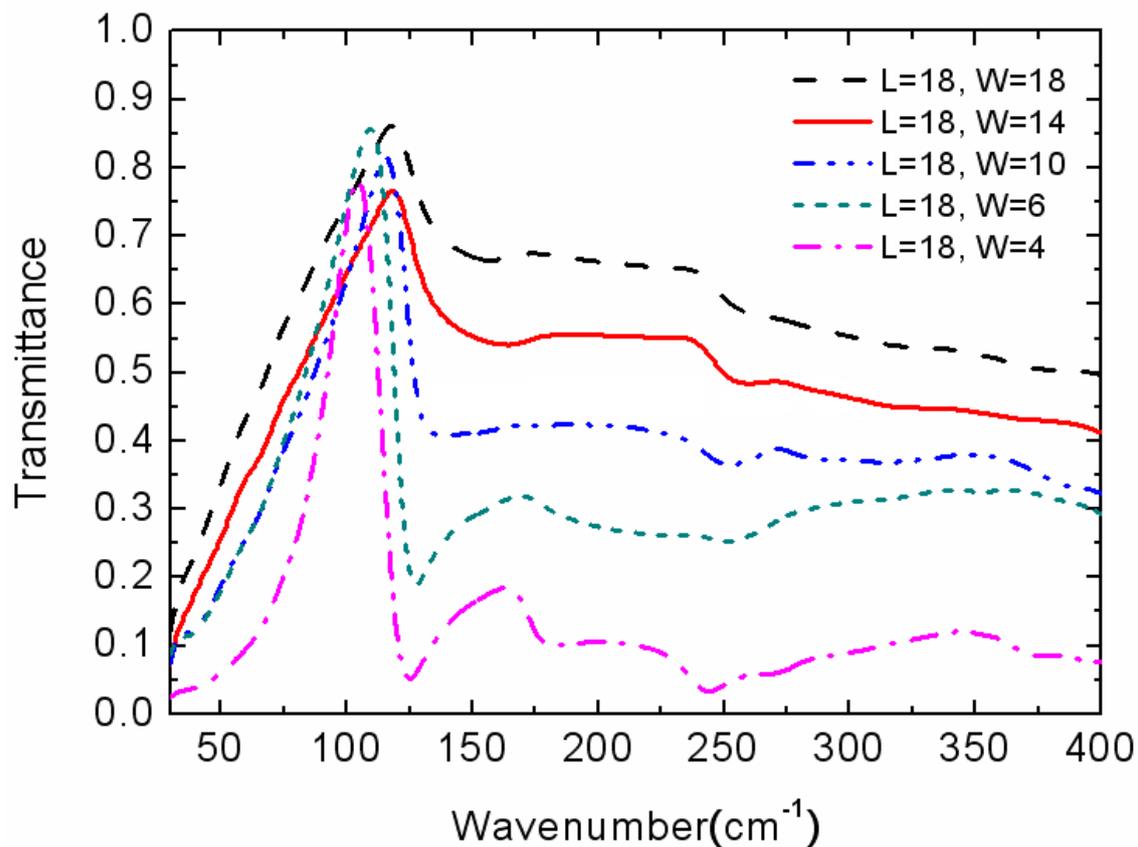


圖 3-2b 正方形陣列，十字架挖洞，不同長寬比。

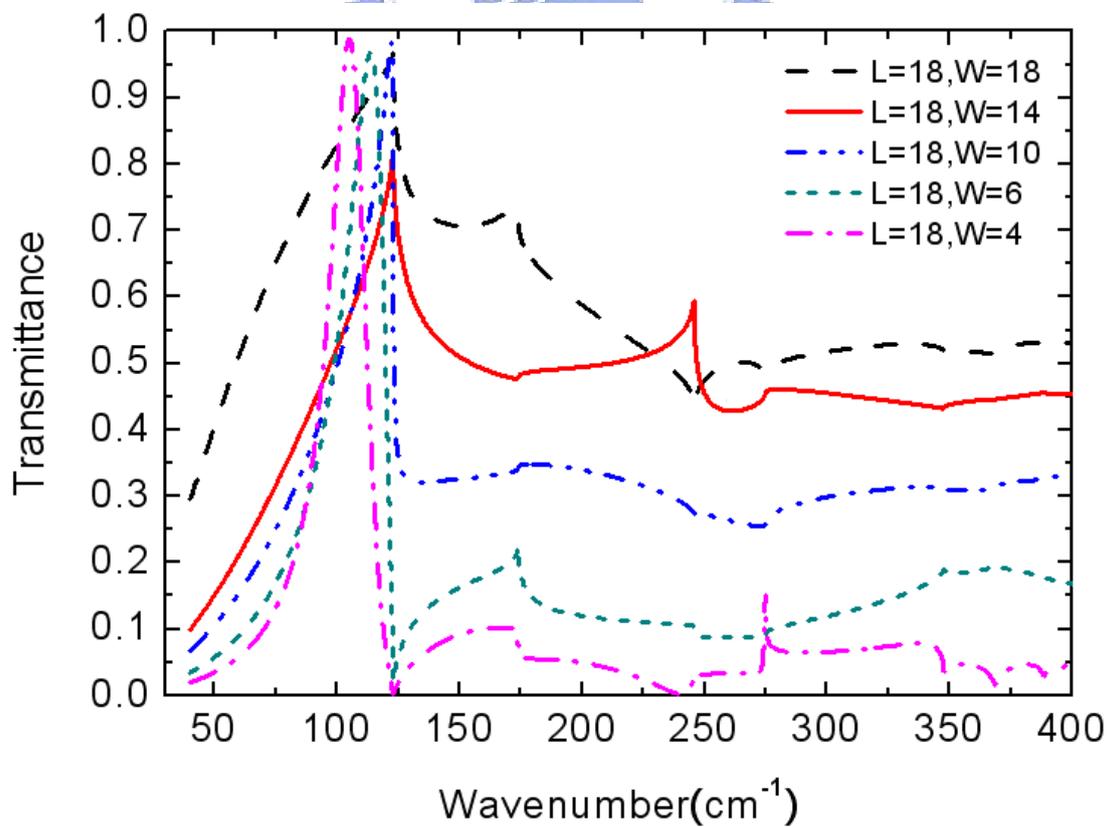


圖 3-2c 參數同 3-1b 之模擬。

3-3 不同週期正方形陣列正方形挖洞

由 3-1, 3-2 我們可以知道，十字架 pattern 不論是透光面積或是長寬比，皆會使濾波器峰值發生改變；而正方形 pattern 透光面積並不會改變峰值位置，且長寬比=1。因此此節在討論週期對峰值的影響，我們將不選用十字架 pattern，而改用正方形 pattern。

我們使週期 $g=50\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ ，其穿透率頻譜如圖 3-3b 所示，相同參數之模擬如圖 3-3c 所示，而週期 g 和峰值關係圖如圖 3-3d 所示。由圖 3-3d 我們發現，將週期 g 乘以矽基板的折射率=3.5，恰會等於峰值波長。因此我們合理猜測，當穿透過金屬網結構的入射光波長恰等於 $g \times n$ 時，會在矽基板上形成表面波並儲存能量，如圖 3-3a 所示。

在挖正方形 pattern 的情況下，我們可以很輕易且精確的透過週期去控制峰值波長；然而在挖十字架 pattern 的情況下，由於峰值波長會隨著長寬比或透光面積紅移或藍移，因此我們只能大略估算出峰值的波長，而無法明確設計出峰值的波長，而這也是十字架 pattern 相較於正方形 pattern 唯一的缺點。

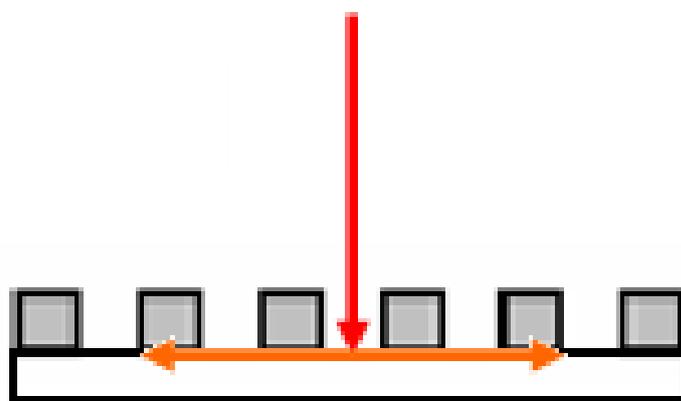


圖 3-3a 光穿透金屬網，在矽基板表面形成表面波示意圖。

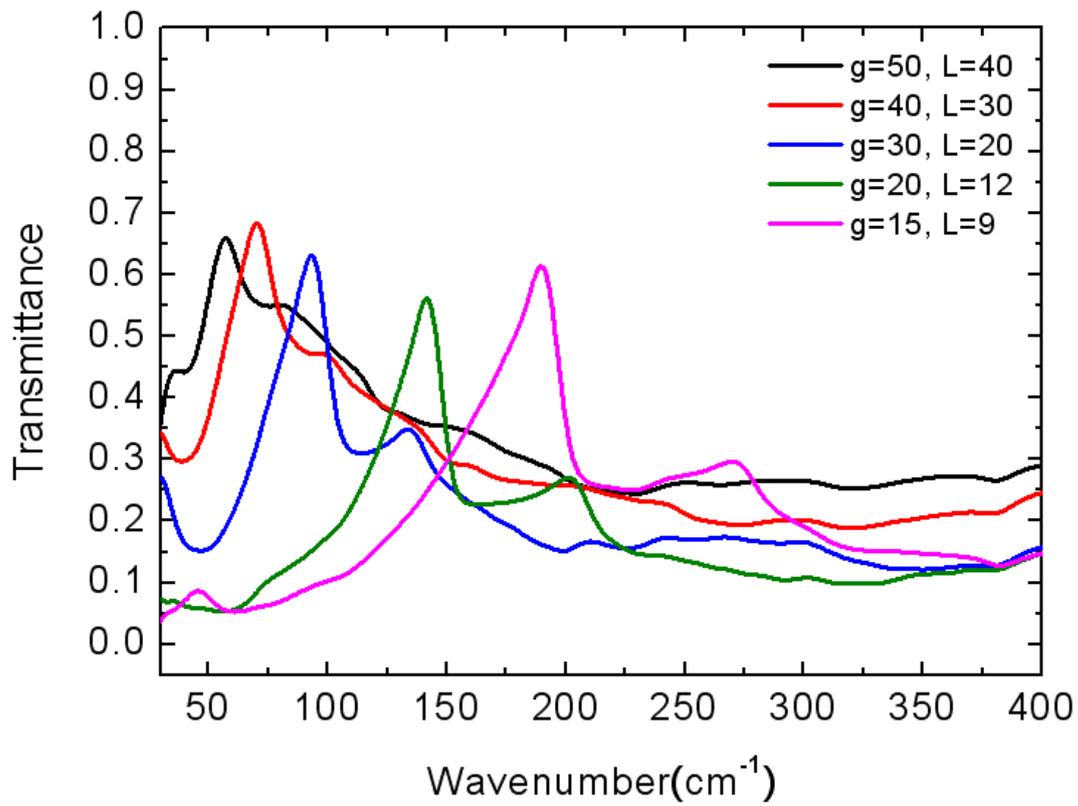


圖 3-3b 正方形陣列，正方形挖洞，不同週期之穿透率，其中 g 為週期， L 為正方形 pattern 邊長。

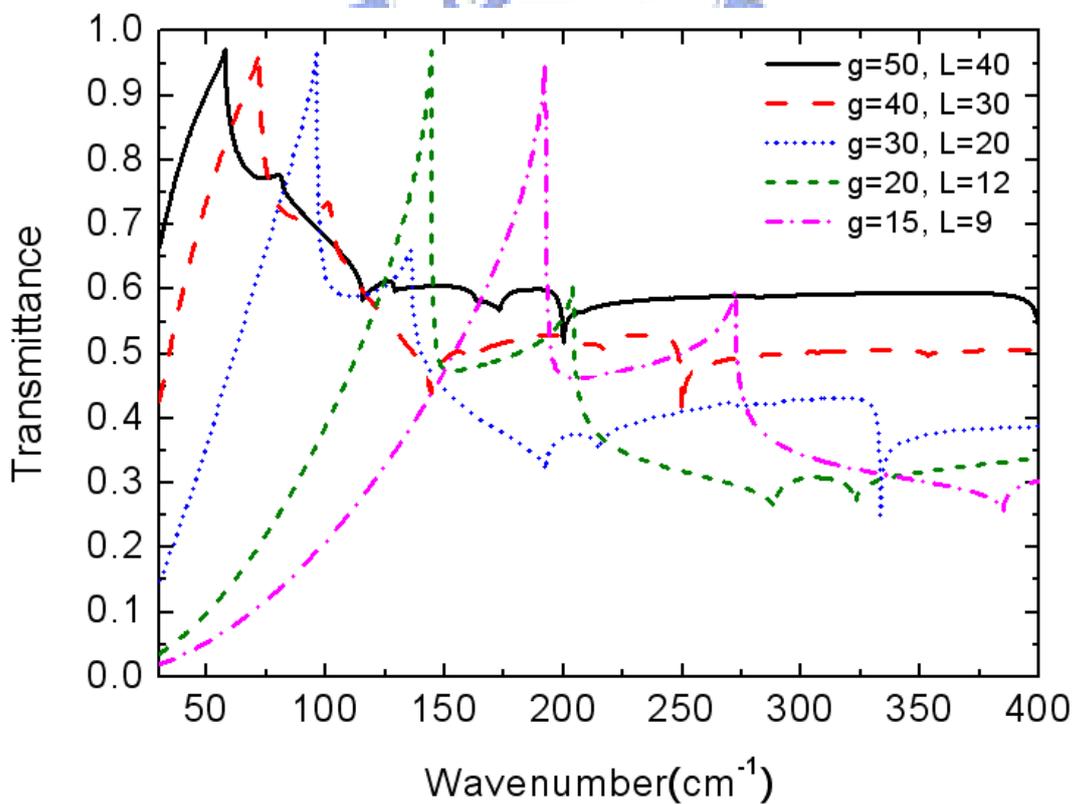


圖 3-3c 參數同 3-3b 之模擬。

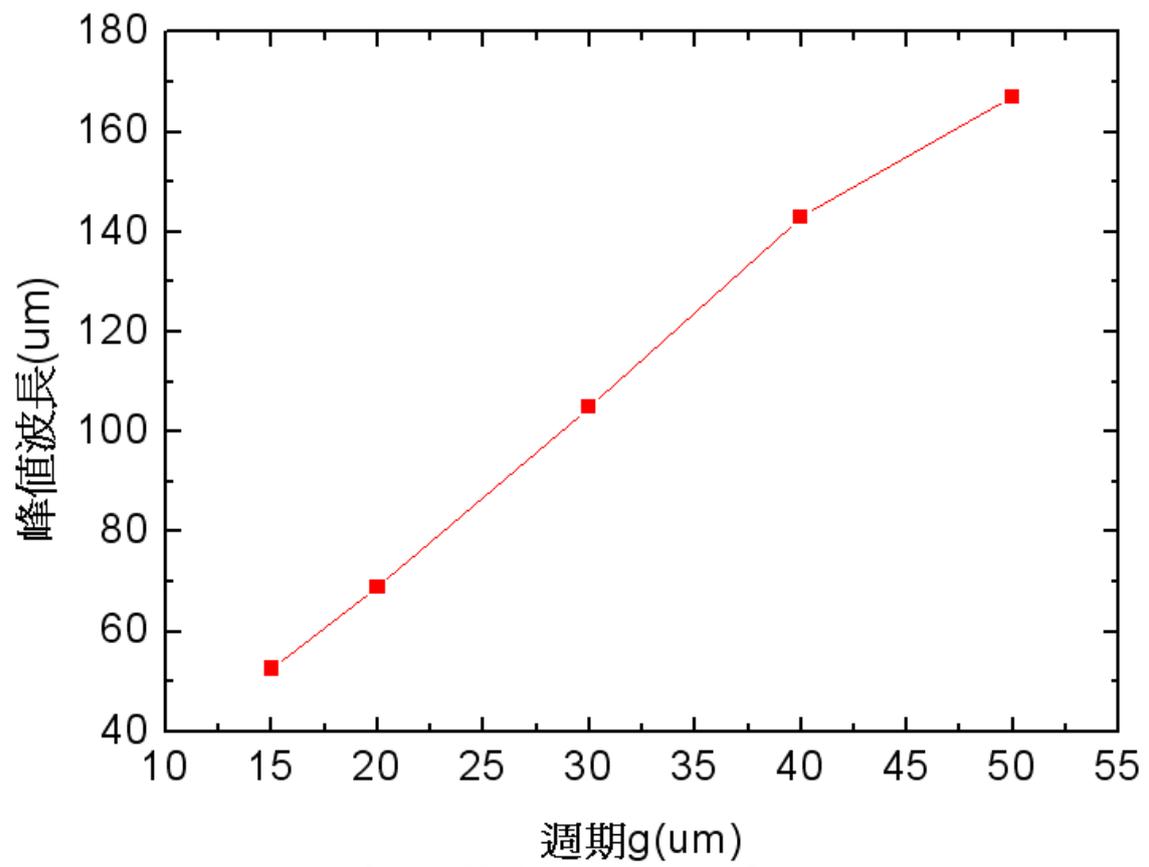


圖 3-3d 週期 g 和峰值波長關係圖。



3-4 正方形陣列十字架旋轉

我們發現，不論是正方形或是十字架，我們會使洞和週期對稱，以加強其共振，進而提高峰值穿透率。然而若我們破壞對稱呢？首先我們假想金屬網為二維晶格結構，由週期陣列（二維晶格）和所挖的洞（基元）所組成，接著將所挖的洞旋轉，如圖 3-4a<1>和 3-4a<2>所示。我們知道不同晶格方向，例如 $(1, 0)$ 和 $(1, 1)$ ，其共振態會不一樣，所對應到的共振波長亦不相同。而我們預期在破壞對稱性後，峰值附近共振態會減少，使半高寬會變窄。

我們使週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L=18\mu\text{m}$ ， $W=6\mu\text{m}$ ，將十字架旋轉 0° 、 15° 、 30° 和 45° ，其穿透率頻譜如圖 3-4b 所示。由圖 3-4b 我們發現，當十字架長邊和晶格對稱（即長邊方向和晶格方向對齊）時，如圖 3-4a<1>所示，其共振態增加，因此使得半高寬變大；而當我們將其旋轉使十字架長邊未和晶格對稱時，長邊對稱所造成的共振態將消失，使得半高寬變窄。因此除了改變十字架長寬比，破壞十字架長邊對稱性亦可以改變峰值半高寬。

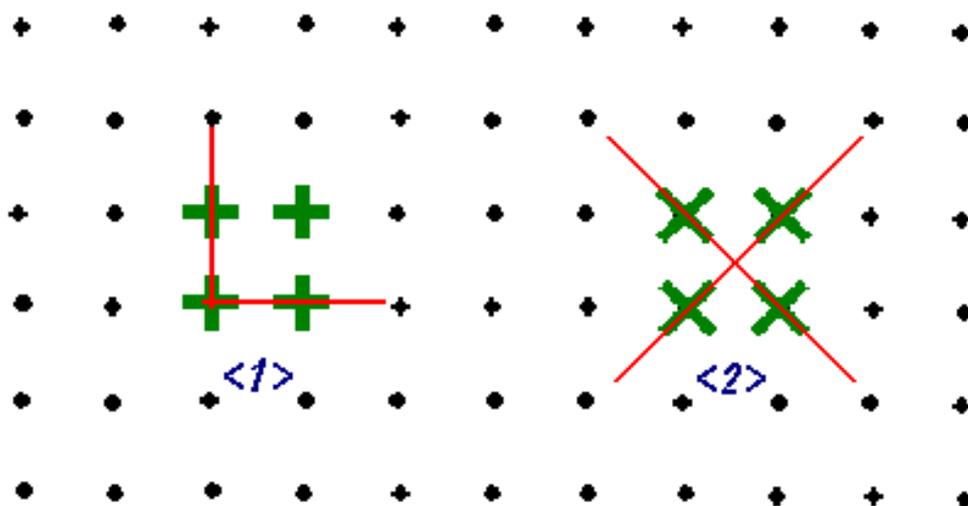


圖 3-4a 將金屬網視為二維晶格結構，

由週期陣列（二維晶格）和所挖的洞（基元）所組成。

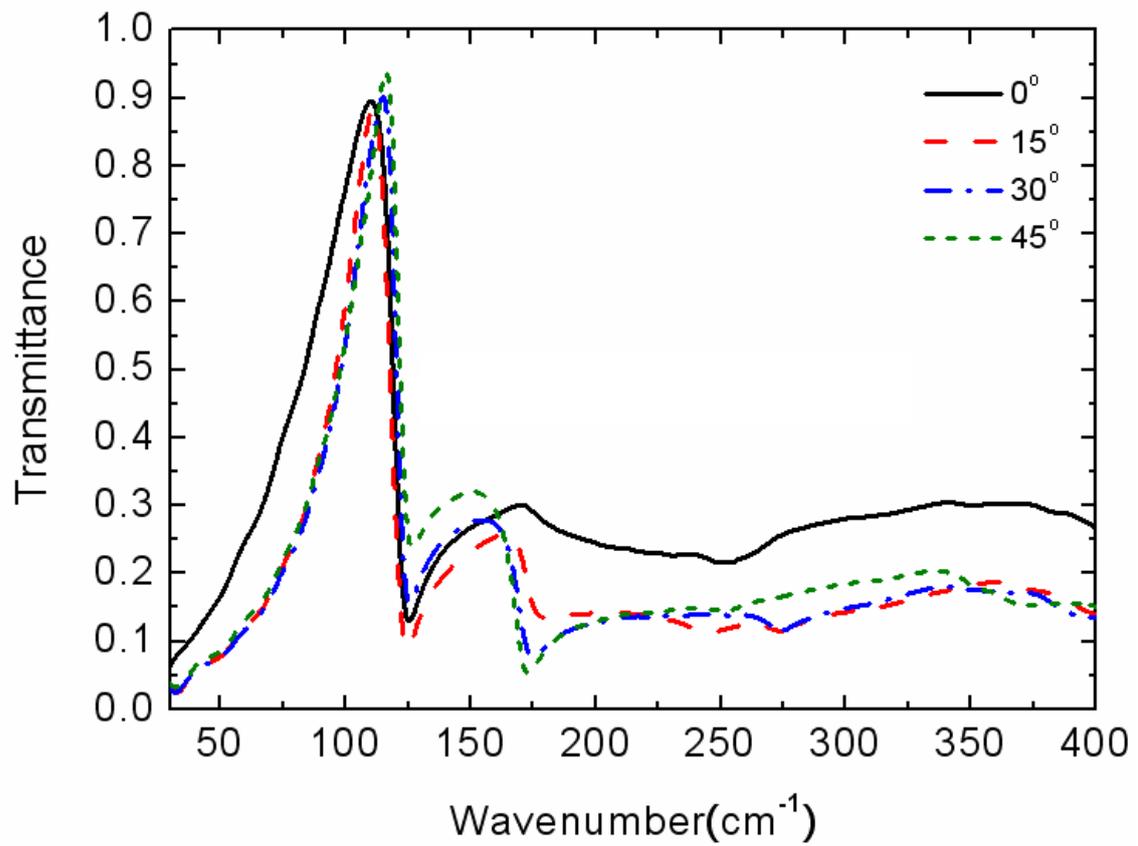


圖 3-4b 正方形陣列，十字架挖洞，將十字架作旋轉。



3-5 正方形陣列橫移

在 3-4，我們將金屬網視為由週期陣列（二維晶格）和所挖的洞（基元）所組成，此節我們將固定基元，改變其晶格，如圖 3-5a 所示。

我們使週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L=18\mu\text{m}$ ， $W=6\mu\text{m}$ ，將十字架 pattern 分別橫移 $0g$ 、 $0.125g$ 、 $0.25g$ 、 $0.375g$ 和 $0.5g$ ，其穿透率頻譜如圖 3-5b 所示。由圖 3-5b 我們發現，穿透率峯值會隨著晶格的改變而下降，而第二穿透率峰值則會隨著晶格的改變而紅移，甚至當橫移量為 $0.5g$ 時，我們可以很清楚的觀察到，它會進一步的和主要穿透率峰值融合在一起，且從中我們可以觀察出，主要峰值和第二共振峰值，其共振態是獨立的。而我們在下一章節，將利用不同的晶格和不同形狀的基元，設計出穿透率更高的濾波器。

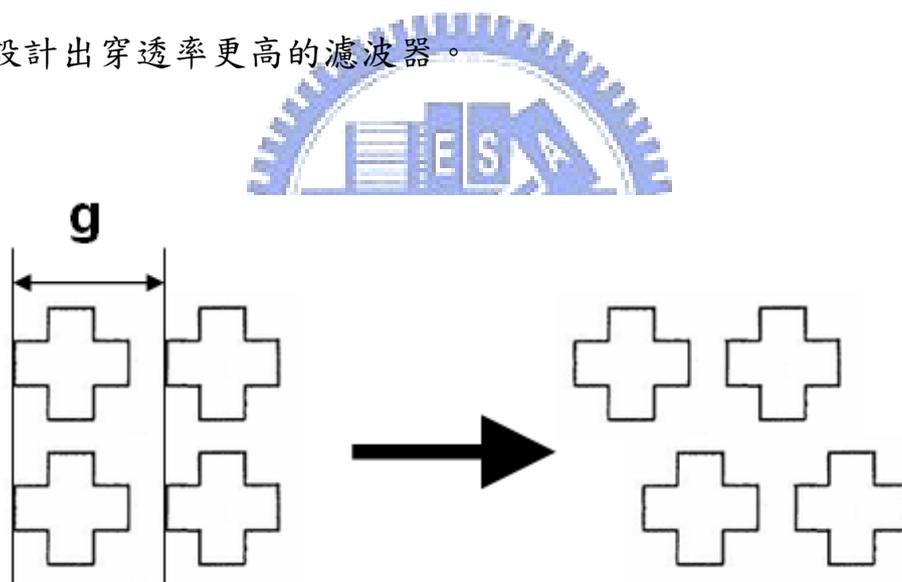


圖 3-5a 將十字架 pattern shift，改變其晶格。

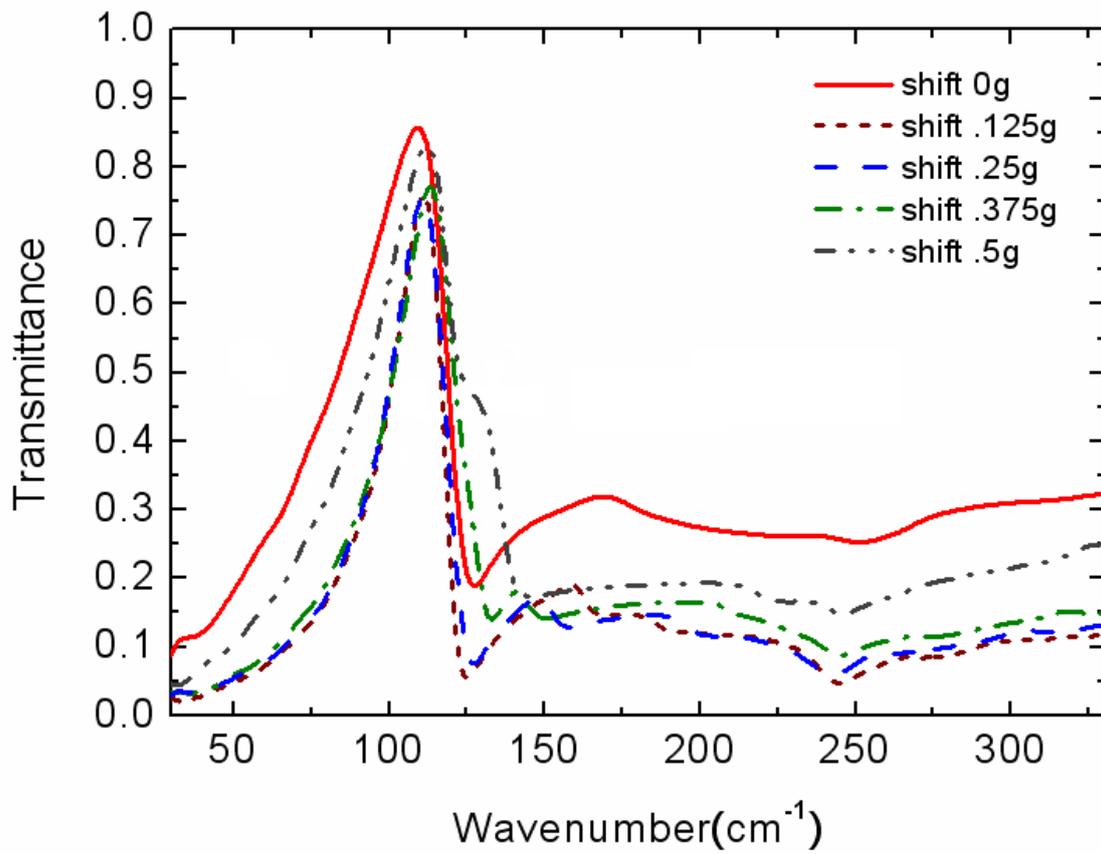


圖 3-5b 正方形陣列，十字架挖洞，改變其晶格。
其中週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L=18\mu\text{m}$ ， $W=6\mu\text{m}$ 。

四、改良式濾波器穿透效率 之實驗結果與討論

概要說明

由第三章的討論我們發現，運用正方形陣列、十字架挖洞的濾波器雖然已有不錯的濾波效果，但我們是否還有什方法可以再進一步的去提升濾波器效能呢？

<1>峰值穿透率：首先我們想到的是利用六角形陣列雪花狀挖洞，如圖 4-0 所示。由於六角行陣列將可以提供三個方向的共振，因此我們預期它可以比正方形陣列（僅提供兩個方向的共振）擁有更高的鋒直穿透率。

<2>stop-band 穿透率：我們打算利用串聯兩個相同濾波器元件去降低 stop-band 穿透率。

<3>半高寬：我們設計可以改變長寬比，但又可以固定透光面積的洞，期望我們在長寬比極大的情形下，不會降低其透光面積，使整個濾波器效果下降。

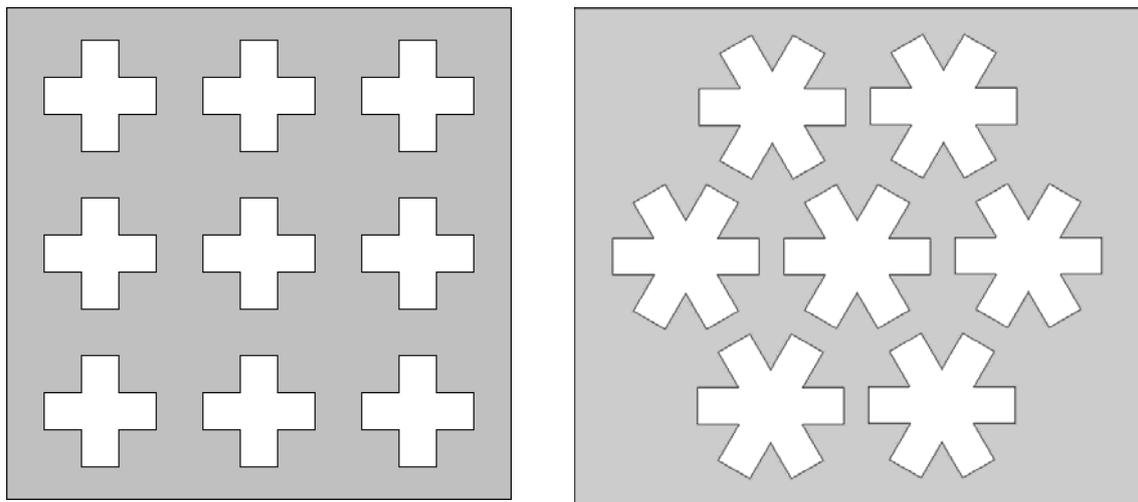


圖 4-0 正方形陣列十字架挖洞與六角形陣列雪花狀挖洞俯視圖。

4-1 六角形陣列不同的雪花狀長寬比

我們在第三章發現，不論如何控制十字架長寬比與透光面積，其峰值穿透率雖然可以接近 90%，然而這代表著是我們是否還有可能去提升 10% 峰值穿透率。

我們試著利用六角形對稱，由於它可以有三個方向的共振，我們預期它將有比正方形對稱更好的峰值穿透率；此外由於我們在正方形對稱方向挖長方形洞所形成的十字架 pattern 可以有很好的濾波效果，因此我們同樣將六角形對稱的三個方向分別挖長方形的洞，並形成的雪花狀 pattern。接下來我們改變長方形洞的長寬比，其中固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L \times W$ 分別為 $19\mu\text{m} \times 11\mu\text{m}$ 、 $19\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ 、 $19\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ ，其中 $L=19\mu\text{m}$ ， $W=11\mu\text{m}$ 實際上為六角形 pattern，所量測出來的頻譜如圖 4-1 所示。而由此頻譜圖我們可以發現一些現象如下：

- <1> 峰值穿透率在長寬比 >4 後，將可以超過 95%，甚至接近 100%，這應該是因為多了一個方向的共振，造成峰值附近共振態的增加，進而提升峰值穿透率。
- <2> 隨著長寬比越來越大，其峰值會紅移。這和 3-2 我們所觀察到的現象是一致的。然而同樣我們還是無法明確了解其峰值會發生偏移主要的原因。但這個現象將使我們在設計濾波器時，只能大略估算出峰值的波長，而無法準確算出峰值的波長。

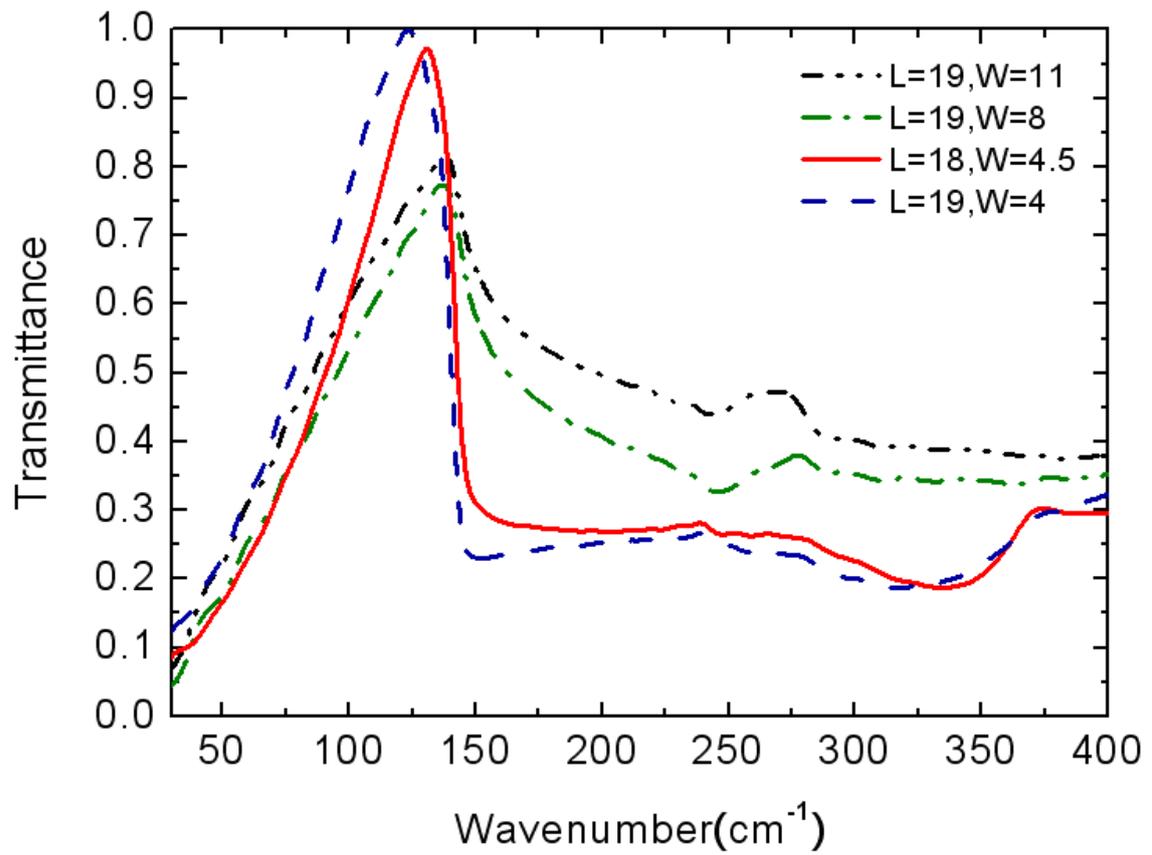


圖 4-1 六角形陣列，雪花狀挖洞，不同長寬比。



4-2 串聯兩相同金屬網濾波器元件

由第三章的討論，我們為了使峰值穿透率不要下降太多，必須使透光面積比例控制在 $>20\%$ ，然而這會造成 stop-band 穿透率降不下來，因此接下來我們將兩元件串聯起來，讓光一次穿透過兩個相同元件，如圖 4-2a 所示，其中 d 為兩元件的距離。這樣可以降低 stop-band 的穿透率，然而峰值穿透率亦同樣會跟著下降。但由 4-1，我們已經可以得到峰值穿透率接近 100% 的濾波器，因此在串聯兩元件後，我們預期峰值穿透率同樣會接近 100%，而 stop-band 穿透率會下降，同時使半高寬變窄。圖 4-2b 為光穿透過六角形陣列，週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L=19\mu\text{m}$ ， $W=4\mu\text{m}$ 的金屬網，其中 one 線為量測光穿透一元件的穿透率，one_double 線為量測光穿透一元件的穿透率再將其平方，two 線為量測光穿透兩元件的穿透率，而為了避免光在兩元件間發生干涉，我們使兩元件的距離 $d > 2\text{mm}$ 。而由圖 4-2b 我們可以觀察到：

- <1> one 和 one_double 的線幾乎是吻合的，這將有利於我們預測串聯元件的穿透率。
- <2> 可以降低 stop-band 穿透率，而如果想要繼續降低 stop-band 穿透率，我們可以繼續串聯第三個、第四個濾波器元件，但必須考慮到基板本身的吸收會使穿透強度下降。
- <3> 觀察 one 和 two 可發現其半高寬會變窄，同樣可以串聯第三個、第四個濾波器元件以降低半高寬，但同樣必須考慮基板本身的吸收。

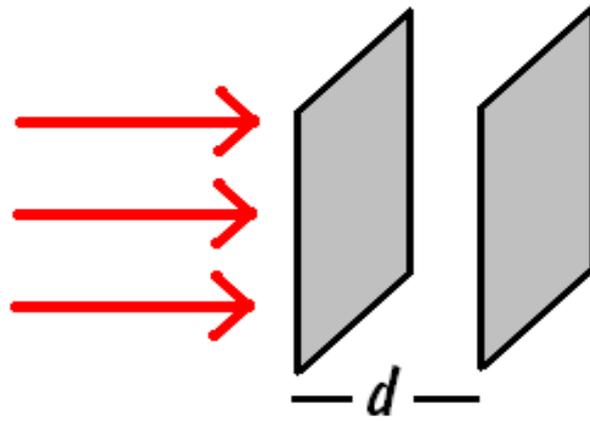


圖 4-2a 光穿透過兩個金屬網濾波器元件示意圖。

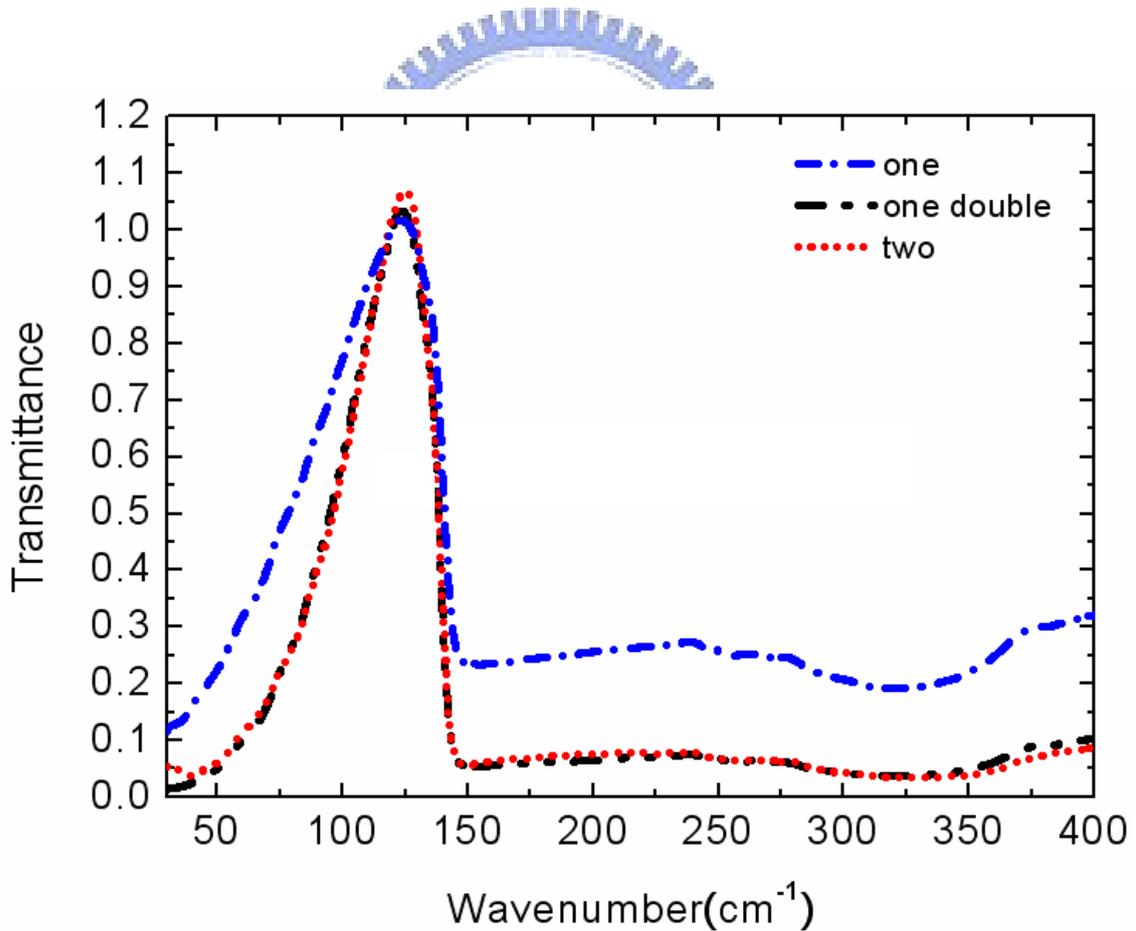


圖 4-2b 光穿透過六角形陣列，

週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L=19\mu\text{m}$ ， $W=4\mu\text{m}$ 的金屬網。

4-3 正方形陣列固定透光面積不同長寬比

由 3-2 我們預期，當長寬比不同，將可以控制濾波器的半高寬，但此時透光面積將隨長寬比而發生改變。而我們想到了一個固定透光面積，但又可以改變長寬比的方法。如圖 4-3a 所示，我們固定長方形的長邊，分別將其長寬比設定為 3、6、9，而為了固定透光面積，我們將長方形個數分別給定 2、4、6，而洞的形狀則如圖所示，這樣的設計將可使面積幾乎是固定相同的。接著我們實際將此想法實現，在正方形陣列上，我們固定週期 $g=40\mu\text{m}$ ， $L \times W \times n$ 分別為 $31.5\mu\text{m} \times 10.5\mu\text{m} \times 2$ 、 $31.5\mu\text{m} \times 5.25\mu\text{m} \times 4$ 、 $31.5\mu\text{m} \times 3.5\mu\text{m} \times 6$ ，所量測出來的頻譜如圖 4-3b 所示。然而我們卻發現這三個穿透率幾乎是一致的。而由此圖我們懷疑這是否是因為它們的透光面積一致所導致。因此我們利用模擬，在正方形陣列挖長方形洞，其中固定透光面積，改變長寬比，其穿透率頻譜如圖 4-3c 所示，我們發現其半高寬卻不一致。我們目前只能知道我們利用此法並不能改變其半高寬，但還無法了解為何其穿透頻譜會幾乎一致的原因。

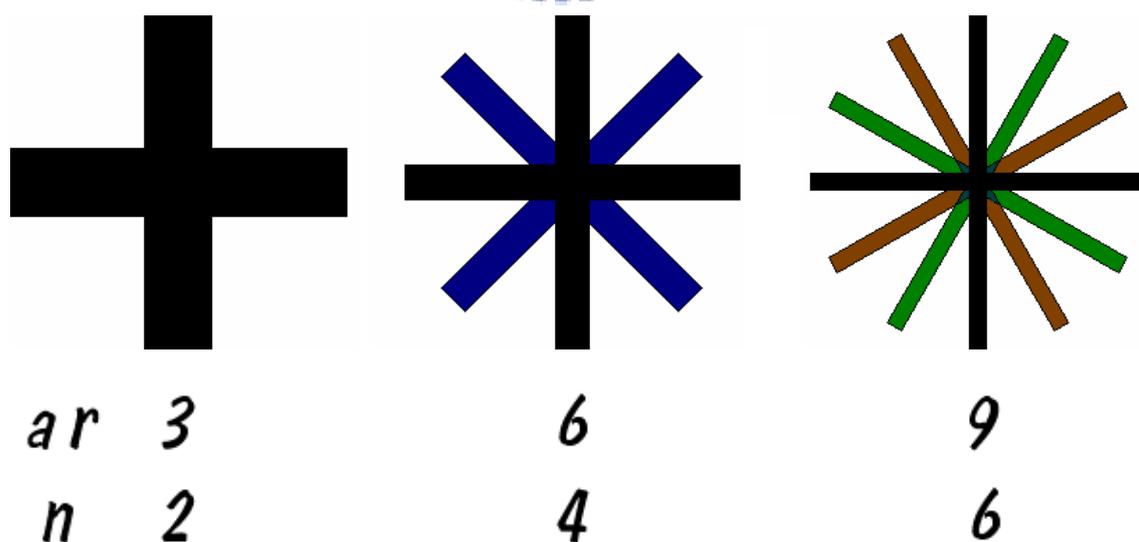


圖 4-3a 固定透光面積，不同長寬比圖形形狀示意圖，其中 ar 為長寬比， n 為長方形的個數。

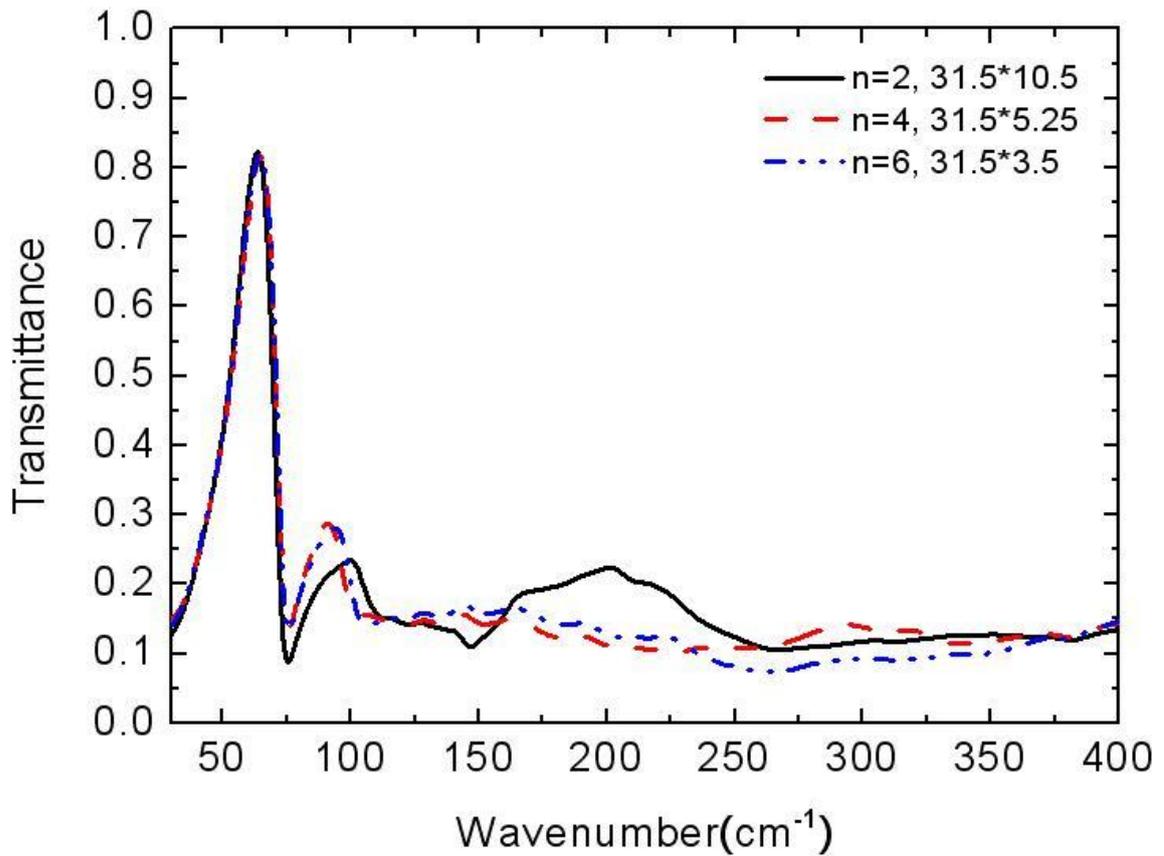


圖 4-3b 正方形陣列，固定透光面積，不同長寬比穿透率頻譜。

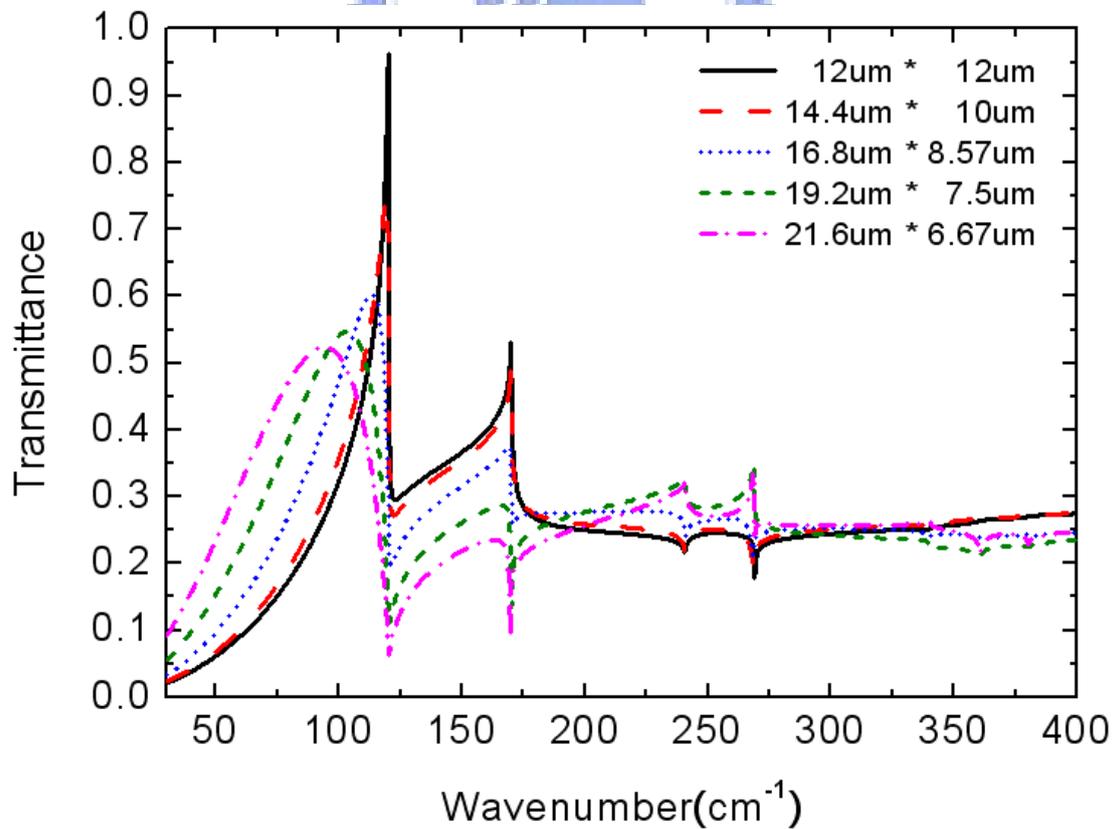


圖 4-3c 模擬正方形陣列，相同面積不同長寬比長方形洞的穿透頻譜。

4-4 正方形陣列十字架挖洞與改良後濾波器比較

我們將目前最常見的正方形陣列十字架挖洞和六角型陣列雪花狀挖洞濾波器拿來做比較，其中圖 4-4a 和圖 4-4b 分別為光穿透週期 g 同為 $24\mu\text{m}$ ，十字架 $L=18\mu\text{m}$ ， $W=6\mu\text{m}$ 和雪花 $L=19\mu\text{m}$ ， $W=4\mu\text{m}$ 金屬網，其中 4-4a 和 4-4b 為分別穿過一元件與兩元件的穿透率。

由圖 4-4a 我們發現，六角形對稱除了擁有較強穿透率之外，還擁有較大半高寬，這原因同樣是因為多了一個方向的共振所造成峰值附近共振態的增加，除了提升峰值穿透率，亦同時使半高寬變大。

而由圖 4-4b 我們發現，在串聯兩個相同元件後，除了 stop-band 穿透率大幅下降，正方形對稱的峰值穿透率亦下降至 80% 左右，但六角形對稱的峰值穿透率卻可以維持在 100% 左右。

因此如果我們可以製作金屬無附著在基材上的六角形對稱雪花狀挖洞濾波器，由於此時光訊號強度將不再被基板所吸收，因此可以搭配著串聯多個相同元件，預期將可以製作出不同波段，不同半高寬之濾波器。



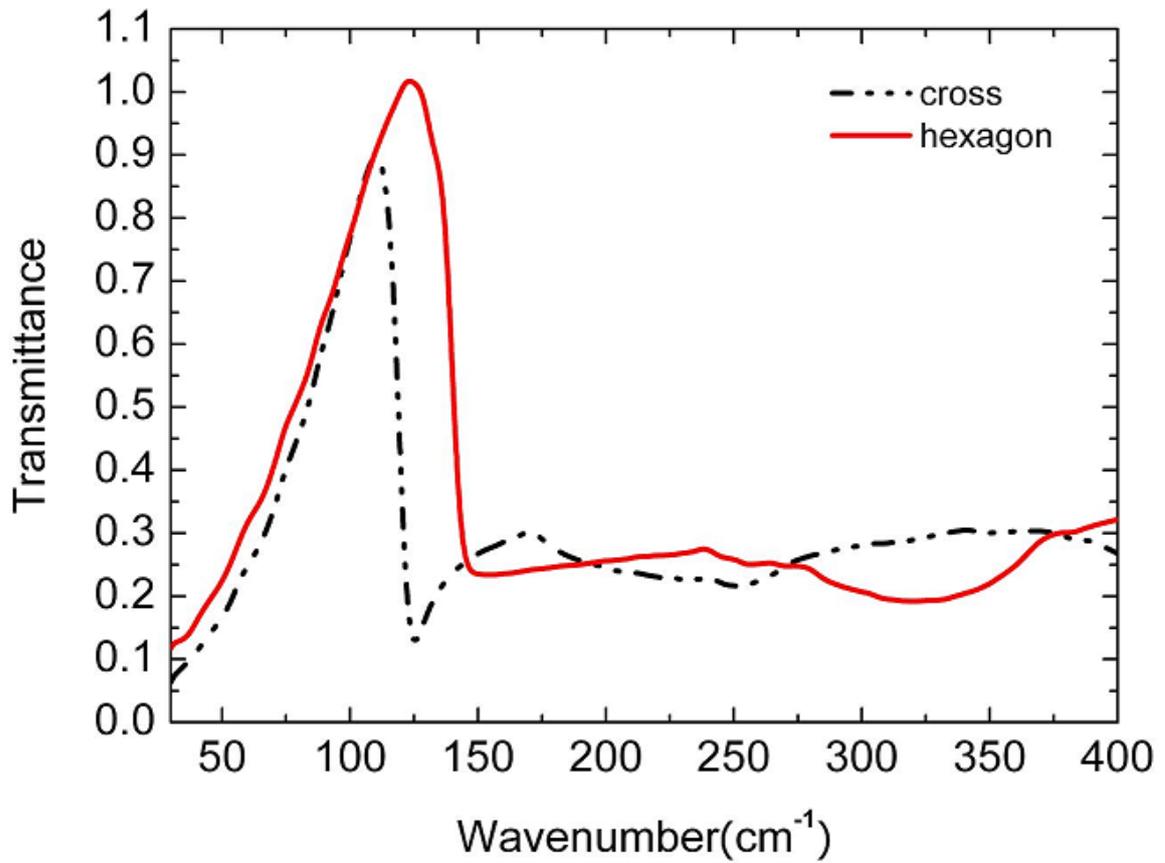


圖 4-4a 光穿透過一元件，不同對稱結構穿透率。

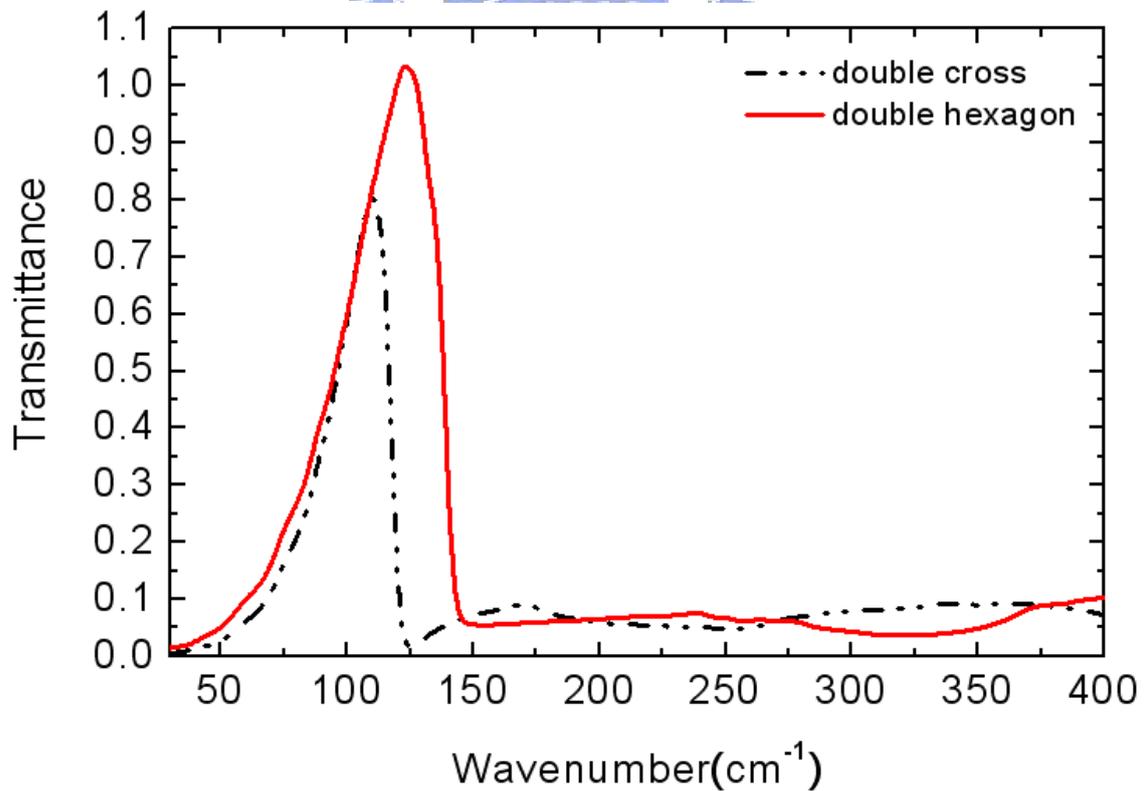


圖 4-4b 光穿透過不同對稱結構，兩相同元件穿透率。

五、結論

在薄金屬網狀結構濾波器的設計上，我們得到以下幾個結論：

- <1> 必須將透光面積比例控制在 20%~40% 才會有好的濾波效果。
- <2> 正方形對稱下，若為正方形洞，則峰值波長約略為週期 $g \times$ 基板折射率 n ；若為十字架洞，則會受長寬比與透光面積不同而紅移或藍移。六角形對稱下，則會隨著長寬比越大而紅移。
- <3> 我們可以使用六角形對稱，雪花狀挖洞結構，藉以大幅提高峰值穿透率。
- <4> 我們可以將兩元件串聯，藉以降低 stop-band 穿透率，但需考慮到基材本身的吸收會造成光強度的減弱。
- <5> 在半高寬的控制方面，我們卻發現目前只能藉由破壞 pattern 的對稱性和串聯兩元件去降低其半高寬，而藉由固定透光面積，不同長寬比要降低半高寬是不可行的。

另外我們所觀察到的奇特現象：在正方形陣列十字架挖洞，不同透光面積和不同長寬比下，峰值會發生藍移或紅移的現象，雖然在本論文沒有詳加探討，但卻是一個值得深入研究的課題。

參考文獻

- [01] R.Ulrich, “Far-Infrared Properties of Metallic Mesh and Its Complementary Structure.” *Infrared Phys.*7,37(1967).
- [02] R.Ulrich, “Interference Filters for the Far Infrared.” *Applied Optics*, Vol.22, No.10, October 1968.
- [03] O.Sternberg, K.D.Moller, H.Grebel, K.P.Stewart, R.M.Henry, “Inductive Cross Shaped Metal Meshes on Silicon Substrate.” *Infrared Physics & Technology* 44(2003)17-25.
- [04] S.T.Chase, R.D.Joseph, “Resonant Array Bandpass Filters for the far infrared.” *Applied Optics*, Vol.22, No.11, 1 June 1983.
- [05] K.D.Moller, K.R.Farmer, D.V.P.Ivanov et al. “Thin and Thick Cross Shaped Metal Grids.” *Infrared Physics & Technology* 40(1999)475-485.
- [06] R.Ruprecht, W.Bacher, P.Bley, et al. *Jahrg.*23 2-91, 18-123.
- [07] K.D.Moller, O.sternberg, “Thick Inductive Cross Shaped Metal Meshes.” *Journal of Applied Physics*, Volume 91, Number 12.
- [08] Andrew J.Gatesman, Andriy Danylov, Thomas M.Goyette,et al. “Terahertz Behavior of Optical Components and Common Materials.” *Proc. SPIE*, 2006, Vol.6212, pp62120E1-62120E-12.
- [09] Bortolucci, Maria Zakia, Otto Bauer, et al. “Metal Mesh Resonant Filters for THz Frequencies.” *Applied Optics*, Vol.47, Issue 32, pp.6064-6069.
- [10] V.P.Tomaselli, D.C.Edewaard, P.Gillan, and K.D.Moller, “Far-Infrared Bandpass Filters from Cross-Shaped Grids.” *Applied Optics*,Vol.20, No.8, 15 April 1981.

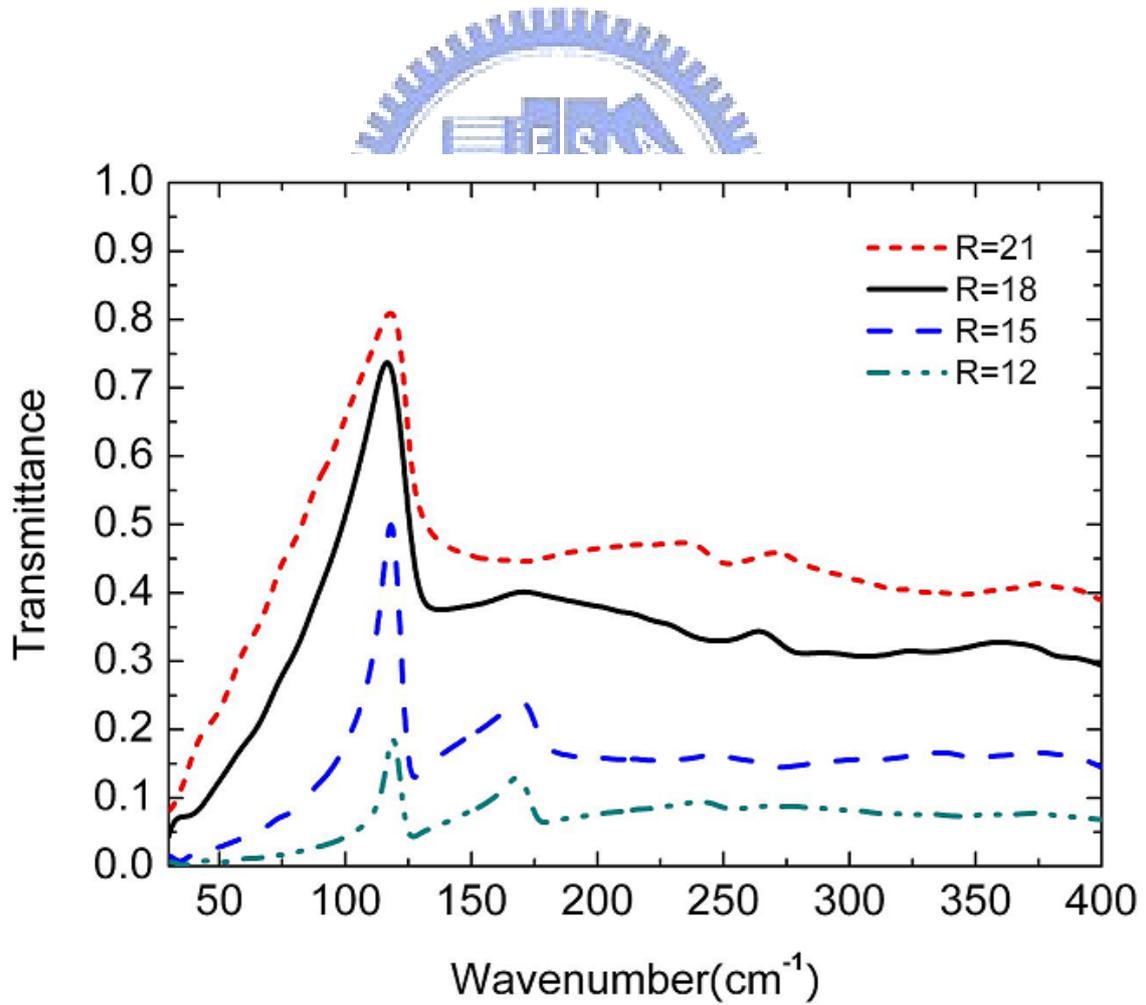
- [11] Milton Rebbert, Peter Isaacson, Jacqueline Fischer, et al.
“Microstructure Technology for Fabrication of Metal-Mesh Grids.”
Applied Optics, Vol.33, No.7, 1 March 1994.
- [12] P.G.J.Irwin, P.A.R.ADE, S.B.Calcutt, et al. “Investigation of
Dielectric Spaced Resonant Mesh Filter Designs for PMIRR.”
Infrared Phys. Vol.34, No.6, pp.549-563, 1993.
- [13] P.G.Huggard, M.Meyringer, A.Schilz, K.Goller, W.Prettl,
“Far-Infrared Bandpass Filters from Perforated Metal Screens.”
Applied Optics, January 1994, Vol.33, No.1.
- [14] K.D.Moller, Oren Sternberg, Haim Grebel, and K.P.Stewart,
“Near-Field Effects in Multilayer Inductive Metal Meshes.”
Applied Optics, Vol.41, No.10, 1 April 2002.
- [15] W.Herres and J.Gronholz, “Understanding FT-IR Data Processing.”
(Bruker)
- [16] Yu-Wei Jiang, Lawrence Dah-Ching Tzuang, Yi-Han Ye, et al.
“Effect of Wood’s Anomalies on the Profile of Extraordinary
Transmission Spectra Through Metal Periodic Arrays of Rectangular
Subwavelength Holes with Different Aspect Ratio.”
Optics express , Vol.17, No.4, 2631.
- [17] R.C.Compton, R.C.McPhedran, G.H.Derrick, and L.C.Botten.
“Diffraction Properties of a Bandpass Grid.”
Infrared Phys. Vol.23, No.5, pp.239-245, 1983.

- [18] Ge Wu, Volkert Hansen, Hans-Peter Gemuend and Ernst Kreysa.
“Resonant Mesh Filters Using Densely Packed FSS Elements for Space Applications.” 2005 Joint 30th Intl. on Infrared and Millimeter Waves & 13th Intl. Conf. on Terahertz Electronics.
- [19] M.Bozzi, L.Perregrini, J.Weinzierl, C.Winnewisser.
“Design, Fabrication, and Measurement of Frequency-Selective Surface.” Opt. Eng. 39(8) 2263-2269(August 2000).
- [20] L Martin-Moreno and F J Garcia-Vidal.
“Minimal Model for Optical Transmittance Through Holey Metal Films.” J.Phys: Condens. Matter 20(2008) 304214(13pp).
- [21] D.W.Porterfield, J.L.Hesler, R.Densing, et al.
“Resonant Metal-Mesh Bandpass Filters for the Far Infrared.” Applied Optics, Vol.33, No.25, 1 September 1994.
- [22] Takeshi Tanaka, Masamichi Akazawa and Eiichi Dano.
“Terahertz Wave Filter from Cascaded Thin-Metal-Film Meshes with a Triangular Array of Hexagonal Holes.” JJAP, Vol.43, No.2B, 2004, pp.287-289.
- [23] R.C.Compton, R.C.McPhedran, G.H.Derrick and L.C.Botten.
“Metal Mesh Filters for Infrared Applications.” Infrared Phys. Vol.23, No.5, pp.239-245, 1983.

附錄

一>

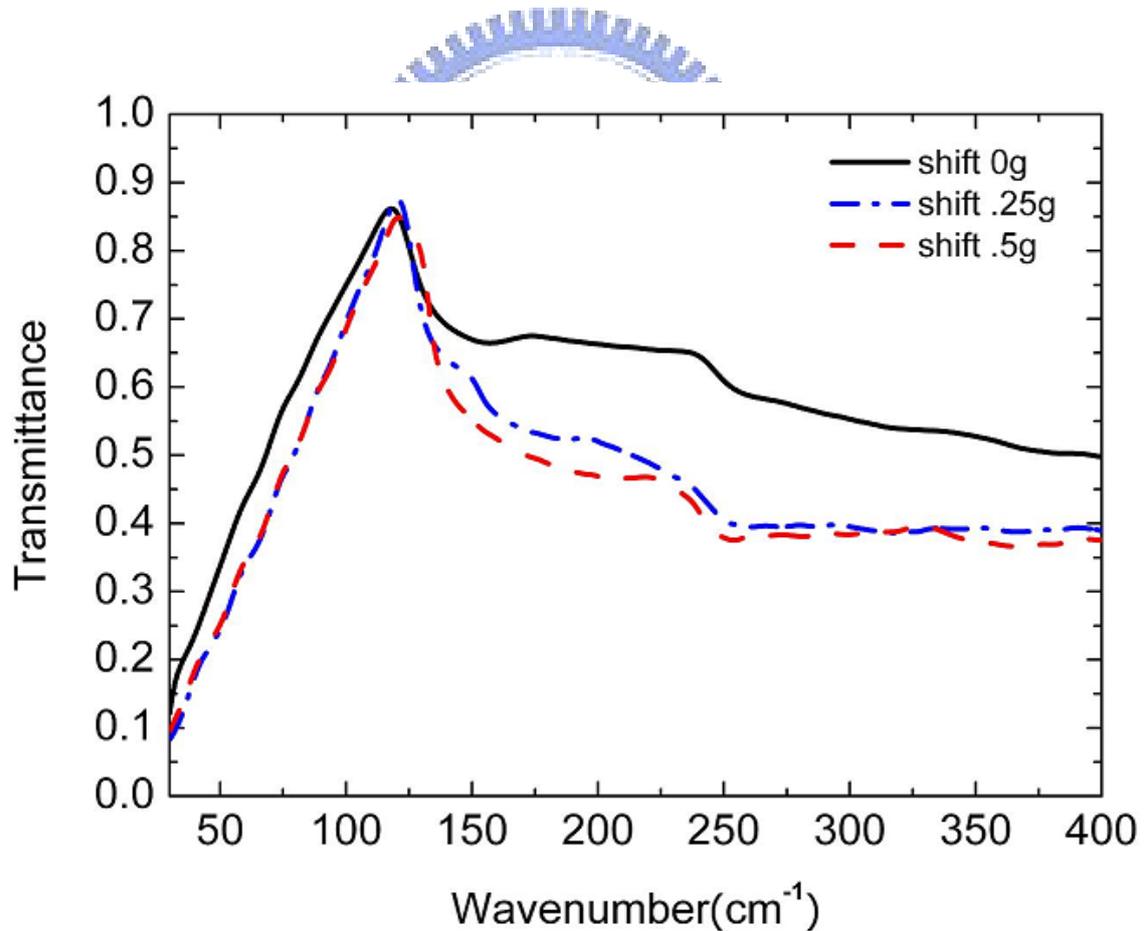
固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ，pattern 為圓形，改變其透光面積，直徑 R 分別等於 $21\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 和 $12\mu\text{m}$ ，所量測出來的頻譜如圖一-a 所示。



圖一-a 正方形陣列，圓形挖洞，不同透光面積，其中 R 為直徑。

二>

固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ，pattern 為正方形，其邊長 $L=18\mu\text{m}$ 。
將正方形 pattern 分別橫移 $0g$ 、 $0.25g$ 和 $0.5g$ ，其穿透率頻譜
如圖二-a 所示。

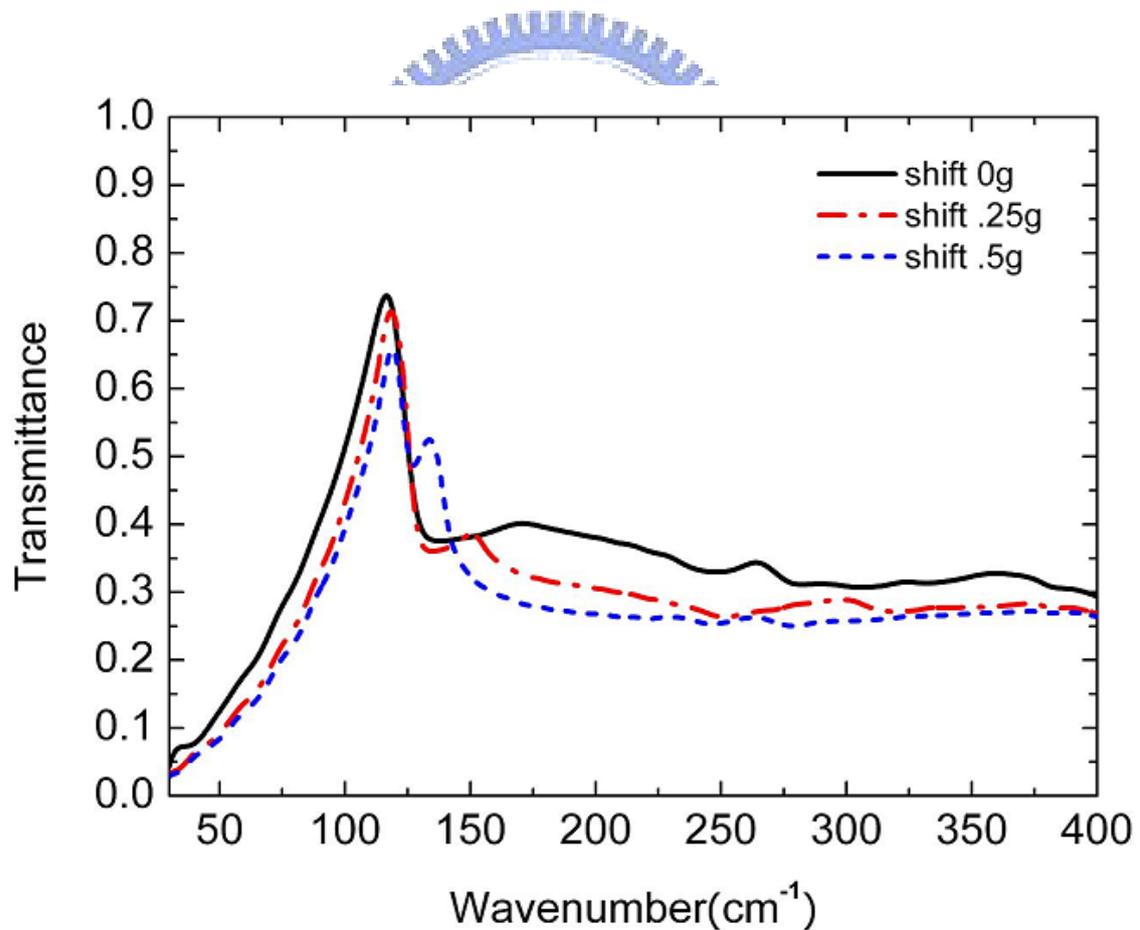


圖二-a 正方形陣列，正方形挖洞，改變其晶格。

其中週期 $g=24\mu\text{m}$ ，邊長 $L=18\mu\text{m}$ 。

三>

固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ，pattern 為圓形，其直徑 $R=18\mu\text{m}$ 。
將圓形 pattern 分別橫移 $0g$ 、 $0.25g$ 和 $0.5g$ ，其穿透率頻譜
如圖三-a 所示。

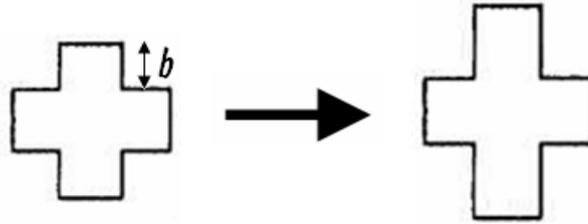


圖三-a 正方形陣列，圓形挖洞，改變其晶格。

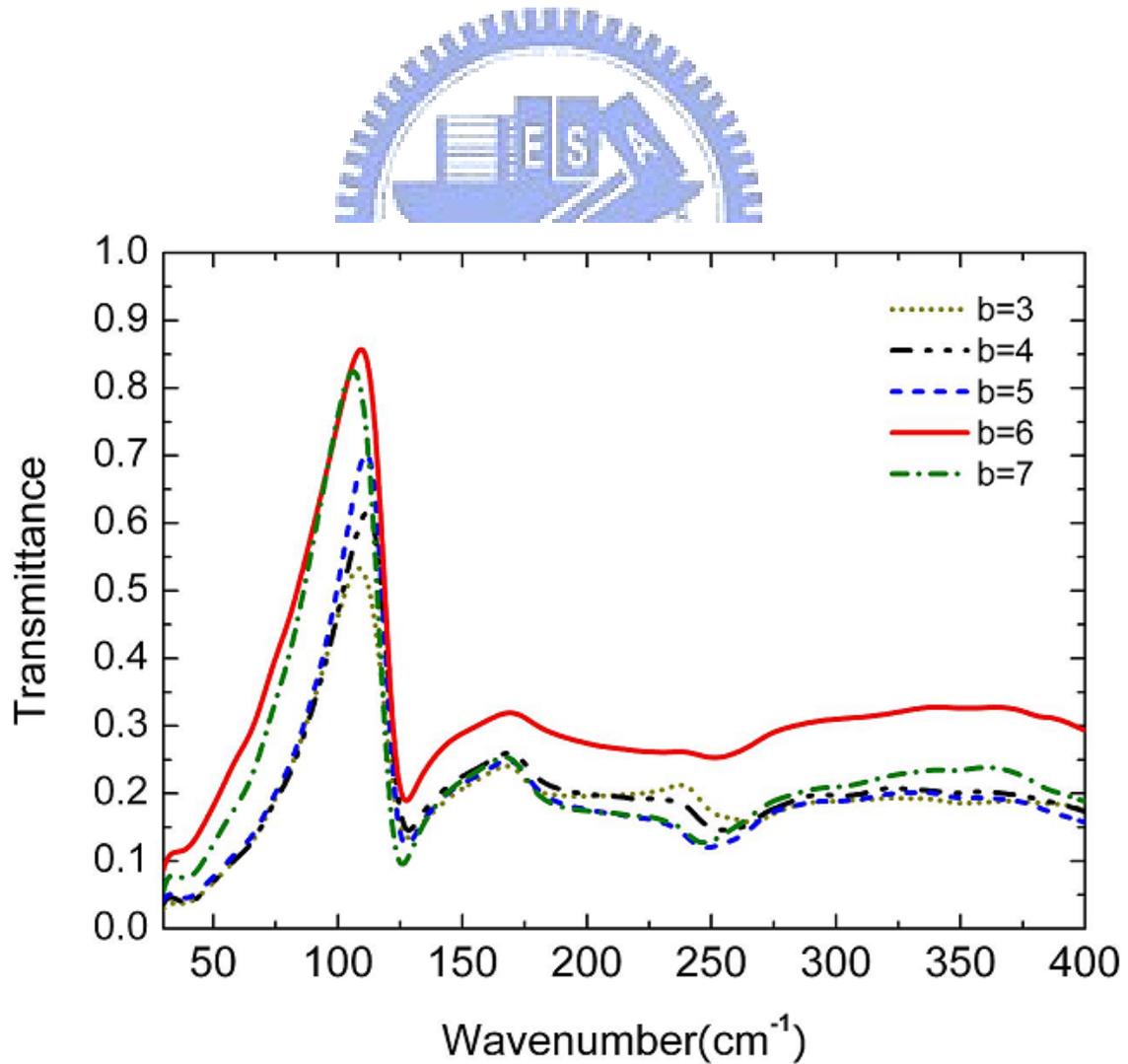
其中週期 $g=24\mu\text{m}$ ，直徑 $R=18\mu\text{m}$ 。

四>

固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L=18\mu\text{m}$ ， $W=6\mu\text{m}$ ，改變直立長方形的長，如圖四-a 所示。而所量測之穿透率頻譜如圖四-b 所示。



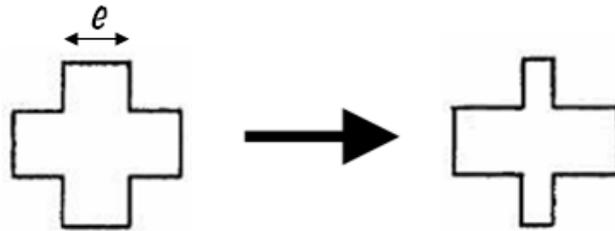
圖四-a 改變直立長方形的長 b 示意圖。



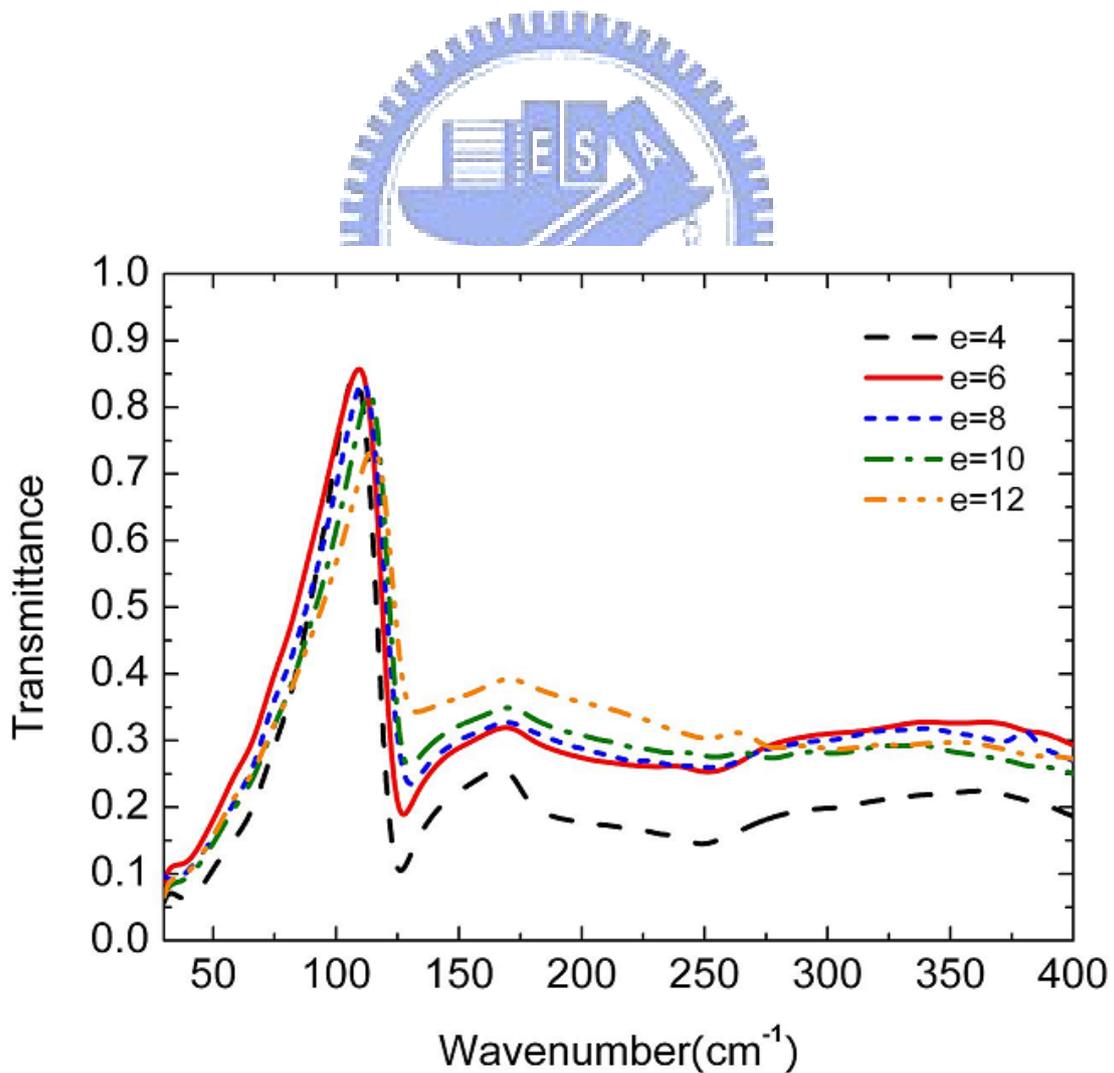
圖四-b 不同直立長方形的長 b ，所量測之頻譜圖。

五>

固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ， $L=18\mu\text{m}$ ， $W=6\mu\text{m}$ ，改變直立長方形的寬，如圖五-a 所示。而所量測之穿透率頻譜如圖五-b 所示。



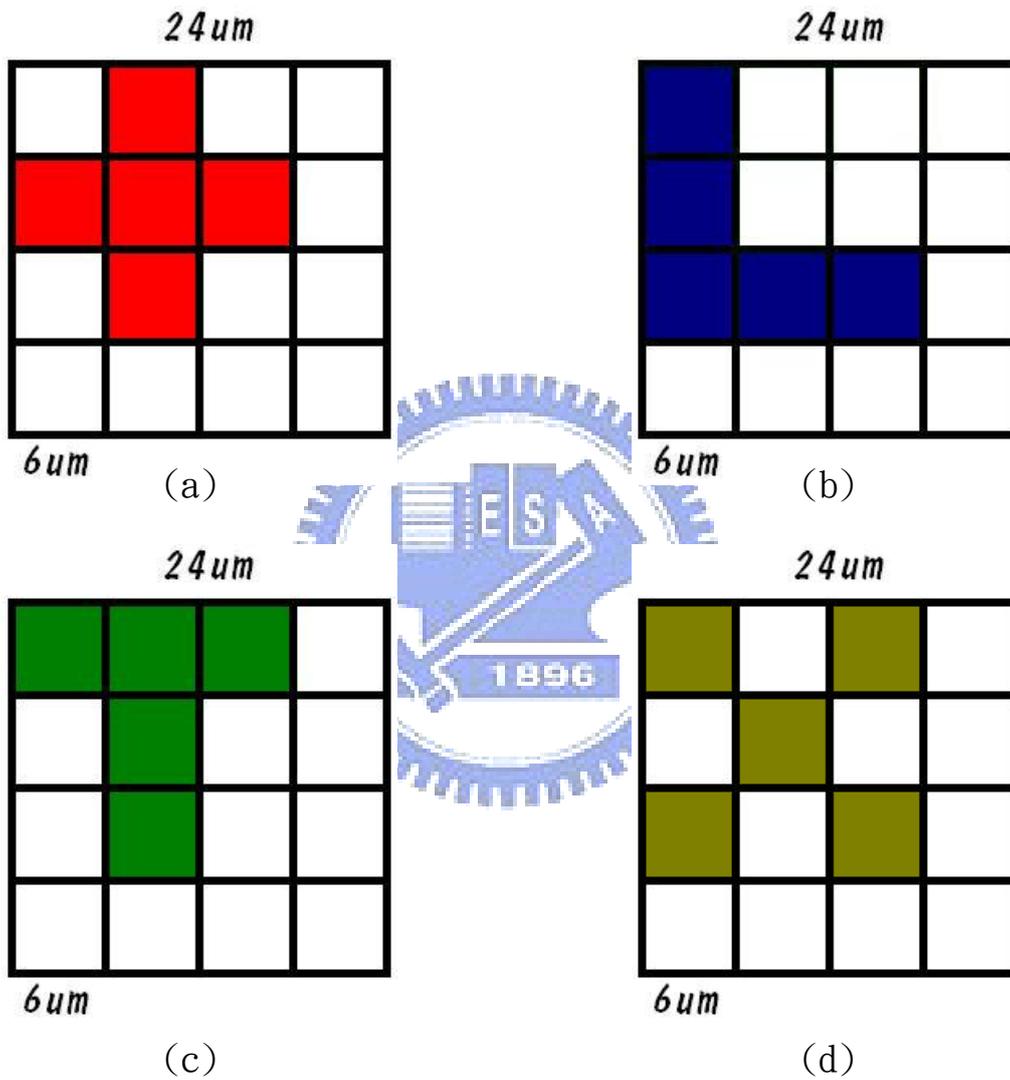
圖五-a 改變直立長方形的寬 e 示意圖。



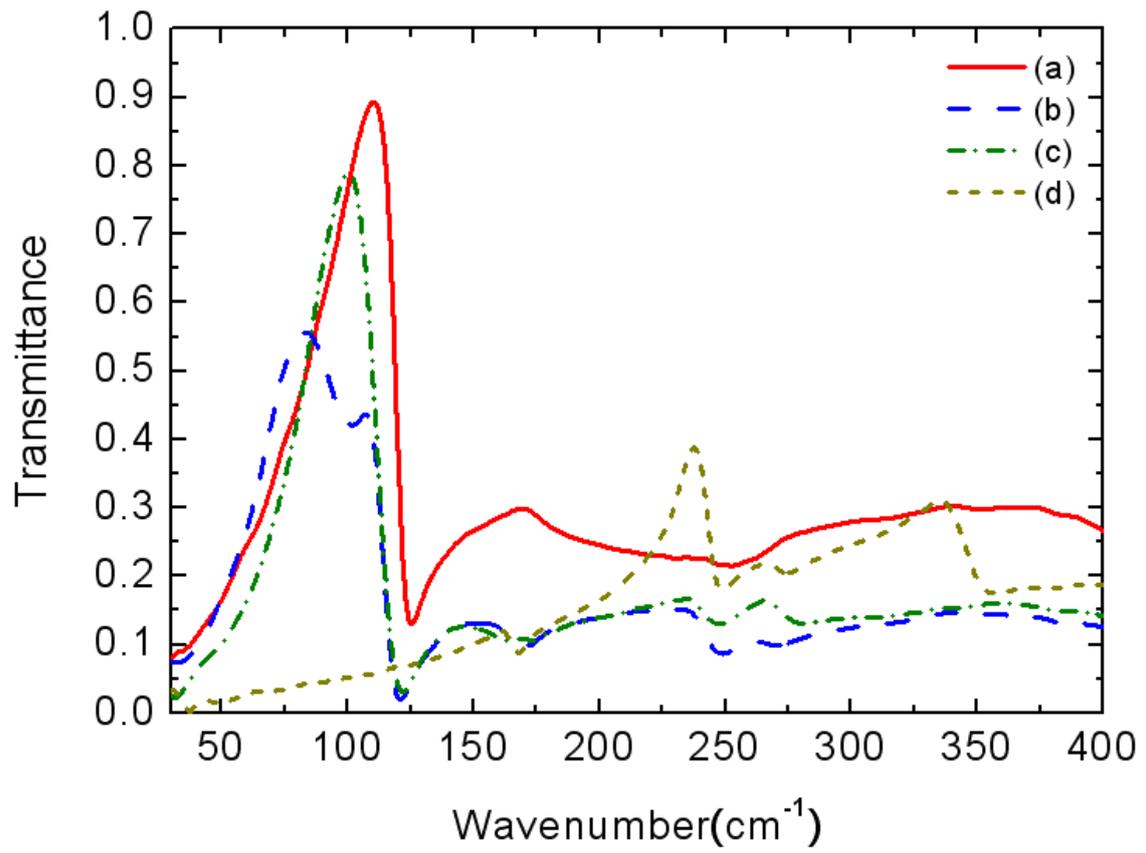
圖五-b 不同直立長方形的寬 e ，所量測之頻譜圖。

六>

將面積為 $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ 分為十六等分，並分別將彩色部分蝕刻挖洞，如圖六-a 所示。將其陣列排列，所量測之頻譜圖如圖六-b 所示。



六-a 週期皆為 $g=24\mu\text{m}$ ，相同透光面積，不同 pattern 的蝕刻。

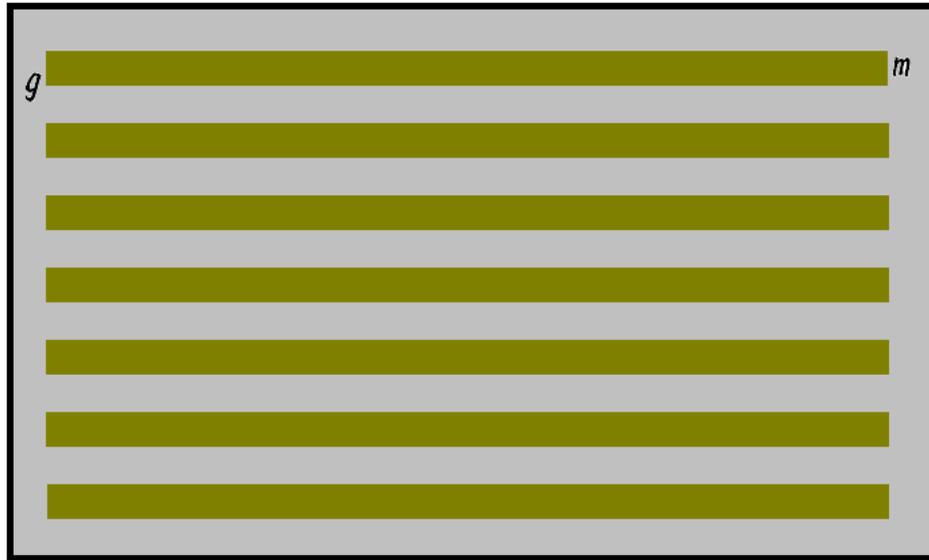


六-b 相同透光面積，不同挖洞形狀之頻譜圖。

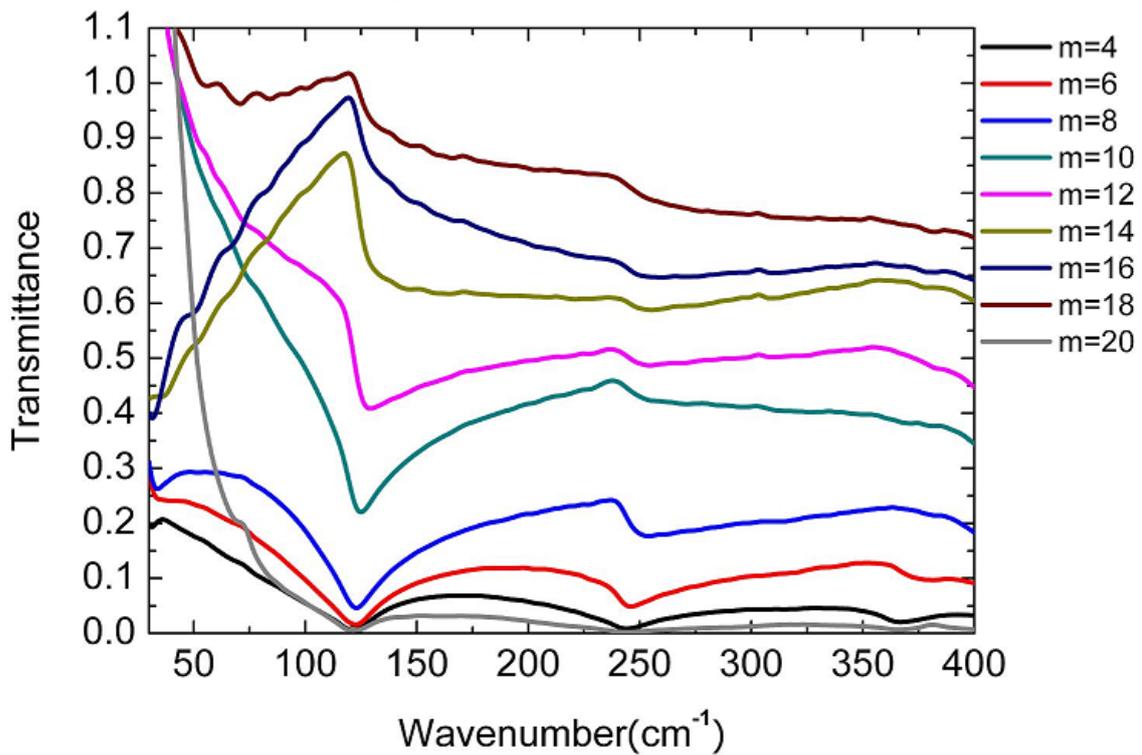


七>

固定週期 $g=24\mu\text{m}$ ，調整 m 藉以改變透光面積之光柵，如圖七-a 所示。而所量測之穿透率頻譜如圖七-b 所示。



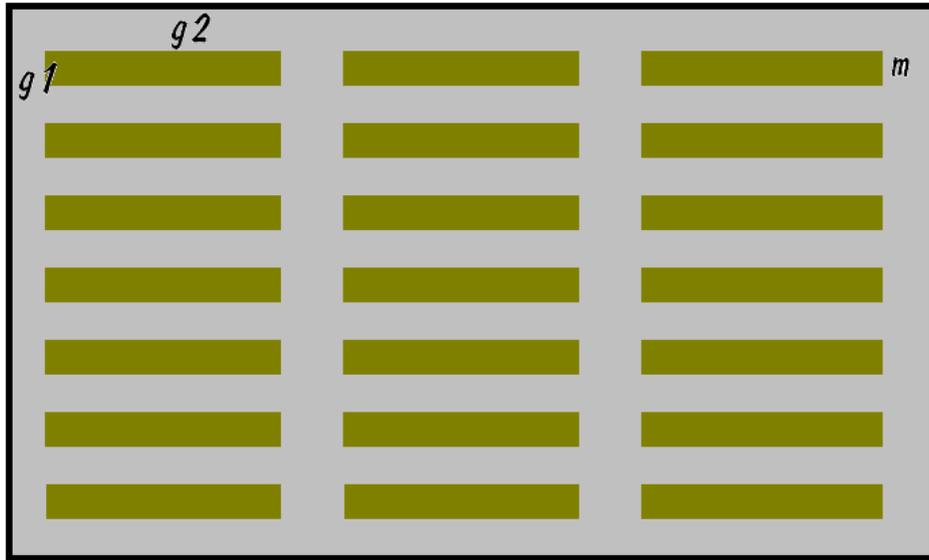
圖七-a 週期 $g=24\mu\text{m}$ ，改變透光面積（不同 m ）光柵示意圖。



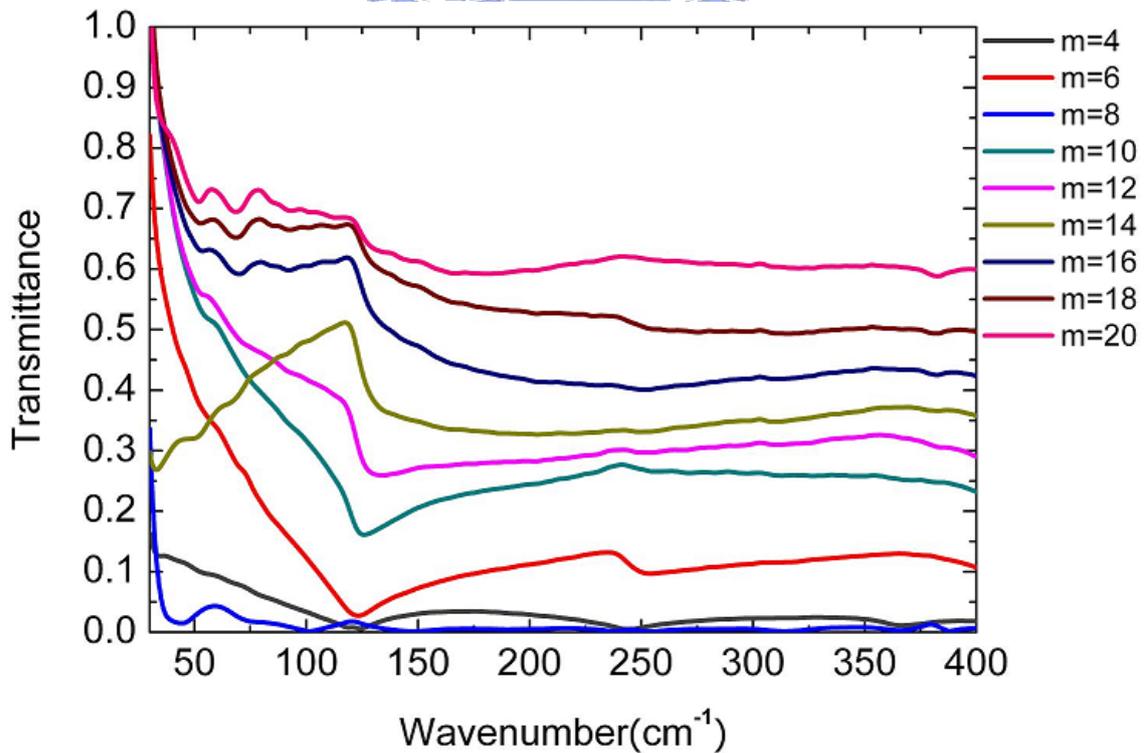
圖七-b 不同透光面積（不同 m ）光柵之頻譜圖。

八>

固定週期 $g_1 = 24\mu\text{m}$ 與 $g_2 = 237\mu\text{m}$ ，調整 m 藉以改變透光面積之長條狀光柵，如圖八-a 所示。而所量測之穿透率頻譜如圖八-b 所示。



圖八-a 週期 $g_1 = 24\mu\text{m}$ 與 $g_2 = 237\mu\text{m}$ ，
改變透光面積（不同 m ）長條狀光柵示意圖。



圖八-b 不同透光面積（不同 m ）長條光柵之頻譜圖。

簡歷

姓名：黃信傑 (Hsin-Chieh Huang)

性別：男♂

籍貫：台灣省台南縣

出生年月日：民國 71 年 10 月 21 日

E-mail：colorsky.ee96g@nctu.edu.tw

學歷： 國立中山大學 電子工程學系 (91.9 - 96.6)

國立交通大學 電子工程研究所碩士班 (96.9 - 98.6)

論文題目 (中)：兆赫波段金屬網狀濾波器之研究

論文題目 (英)：Studies of Metal Mesh Filters in Terahertz Frequencies

