

國立交通大學

電子工程學系電子研究所碩士班

碩 士 論 文

兆赫波段金屬網狀帶通濾波器
之偏振性和相位差研究

**Studies on polarization and phase retardance of
metallic bandpass filters in Terahertz
Frequencies**

研究生：蕭晉勛

指導教授：顏順通 教授

中華民國九十九年十一月

兆赫波段金屬網狀帶通濾波器
之偏振性和相位差研究

**Studies on polarization and phase retardance of
metallic bandpass filters in Terahertz
Frequencies**

研究生：蕭晉勛

Student : Chin-Hsun Hsiao

指導教授：顏順通博士

Advisor : Dr. Shun-Tung Yen

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like outer border. Inside the circle, there is a stylized representation of a book and a torch, with the letters 'NCTU' integrated into the design. The year '1896' is at the bottom of the emblem.

國立交通大學
電子工程學系電子研究所
碩士論文

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 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年十一月

兆赫波段金屬網狀帶通濾波器 之偏振性和相位差研究

學生：蕭晉勛

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

本論文研究由不對稱十字架孔洞陣列形成之薄金屬帶通濾波器，對於不同偏極方向入射光該濾波器的穿透特性和衍生的相位差行為。我們改變十字架長、寬和週期三種結構，量測元件於兩個不同偏極方向(沿長軸與短軸)的穿透強度和相位差改變量。實驗與模擬結果可有定性上之吻合。我們發現不對稱十字架孔洞於不同偏極方向的穿透行為無法單用兩個正交矩形孔洞的穿透來做近似。此外，經過適當的設計週期性不對稱十字架孔洞陣列，基板上的薄金屬網狀濾波器可作為相位延遲片中的四分之一片來使用。

Studies on polarization and phase retardance of metallic bandpass filters in Terahertz Frequencies

student : Chin-Hsun Hsiao

Advisor : Dr. Shun-Tung Yen

Department of Electronics Engineering & Institute of Electronics

National Chiao Tung University



Abstract

The paper investigates substrate-supported thin metallic band-pass filters perforated with asymmetric cross-shaped hole arrays. We vary the cross-shaped arm length, the width, and the period of the cross-shaped hole arrays. We measure two polarized transmission spectra along the short and the long arm of the cross-shaped holes for each device. We also derive the phase shift of the filters. The data agree qualitatively with our simulation results. We find that the transmission characteristics of an asymmetric cross-shaped hole can not simply be explained by the transmission characteristics of two orthogonally arranged rectangular holes. Furthermore, we can obtain a quarter waveplate by properly designing the dimensions of the asymmetric cross-shaped holes.

誌謝

漫長的兩年多的碩士生涯終於要劃下句點。在交大這兩年多認識到很多學識豐富的學長和同學，也在完成論文和做實驗的過程中學到相當多的專業知識和磨練性情。能完成此篇論文有賴多位長輩和同學的幫忙，首先要感謝的是指導教授顏順通博士，感謝教授兩年多來在研究上的指導與教誨，另外教授在研究上的嚴謹態度，也是我未來工作上需要學習的。接著要感謝鐘佩鋼學長這兩年多的指導，不管是在實驗上或學識上，我都從中學習到很多。還要感謝學長在九月初當我的實驗進度卡關的時候，提供給我一盞明燈，讓我現在能順利畢業，非常的謝謝他。此外，我也要感謝德賢學長和冠成學長平常在實驗室的關心與幫忙，小弟我感恩在心頭。國家奈米元件實驗室的賴東彥工程師，對於我日前在 NDL 所下的 90 奈米元件製程大力幫忙，在此也要說聲感謝。另外還要感謝機械工廠莊先生平日機械加工的幫忙，和奈米中心陳悅婷小姐和黃國華先生在實驗製程上的幫忙。

再來我要謝謝我的同屆戰友章魚哥、泓爺、阿威、唯倫老大、孫董、阿牛，有你們平時的扶持和鼓勵，我才能堅持到現在。未來也祝福我的同學們快樂幸福。另外，也希望碩二學弟妹佳帆、廷誠、庭宇、芳如明年能順利畢業，不要步入我的後塵。

最後感謝我敬愛的父母和老妹，謝謝你們平時的關心打氣和背後
默默的支持，讓我得以最後完成碩士學業。

蕭晉勛 2010, 11, 8

交通大學，新竹



目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
致謝	III
目錄	V
圖目錄	VII
表目錄	X

第一章 緒論 ----- 01

1-1 前言	01
1-2 研究背景	03
1-3 研究動機	06

第二章 元件設計與製作過程 ----- 07

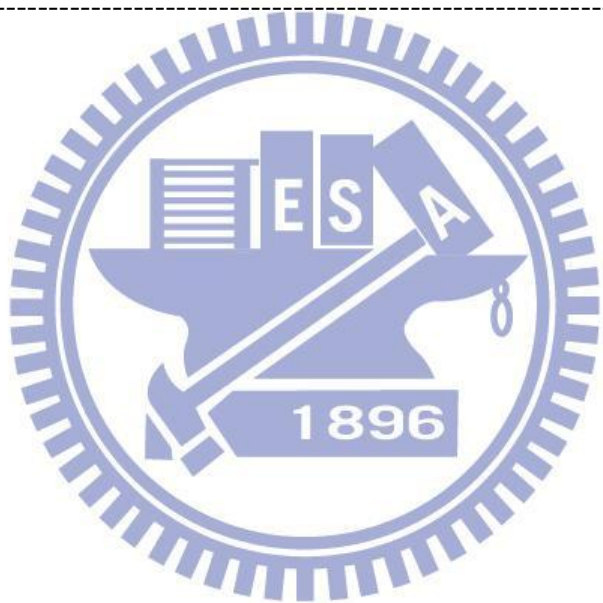
2-1 參數定義	07
2-2 製作元件項目	08
2-3 元件材料	10
2-4 製程流程	11

第三章 量測架設與原理 ----- 15

3-1 傅立葉轉換紅外線頻譜分析儀	15
3-2 量測架設	18
3-3 量測原理	20

第四章 實驗結果與討論 ----- 25

4-1 前提說明-----	25
4-2 程式計算方法簡略說明-----	26
4-3 實驗結果說明-----	28
4-4 實驗結論-----	51
第五章 結論-----	52
參考文獻-----	53
簡歷-----	54

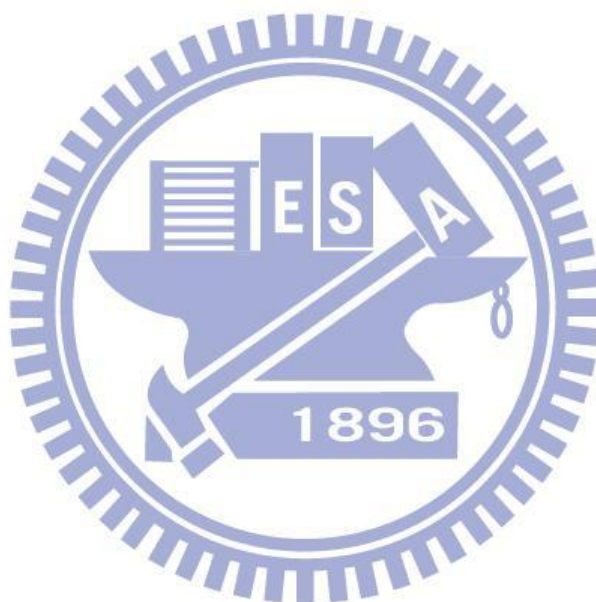


圖目錄

圖 1-1 電磁波頻譜-----	02
圖 1-2 結合電感性和電容性濾波器形成十字架型 的金屬網狀結構濾波器-----	03
圖 2-1 十字架參數示意圖-----	07
圖 2-2 元件結構圖-----	13
圖 2-3(a)(b)(c)(d) 光學顯微鏡所拍攝之金屬網-----	14
圖 3-1 FTIR 系統-----	16
圖 3-2 麥克森干涉儀示意圖-----	17
圖 3-3 實驗架設圖-----	19
圖 3-4 FTIR 光路圖-----	19
圖 4-1 入射光的電場 X、Y 方向定義-----	25
圖 4-2 金屬週期十字架孔洞示意圖-----	26
圖 4-3 基底展開法示意圖-----	27
圖 4-4 <變化長度>X 方向穿透頻譜(實驗) -----	29
圖 4-5 <變化長度>X 方向穿透頻譜(模擬) -----	29
圖 4-6 <變化長度>Y 方向穿透頻譜(實驗)-----	30
圖 4-7 <變化長度>Y 方向穿透頻譜(模擬) -----	30
圖 4-8 波峰位置對於長度變化關係圖(1) -----	31

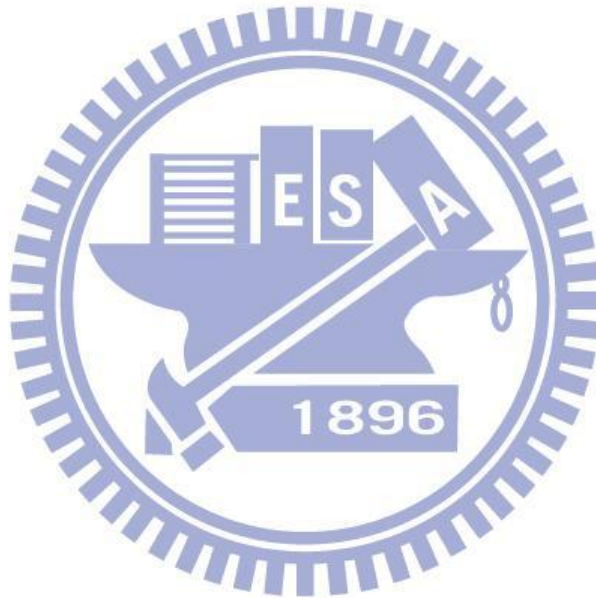
圖 4-9 波峰位置對於長度變化關係圖(2)	-----33
圖 4-10 十字架孔洞近似成兩個互相正交矩形孔洞示意圖	
-----	33
圖 4-11 <變化長度>相位差改變量圖(實驗)	-----35
圖 4-12 <變化長度>相位差改變量圖(模擬)	-----35
圖 4-13 波峰相位差對於長度變化關係圖(紅色虛線框內)(1)	36
圖 4-14 相位差波峰位置對於長度變化(紅色虛線框內)(1)	--36
圖 4-15 <變化寬度> X 方向穿透頻譜(實驗)	-----40
圖 4-16 <變化寬度> X 方向穿透頻譜(模擬)	-----40
圖 4-17 <變化寬度> Y 方向穿透頻譜(實驗)	-----41
圖 4-18 <變化寬度> Y 方向穿透頻譜(模擬)	-----41
圖 4-19 波峰位置對於寬度變化關係圖	-----42
圖 4-20 <變化寬度>相位差改變量圖(實驗)	-----44
圖 4-21 <變化寬度>相位差改變量圖(模擬)	-----44
圖 4-22 波峰相位差對於長度變化關係圖(紅色虛線框內)(2)	45
圖 4-23 相位差波峰位置對於長度變化(紅色虛線框內)(2)	---45
圖 4-24 <變化週期>相位差改變量圖(實驗)	-----47
圖 4-25 <變化週期>相位差改變量圖(模擬)	-----47
圖 4-26 波峰相位差對於長度變化關係圖(紅色虛線框內)(3)	48

圖 4-27	相位差波峰位置對於長度變化(紅色虛線框內)(3)---	48
圖 4-28	<變化週期>X 方向穿透頻譜(實驗)-----	49
圖 4-29	<變化週期>X 方向穿透頻譜(模擬)-----	49
圖 4-30	<變化週期>Y 方向穿透頻譜(實驗)-----	50
圖 4-31	<變化週期>Y 方向穿透頻譜(模擬)-----	50



表目錄

(表一)變化十字架單軸長度-----	08
(表二)變化十字架單軸寬度-----	08
(表三)變化十字架週期-----	09



第一章 緒論

1-1 前言

兆赫波是頻率介於 0.1 和 3 兆赫間(波長 100~1000 μ m)的電磁波，通常稱為太赫茲或 T 輻射(T-rays)，其輻射頻率介於高頻微波和遠紅外光之間。而兆赫波具有以下的特質：(1)可以穿過許多可見光無法穿過的材料，例如不透明塑膠、紙類材質、衣服等，(2)能量能被金屬反射(高反射率)，(3)低能量(長波長)(4)靈敏感測水份多寡等。

因為兆赫波輻射有著以上的特性，所以兆赫波段顯像技術的相關應用在最近幾年來受到相當的重視。例如對於生醫顯像而言，兆赫波輻射可被用於分析生物體內細胞或組織水份分佈的異常情況而不會對生物體造成傷害，因此其可成為替代 X-ray 用於醫療顯像的首選。而兆赫波可穿透多數塑膠、纖維材質並受到金屬反射的特性能使兆赫波輻射能用於機場安檢偵測危險物品。另外，兆赫波輻射高頻的特性可達到未來通訊方面高載量資料傳輸的需求。此外還有一些其他方面的應用，例如半導體製程檢測、太空遙測、食物品管等等。

上述的兆赫波應用皆須建立在良好的兆赫波光源、偵測器、光學元件以及量測技術，因此相關的主被動元件研製和量測技術的架設就非常的重要。對於光學被動元件而言，常見到的有濾波器、偏振片、

相位延遲片、分光鏡等。而本實驗室目前已製作出在兆赫波段高穿透率的濾波器，濾波器結構為在矽基板上鋪上一層週期性的十字架孔洞金屬網。本研究將著重在此金屬網結構的濾波器下，兆赫波段電場方向互相垂直的電磁波分別穿透金屬網的物理現象和衍生的相位差做研究和討論，並透過實際製程量測與程式模擬計算結果做比較，期望能對於往日兆赫波被動元件製作與設計有所幫助。

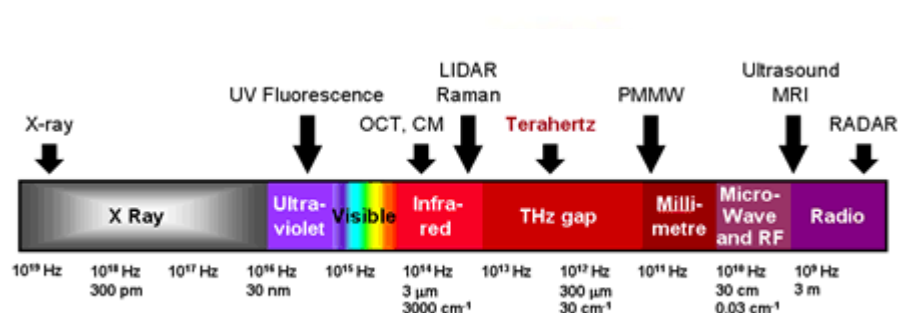


圖 1-1 電磁波頻譜

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

1-2 研究背景

(一)光濾波器

早期在 1967 年 Ulrich 提出了利用正方形孔洞柵狀陣列和互補的正方形金屬陣列發展出了電容性以及電感性的濾波器，最後結合電感性和電容性濾波器形成十字架型的金屬網狀結構濾波器，如圖 1-2 所示 [1]。十字架型金屬網狀結構因為其濾波效果相當良好，因此後來成為此類型光濾波器的主流。



圖 1-2 結合電感性和電容性濾波器形成十字架型的金屬網狀結構濾波器 [1]

回顧週期性金屬網狀結構濾波器就其結構主要分為兩種：

(1)厚金屬網：元件金屬兩面所接觸皆為空氣，即為一個獨立型的金屬網(freestanding metal mesh)。此金屬網結構有相關研究探討金屬網厚度對於其穿透頻譜中的共振波的影響[2][3][4]，並且控制厚度試圖達到良好的穿透率[5][6]。但厚金屬網製作較為繁雜，而且元件圖案形狀易形變。

(2)薄金屬網：元件金屬兩面所接觸的分別為基板和空氣，通常製作

過程為將金屬層沉積在基板面上，再利用微影製程作圖形轉移到金屬層，最後在蝕刻出所需要的圖形。此金屬網結構其穿透率較厚金屬網低，但其優點即為製作簡易。近年本實驗室試圖製作不同形狀的薄金屬網狀結構濾波器，例如圓形、正方形、十字架、雪花狀等，希望藉由改變形狀能改善薄金屬網結構濾波器較低穿透率的缺點。後來經實驗證明雪花狀的薄金屬網結構其穿透率可達到接近 1 的效果[7]。

(二)異常穿透現象

近年 Ebbesen 等人[8]於 1998 年提出在週期金屬孔洞下，當電磁波入射此結構時，在某些特殊頻率會有高穿透率的現象，稱此為異常穿透現象(extraordinary optical transmission，簡稱 EOT)。為了了解異常穿透背後的物理機制和未來可能在光學上的應用，後來很多相關的理論模型和實驗成果相繼發表，直到目前為止對於異常穿透的機制仍然有爭議。有學者認為異常穿透現象主要是由金屬表面的表面電漿子(surface plasmon polariton，簡稱 SPP)共振穿透所導致形成[8]，但另有說法認為是入射光激發了金屬孔洞內類似開放式的 Fabry-Perot 共振腔模態而產生異常穿透現象[9]。當入射光波段為兆赫波頻段時，此時金屬可以視為完美導體。而完美導體不具有表面電漿子的存在，但在 2004 年 Pendry 等人提出了類表面電漿子(spoof surface plasmon，簡

稱 SSP)的理論[10]。對於完美金屬而言，在週期性結構下會產生類表面電漿子，所以在兆赫波段時異常穿透的現象依然存在。

最近相關異常穿透的實驗研究主要為變化週期金屬孔洞深度、金屬孔洞面積大小、金屬孔洞形狀等。目前文獻上變化的金屬孔洞形狀有圓形[8]、矩形[11]、橢圓形[12]、L 形[13]、H 形[14]、同軸形[15]、十字架形[16][17][18][19]等。在這一連串改變金屬孔洞形狀實驗下，相關研究學者發現在不對稱的十字架金屬孔洞所量測到的穿透頻譜會跟入射光的偏振方向有關係[18][19]，但如果在對稱十字架金屬孔洞結構下看不到類似的現象。所以對於金屬孔洞結構濾波器來講，偏振的特性需要更進一步的研究和探討。



1-3 研究動機

鑑於目前討論週期性金屬十字架孔洞濾波器的穿透現象和偏振的關係，相關文獻討論的並不多且不夠完整[18][19]。因而我們試著利用本實驗室對於十字架孔洞金屬網所建立的模型程式，理論計算十字架薄金屬網結構對於電場方向互相垂直的 X、Y 方向的線偏振電磁波的個別穿透行為。並發現在不對稱的十字架結構下會讓 X、Y 電場方向電磁波個別的穿透頻譜之間產生差異，也就是 X、Y 電場方向電磁波穿透此不對稱結構產生了不同的相位改變量。藉由理論程式的計算結果，我們分別設計三種變化的不對稱十字架結構，並且利用半導體製程做出成品，接著進行實驗量測，最後有系統性的歸納實驗結果和理論模擬結果作比較，希望能更清楚薄金屬十字架孔洞結構對於偏振關係和衍生的相位差行為。

第二章 元件設計與製作過程

2-1 參數定義

如圖 2-1 所示，在此我們定義十字架正方形陣列的週期為 g 。十字架本身的形狀尺寸定義如圖二所示， $W1$ 和 $W2$ 各代表兩個互相垂直矩形的寬度， L 為寬度為 $W2$ 矩形的長度，而另一垂直矩形的長度則由 $b1$ 、 $W2$ 、 $b2$ 的總和來代表之。

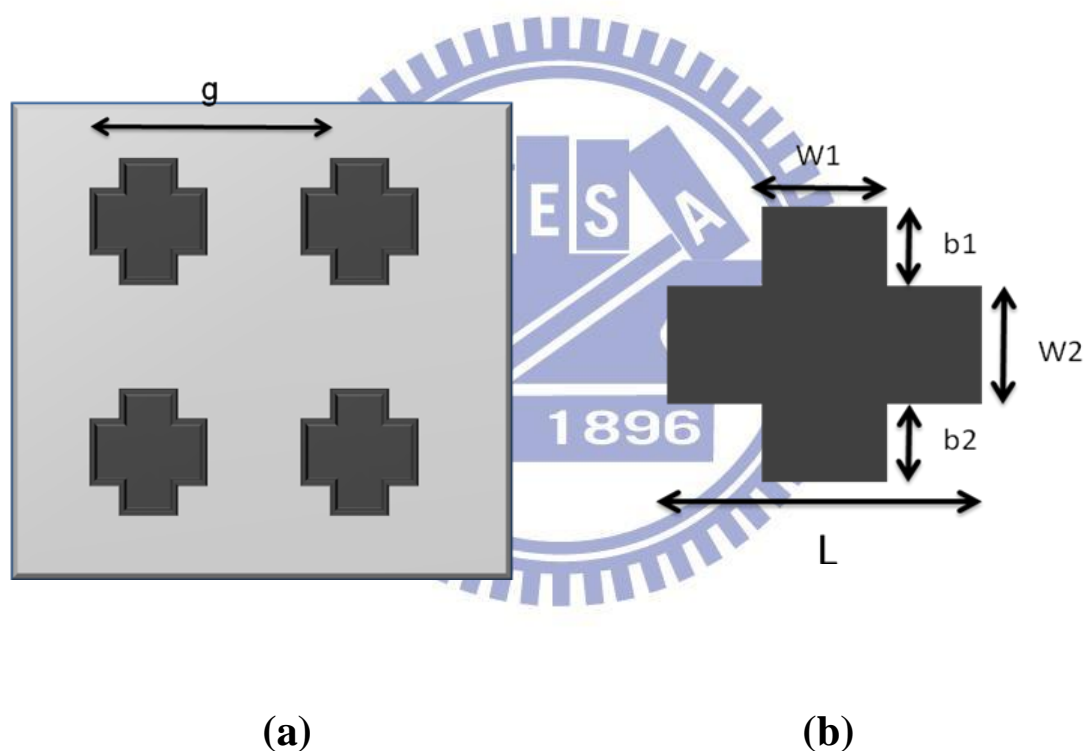


圖 2-1 十字架參數示意圖

2-2 製作元件項目

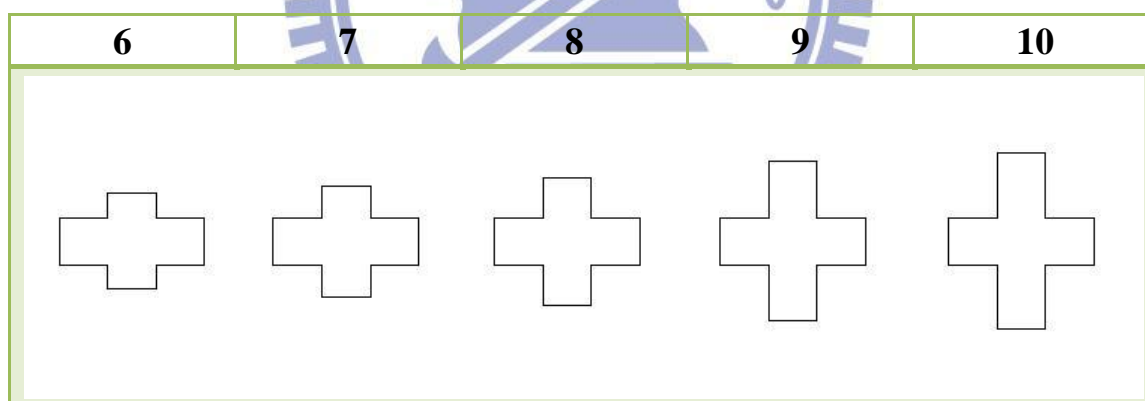
本研究將製作總共四種不同變化的不對稱十字架，以下將逐項做說明。

*兩軸對稱位置十字架

(表一)變化十字架單軸長度

編號	L(um)	W1(um)	W2(um)	b1(um)	b2(um)	g(um)
6	18	6	6	3	3	24
7	18	6	6	4	4	24
8	18	6	6	5	5	24
9	18	6	6	7	7	24
10	18	6	6	8	8	24

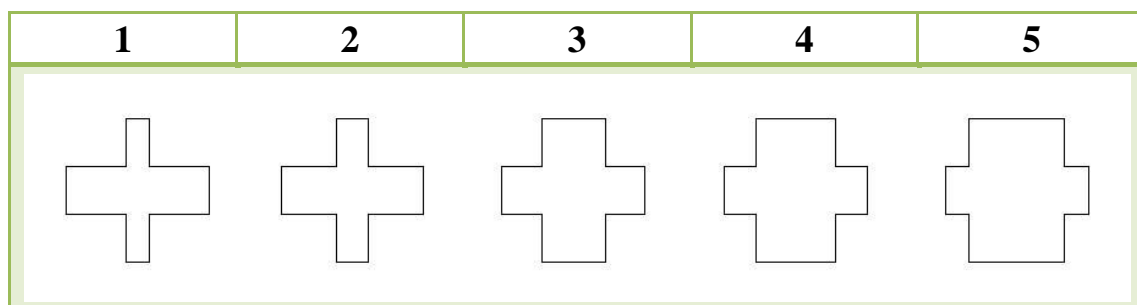
編號 6-10 所對應到的圖形變化如下：



(表二)變化十字架單軸寬度

編號	L(um)	W1(um)	W2(um)	b1(um)	b2(um)	g(um)
1	18	3	6	6	6	24
2	18	4	6	6	6	24
3	18	8	6	6	6	24
4	18	10	6	6	6	24
5	18	12	6	6	6	24

編號 1-5 所對應到的圖形變化如下:



(表三)變化十字架週期

編號	L(um)	W1(um)	W2(um)	b1(um)	b2(um)	g(um)
10	18	6	6	8	8	24
11	18	6	6	8	8	26
12	18	6	6	8	8	28
13	18	6	6	8	8	30



2-3 元件材料

本研究製作的元件其基板和金屬層選用的材料分別為矽基板和鋁金屬。選用矽基板的原因主要是製程方便簡易，如果選用聚乙烯(PE)片、鐵氟龍片等有機聚合物基板，元件製程過程當中須顧慮到高溫製程所導致基板可能形變彎曲。另外，金屬薄膜對於有機基板的附著相對於矽基板較為差，對於事後的黃光、蝕刻製程等都會造成不良影響，所以總和以上原因我們選擇矽來當基板。

至於金屬層可選用的金屬其實有鎳、銅、金等多種金屬。對於元件製作來說，這些金屬間並沒有特別明顯的優劣點。而此次選用鋁金屬主要還是考慮到後續我們採用的濕式蝕刻的蝕刻溶液泡製容易。



2-4 製程流程

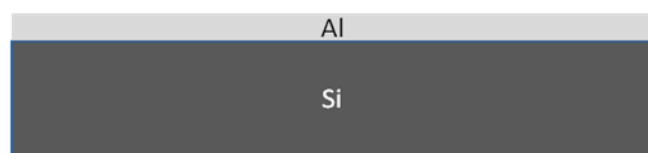
元件製作流程詳細敘述如下所示：

(1) RCA clean

為了去除晶圓表面污染物，提升後續沈積或成長之薄膜品質。

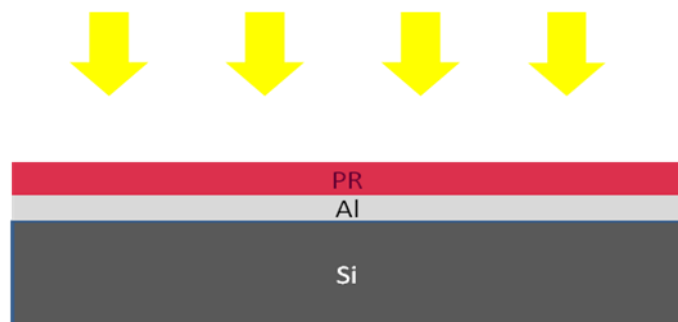
(2) 沉積鋁金屬層

利用熱阻絲蒸鍍系統來沉積厚度為 $0.2\mu\text{m}$ 鋁金屬層



(3) 微影製程

- I. 晶圓表面上 HMDS：增加光阻與基板之間的附著力。
- II. 光阻塗佈：利用旋轉塗佈的方式將光阻均勻塗佈在基板上，其中所使用的光阻為 FH6400，第一轉參數為 1500rpm(15 秒)，第二轉參數為 3500rpm(25 秒)。
- III. 軟烤： 0°C (90 秒)，烤去光阻大部份溶劑，增加和晶片附著力。
- IV. 曝光：將所設計的圖案從光罩轉移到光阻上，曝光參數為 14 秒。

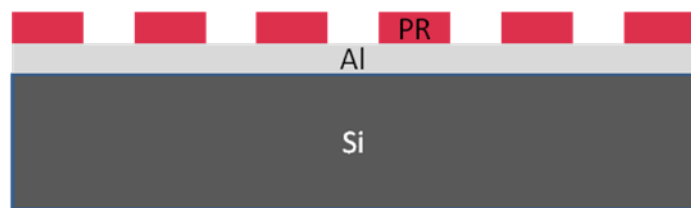


V. 曝後烤：約一分鐘，消除駐波效應，以防止圖案形變。

VI. 顯影：顯影劑為 FHD5，顯影時間 1 分鐘。

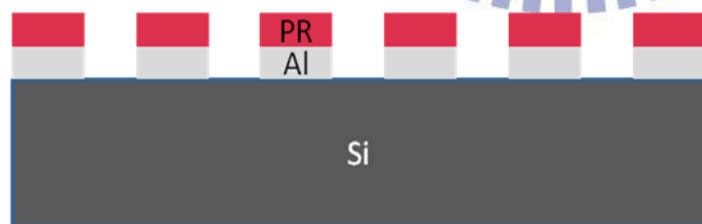
VII. 定影：以去離子水作為的定影劑，定影時間 5 分鐘。

VIII. 硬烤：120°C (30 分鐘)，將光阻中樹脂成分烤硬，以利於後續蝕刻處理。



(4)蝕刻

以鋁酸來蝕刻金屬鋁，進行蝕刻前必須將鋁酸加熱到 40°C。調配的鋁酸比例為： $H_3PO_4:HNO_3:CH_3COOH:H_2O=50:2:10:9$ 。蝕刻時間以目測為主，時間約 90 秒。



(5)去光阻

將元件成品浸入丙酮中以超音波震盪器去除晶片上的光阻，震盪時間 2 分鐘。

(6)以 D.I.water 沖洗成品 5 分鐘，再用氮氣槍吹乾，元件即完成。

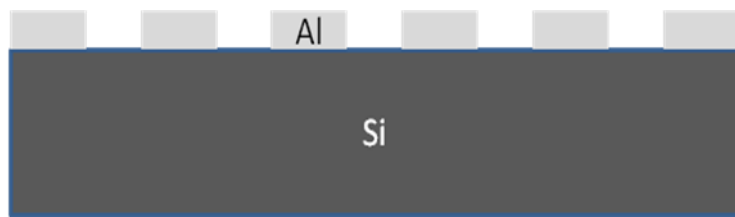


圖 2-2 為成品結構示意圖，而圖 X 則為使用光學顯微鏡所拍攝的實際金屬網，其中銀白色為鋁金屬，黑色部分為矽基板。

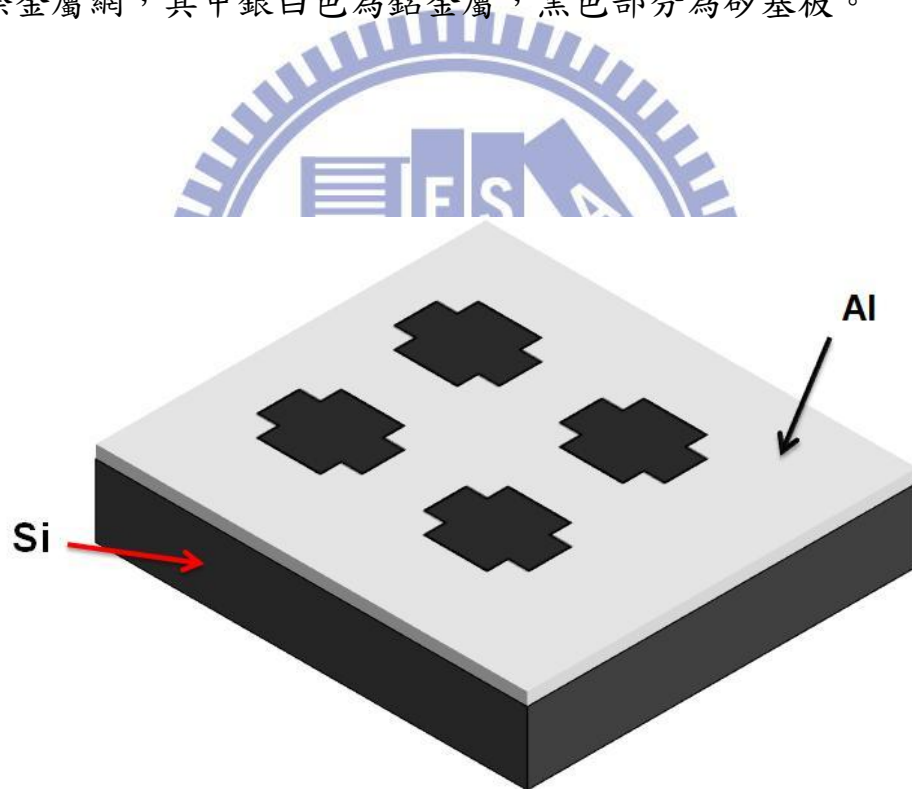
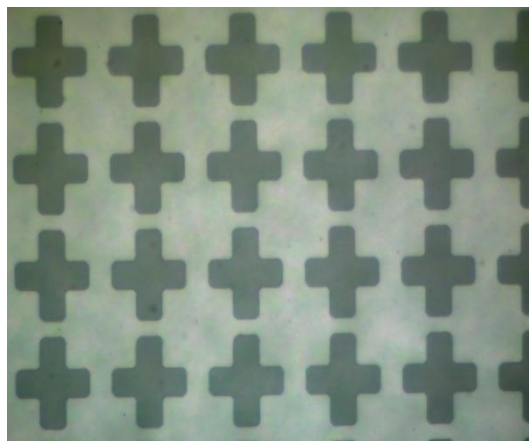


圖 2-2 元件結構圖



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2-3(a)(b)(c)(d) 光學顯微鏡所拍攝之金屬網

第三章 量測架設與原理

元件實際做出來以後，接下來就是量測元件穿透頻譜和相位差的特性。在本章將會介紹本研究的量測系統與實驗架設，並且說明如何量測元件與量測原理。

3-1 傅立葉轉換紅外線頻譜分析儀

本研究中主要使用傅立葉轉換紅外線頻譜分析儀來量測實驗樣品的穿透頻譜響應圖(Fourier Transform Infrared Spectroscopy -簡稱 FTIR)。本實驗室的量測儀器型號是”Bruker IFS 66v/S”，如圖 3-1 所示。

在此簡述 FTIR 基本的量測原理。FTIR 的光學系統主要是由麥克森(Michelson)干涉儀所組成，圖 3-2 中顯示了幾個英文代號分別為 S(訊號光源)、M1，M2(可將光源全反射的鏡子)、D(偵測器)。在此 FTIR 所使用的光源為汞燈，當光從汞燈發出後會先經過分光鏡，而此時分光鏡功能為讓光產生一半反射和一半穿透，反射的光會在固定不動的 M1 鏡子處產生全反射，另外穿透的光也會在可允許有 x 位移 M2 鏡子產生全反射。當兩道光重新在分光鏡匯聚時，反射光和穿透光將會有 $2x$ 的光程差，因此而產生干涉，這也就是最後量測所得到的干涉圖。但因為干涉圖不方便用於分析，所以我們會將所量測到的

干涉圖利用傅立葉轉換轉成頻譜響應圖。相關詳細原理可以參考 [20]。

當得到了待測元件在汞燈光源照射下的穿透頻譜圖以後，我們還需要量測汞燈光源穿透矽基板的頻譜圖。主要是因為一開始所量測得到的頻譜資料為相對強度，並非實際金屬網的穿透頻譜。最後把兩個頻譜圖在相對應的波數下相除，即可得到金屬網的穿透頻譜。

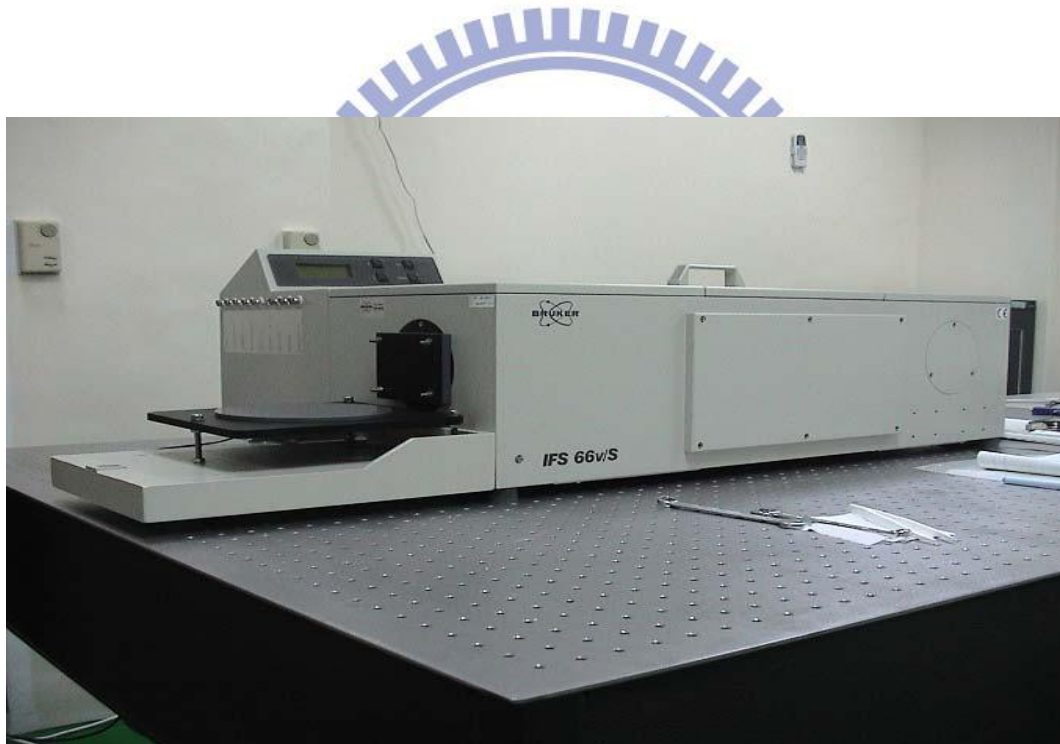


圖 3-1 FTIR 系統

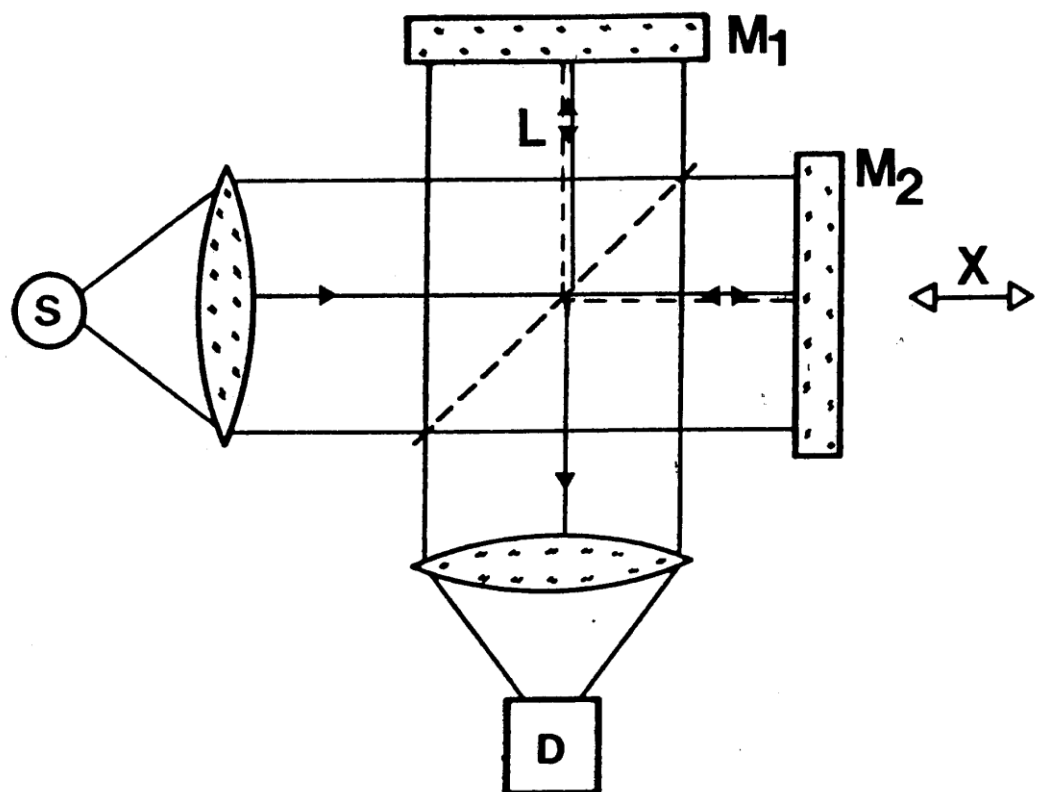


圖 3-2 麥克森干涉儀示意圖

3-2 量測架設

本研究的實驗架設採用量測相位延遲片相位移(phase retarder)的光學系統。此系統由偏振片(Polarizer)-相位延遲片(樣品)-分析片(Analyzer)所組成，如圖 3-3 所示。採用此光學量測系統主要原因除了可以量測 X、Y 電場方向的線偏光穿透樣品的頻譜圖，並且可以量測樣品元件是否有如程式模擬預期的相位差效果。系統中的偏振片與樣品各固定在一个可透過電腦進行自動控制的旋轉台，在此我們定義偏振片與樣品旋轉的角度分別為 α 和 θ ，而分析片固定不動。量測相位延遲片光學量測系統將置於 FTIR 系統的樣品區，如圖 3-4 所示。



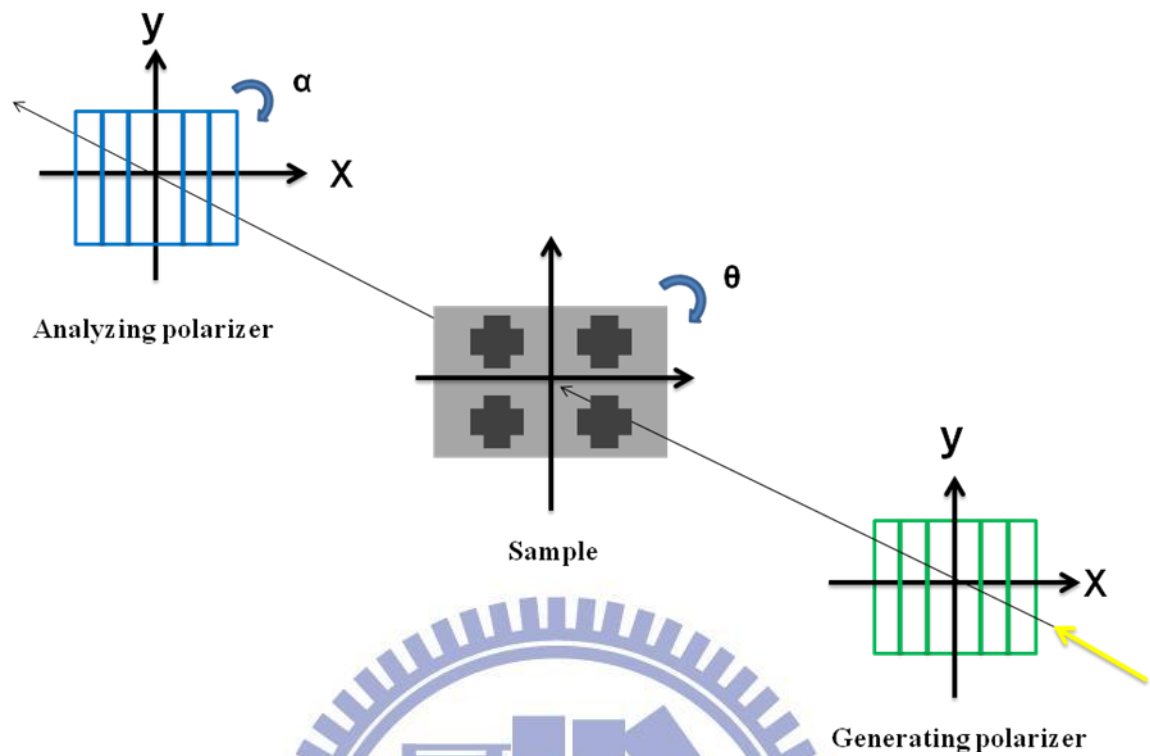


圖 3-3 實驗架設圖

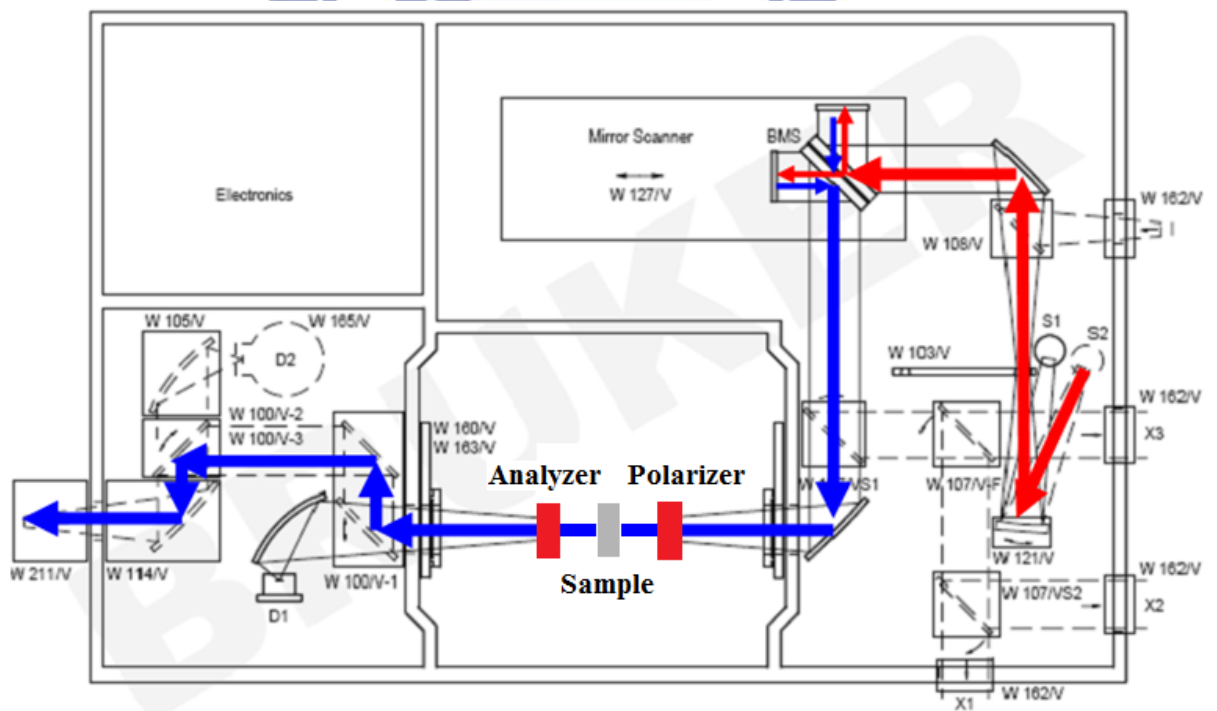


圖 3-4 FTIR 光路圖

3-3 量測原理

對於偏振片-相位延遲片-分析片所組成的光學系統，我們假設偏振片與分析片是完美的，亦即入射電磁波在沿著偏振片與分析片的偏光軸方向的電場分量將完全穿透，而垂直方向的電場分量將完全衰減。考慮相位延遲片兩側的入射電磁波和穿透電磁波之間會有以下式子關係：

$$E'_x(z, t) = p_x e^{+\frac{i\varphi}{2}} E_x(z, t), 0 \leq p_x \leq 1 \dots\dots (1)$$

$$E'_y(z, t) = p_y e^{-\frac{i\varphi}{2}} E_y(z, t), 0 \leq p_y \leq 1 \dots\dots (2)$$

(E_x 、 E_y 分別代表入射電磁波的 x 、 y 方向的電場分量； E'_x 、 E'_y 代表穿透相位延遲片後的電磁波的 x 、 y 方向電場分量。)

式子(1)、(2)代表穿透相位延遲片的電磁波，其 x 、 y 方向的電場分量之間產生了 φ 的相位差，意即我們想要量測的相位差量 φ 。另外，(1)、(2)兩式中出現的 p_x 、 p_y 分別代表在 x 方向與 y 方向介於 0 和 1 之間的電場振幅衰減常數。

接下來我們使用史托克向量(Stokes vector)以及穆勒矩陣(Mueller matrix)分別來描述光源的偏極化狀態以及光學元件[21]。根據史托克參數的定義，我們可以分別列出入射光與透射光的史托克向量的關係式，如(3)、(4)式所示：

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x E_x^* + E_y E_y^* \\ E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ E_x E_y^* + E_y E_x^* \\ i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \end{pmatrix} \dots\dots(3)$$

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E'_x E_x^* + E'_y E_y^* \\ E'_x E_x^* - E'_y E_y^* \\ E'_x E_y^* + E'_y E_x^* \\ i(E'_x E_y^* - E'_y E_x^*) \end{pmatrix} \dots\dots(4)$$

再來將(1),(2)式代入(3)、(4)式，我們可以發現以下關係式：

$$S'_0 = S_0 \dots\dots\dots(5-1)$$

$$S'_1 = S_1 \dots\dots\dots(5-2)$$

$$S'_2 = -S_2 \cos \varphi + S_3 \sin \varphi \dots\dots\dots(5-3)$$

$$S'_3 = -S_2 \sin \varphi + S_3 \cos \varphi \dots\dots\dots(5-4)$$

根據(5)的關係式，可以整理得到：

$$\begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} p_x^2 + p_y^2 & p_x^2 - p_y^2 & 0 & 0 \\ p_x^2 - p_y^2 & p_x^2 + p_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2p_x p_y \cos \varphi & 2p_x p_y \sin \varphi \\ 0 & 0 & -2p_x p_y \sin \varphi & 2p_x p_y \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

由上式我們可以知道代表相位延遲片的穆勒矩陣為下式：

$$M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} p_x^2 + p_y^2 & p_x^2 - p_y^2 & 0 & 0 \\ p_x^2 - p_y^2 & p_x^2 + p_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2p_x p_y \cos \varphi & 2p_x p_y \sin \varphi \\ 0 & 0 & -2p_x p_y \sin \varphi & 2p_x p_y \cos \varphi \end{pmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

為了後續計算方便，將(6)式中 $\frac{p_x^2 + p_y^2}{2}$ 、 $\frac{p_x^2 - p_y^2}{2}$ 、 $p_x p_y$ 分別令為 α 、 β 、 γ 。

因此可將(6)式整理為下式：

$$M = \begin{pmatrix} \alpha & \beta & 0 & 0 \\ \beta & \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \cos \varphi & \gamma \sin \varphi \\ 0 & 0 & -\gamma \sin \varphi & \gamma \cos \varphi \end{pmatrix} \dots\dots (7)$$

對於一個可以做 θ 角旋轉的相位延遲片的穆勒矩陣，應改寫為下式：

$$M(\varphi, \theta) = M_R(-2\theta) M M_R(2\theta) \dots\dots (8)$$

而(8)式中的 $M_R(-2\theta)$ 為旋轉矩陣，其形式如下式：

$$M_R(2\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots (9)$$

將(7)、(9)式代入(8)式中， $M(\varphi, \theta)$ 其形式如下式所示：

$$\begin{pmatrix} \alpha & \beta \cos 2\theta & \beta \sin 2\theta & 0 \\ \beta \cos 2\theta & \alpha \cos^2 2\theta + \gamma \cos \varphi \sin^2 2\theta & (\alpha - \gamma \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta & -\gamma \sin \varphi \sin 2\theta \\ \beta \sin 2\theta & (\alpha - \gamma \cos \varphi) \sin 2\theta \cos 2\theta & \alpha \sin^2 2\theta + \gamma \cos \varphi \cos^2 2\theta & \gamma \sin \varphi \cos 2\theta \\ 0 & \gamma \sin \varphi \sin 2\theta & -\gamma \sin \varphi \cos 2\theta & \gamma \cos \varphi \end{pmatrix}$$

現在考慮當相位延遲片 $\theta = 45^\circ$ 和分析片 $\alpha = 90^\circ$ ，而光學系統中的偏振片其偏光軸平行 x 方向情況。在此偏振片和分析片的穆勒矩陣分別可寫成(10)、(11)式：

$$M_x = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

$$M_y = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

我們可以將偏振片-相位延遲片-分析片所組成的光學系統以一個穆勒矩陣來表示，如下式：

$$M_s = M_y M(\varphi, \theta = 45^\circ) M_x \dots \dots \dots (12)$$

在此將(10)、(11)式待入(12)式， M_s 可得：

$$M_s = \frac{1}{4}(\alpha - \gamma \cos \varphi) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (13)$$

假設入射光為未偏振光的情況，可由(13)式計算得到透射光的史托克向量：

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} &= M_s \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{4}(\alpha - \gamma \cos \varphi) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{4}(\alpha - \gamma \cos \varphi) I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (14) \end{aligned}$$

由(14)式我們可得到當 $\theta = 45^\circ$ ， $\alpha = 90^\circ$ 時，偵測器所量測到的光束強度為：

$$\begin{aligned} I(\varphi, \theta = 45^\circ) &= \frac{I_0}{4}(\alpha - \gamma \cos \varphi) \\ &= \frac{I_0}{8}(p_x^2 + p_y^2 - 2p_x p_y \cos \varphi) \dots \dots \dots (15) \end{aligned}$$

(15)式中 I_0 為入射光的強度，而此時偵測器上的強度 I_D 與 I_0 的關係如下

式：

$$I_D = \frac{I_0}{2}$$

將上式代入(15)式整理可得：

$$I(\varphi, \theta = 45^\circ) = \frac{I_D}{4} (p_x^2 + p_y^2 - 2p_x p_y \cos \varphi) \dots \dots \dots (16)$$

將(16)式移項整理可得：

$$\cos \varphi = \frac{p_x^2 + p_y^2 - \frac{4I(\varphi, \theta = 45^\circ)}{I_D}}{2p_x p_y} \dots \dots \dots (17)$$

(17)式其中 p_x 與 p_y 為樣品於 X-偏振光與 Y-偏振光入射下的穿透率，

如下所示：

$$p_x = \sqrt{\frac{I_X}{I_D}} \dots \dots \dots (18)$$

$$p_y = \sqrt{\frac{I_Y}{I_D}} \dots \dots \dots (19)$$

將(18)、(19)式代回(17)式中可得到：

$$\cos \varphi = \frac{I_X + I_Y - 4I(\varphi, \theta = 45^\circ)}{2\sqrt{I_X I_Y}} \dots \dots \dots (20)$$

(20)式中的 I_X 、 I_Y 、 $I(\varphi, \theta = 45^\circ)$ 即為實驗量測中所需得到的，最後再

將(20)式取反三角函數，即可得到相位差 φ 。

第四章 實驗結果與討論

4-1 前提說明

在此我們所設計的三種變化的不對稱十字架結構的金屬網濾波器，其工作頻率範圍為 3 THz ($100\text{cm}^{-1}\sim 120\text{cm}^{-1}$)附近(週期 $24\text{um}\sim 30\text{um}$)。本實驗所設計的實驗樣品的長寬大小皆有一定限制範圍。最小線寬的部分因為實驗製程所使用的是濕式蝕刻，所以線寬 3um 為此製程的極限，而長度的大小也不能超過我們所設定的週期。另外入射線偏光的電場 X、Y 方向定義如下圖所示。



圖 4-1 入射光的電場 X、Y 方向定義

4-2 程式計算方法簡略說明

在程式的計算中，將金屬視為完美導體，所計算的結構為十字架型孔洞以正方形週期排列而成，如下圖所示，在這裡考慮金屬層下方有基板的情況。

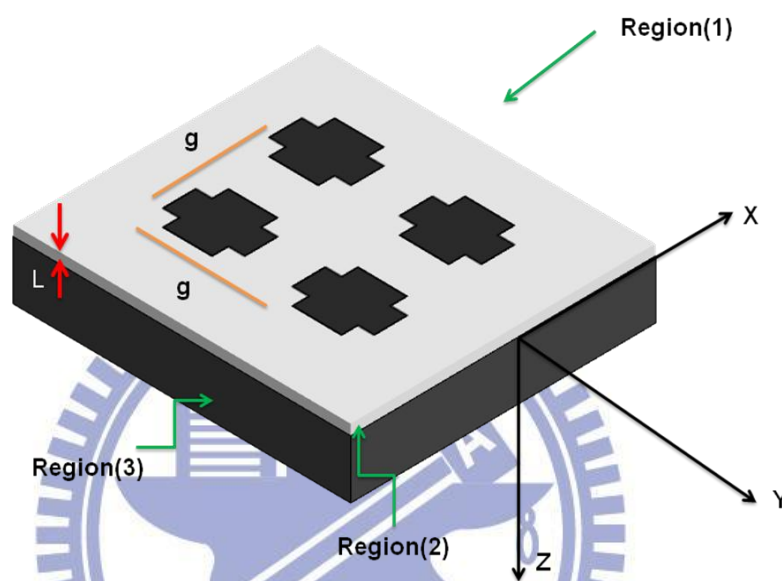


圖 4-2 金屬週期十字架孔洞示意圖

在此使用平面波為基底去展開區域(一)以及區域(三)的電磁波；而區域(二)內十字架孔洞內的電磁波則用十字架形狀的波導模態[22]去展開，此方法稱為基底展開法。當區域(一)(二)(三)電磁波分別使用平面波基底和十字架形狀的波導模態展開後，其係數的關係可由交界面的邊界條件來決定，如下圖所示。而穿透率的定義為透射光在 Z 方向的能量流除以入射光在 Z 方向的能量流，根據 Poynting vector 計算即可得到穿透率。詳細的計算過程可參照[23]。

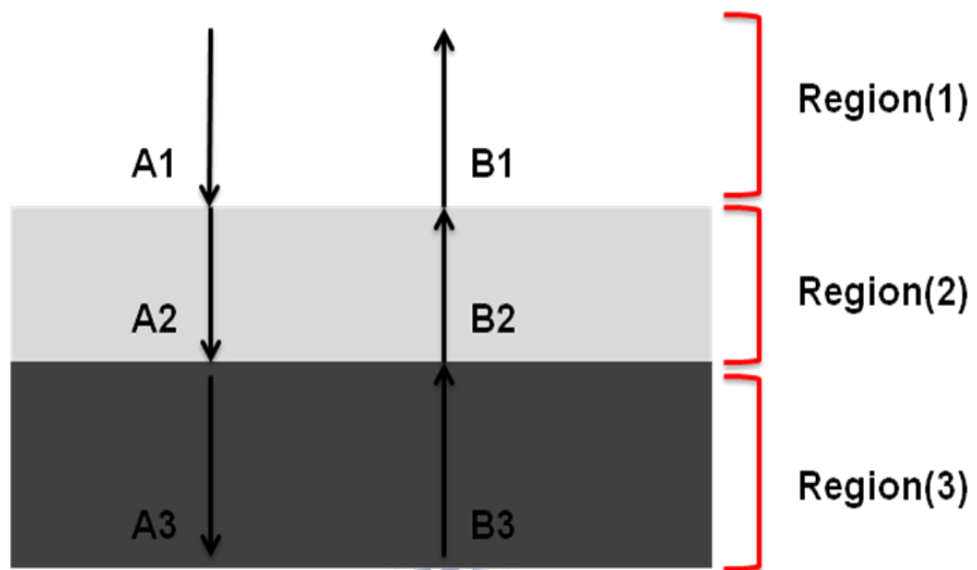
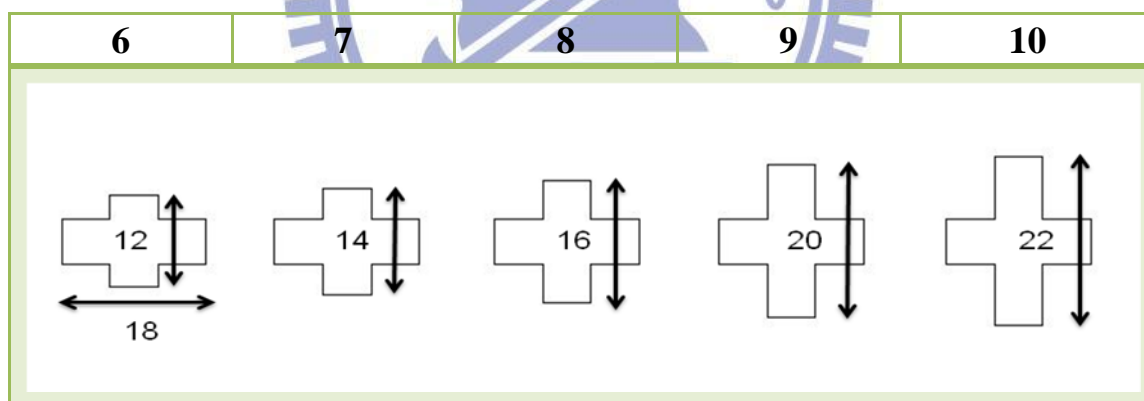


圖 4-3 基底展開法示意圖(A1、B1 為區域(一)的展開係數；
A2、B2 為區域(二)的展開係數；A3、B3 為區域(三)的係數)

4-3 實驗結果說明

利用程式理論計算我們發現不對稱十字架孔洞金屬網濾波器具有過濾入射光偏振的能力，並能使電場互相正交的兩入射偏振光產生特定相位差。我們可藉由調變十字架單軸的長或寬來產生不對稱的十字架。為了觀察變化十字架長或寬分別對於入射光偏極與相位差的影響，我們設計並製作了兩組分別變化長和寬的實驗樣品。最後，我們還設計一組變化週期的實驗樣品，觀察週期對於相位差的影響。量測實驗結果如下所示：

(1)變化十字架單軸長度：



觀察 X，Y 電場方向電磁波穿透樣品的頻譜圖實驗與模擬結果如下所示：

X 方向(↔) 穿透頻譜(實驗)

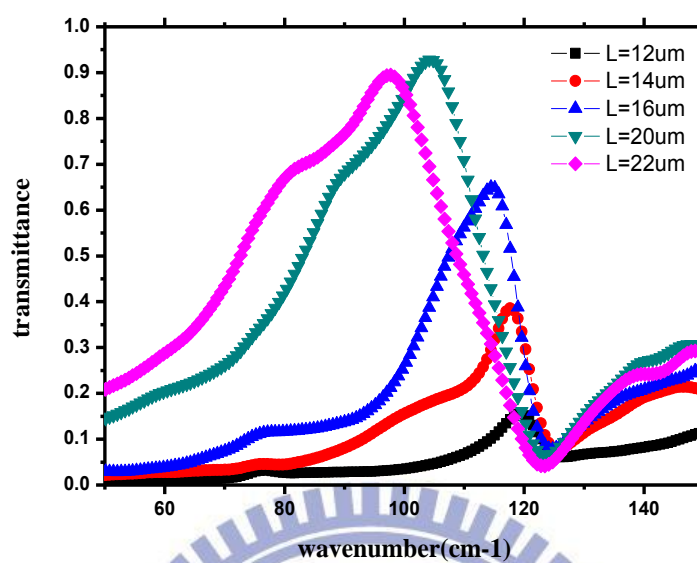


圖 4-4 <變化長度>X 方向穿透頻譜(實驗)

X 方向(↔) 穿透頻譜(模擬)

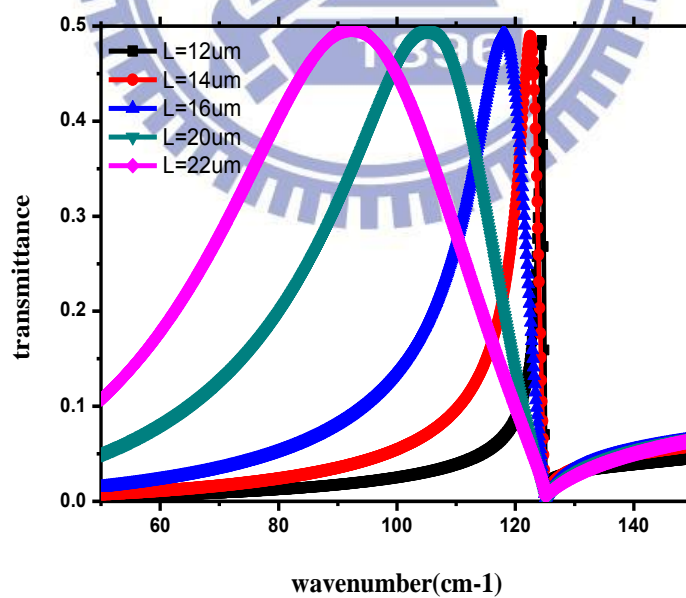


圖 4-5 <變化長度>X 方向穿透頻譜(模擬)

(註 1：實驗所入射的光源為 X 偏振光，而模擬結果的入射光源為線

偏振 45 度光，所以兩頻譜之理想穿透峰值有兩倍之差異。)

Y 方向 (↑) 穿透頻譜(實驗)

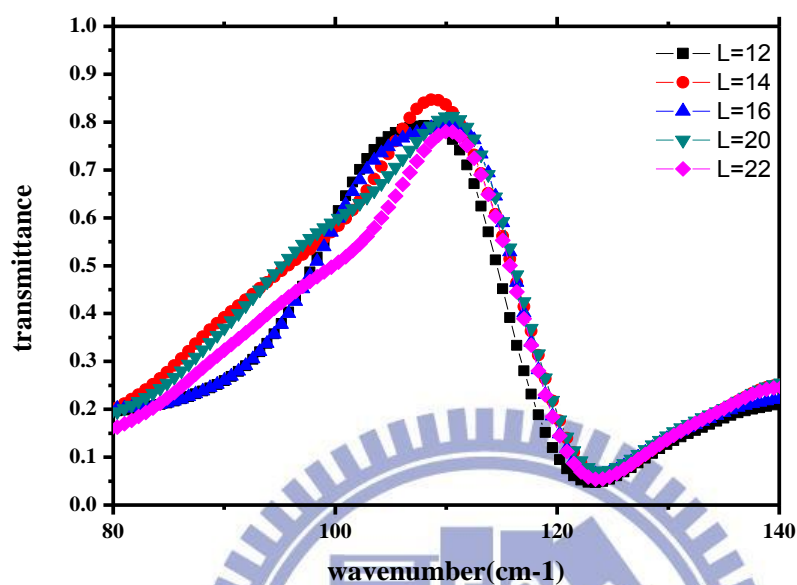


圖 4-6 <變化長度>Y 方向穿透頻譜(實驗)

Y 方向 (↑) 穿透頻譜(模擬)

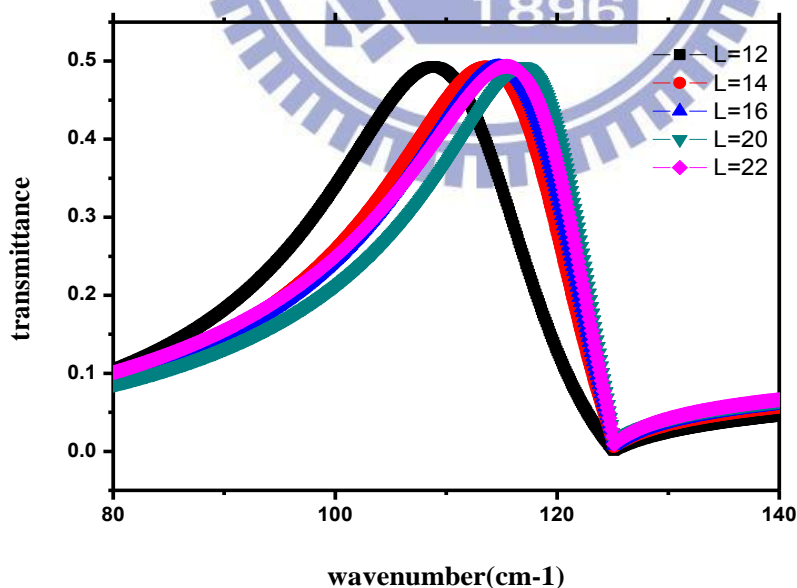


圖 4-7 <變化長度>Y 方向穿透頻譜(模擬)

(註 2：實驗所入射的光源為 Y 偏振光，而模擬結果的入射光源為線

偏振 45 度光，所以兩頻譜之理想穿透峰值有兩倍之差異。)

從圖 4-4~4-7 中，我們可以觀察到 $L=12\mu\text{m}$ 曲線的 X 方向穿透率相當的低，而元件 $L=12\sim 22\mu\text{m}$ Y 方向的穿透率都有一定的強度。也就是說當一入射光穿透過 $L=12\mu\text{m}$ 的元件，幾乎只有電場 Y 方向分量可以穿透。因此如果要利用變化單軸長的不對稱十字架金屬網來製作相位延遲片，為了能同時兼顧 X、Y 方向穿透強度，所以長度的變化範圍有一定的限制。另外在 X、Y 方向穿透頻譜中會有急劇下降的位置，此位置剛好就是對應到雷利波長(Rayleigh wavelength，也就是波長等於週期乘上介電常數)。

再來我們來討論 X、Y 方向穿透頻譜共振波波峰位置隨十字架幾何形狀的變化。為了分析方便，將實驗樣品長度的變化對實驗與模擬結果的 X、Y 方向穿透頻譜內的共振波波峰位置作圖，如下所示：

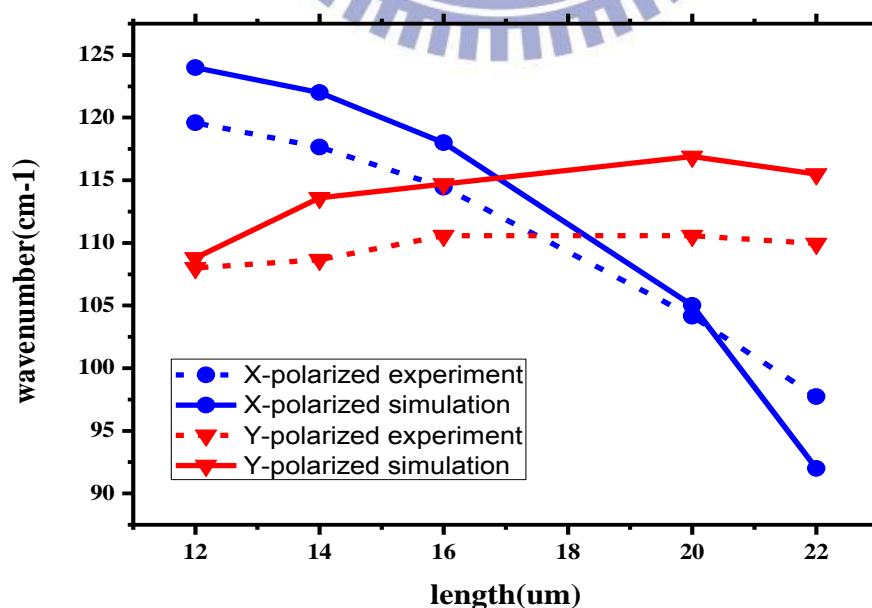


圖 4-8 波峰位置對於長度變化關係圖(1)

基本上 X、Y 方向穿透頻譜的峰值位置隨著長度變化的趨勢，實驗與模擬結果定性上是符合的。另外，相較於 X 方向穿透頻譜的峰值位置，我們可以發現 Y 方向穿透頻譜的峰值位置隨著長度變化並沒有太大的移動。由[23]得知，對於十字架孔洞穿透行為可以用兩個互相垂直的長方形孔洞去作近似，如圖 4-10 所示。垂直方向的長方形對應到 $TE_{0,1}$ 波導模態，而水平方向的長方形對應到 $TE_{1,0}$ 波導模態。 $TE_{0,1}$ 波導模態的電場方向為 X 方向，因此 X 方向的穿透行為是由 $TE_{0,1}$ 所主導； $TE_{1,0}$ 波導模態的電場方向為 Y 方向，因此 Y 方向的穿透行為是由 $TE_{1,0}$ 所主導。回到目前我們的情況，現在樣品所變化的為垂直方向的長方形長度，因此可以預期十字架孔洞 X 方向的穿透頻譜會有所變化，並且十字架孔洞 X 方向的穿透行為會跟垂直長方形的穿透行為一致。如下圖所示：

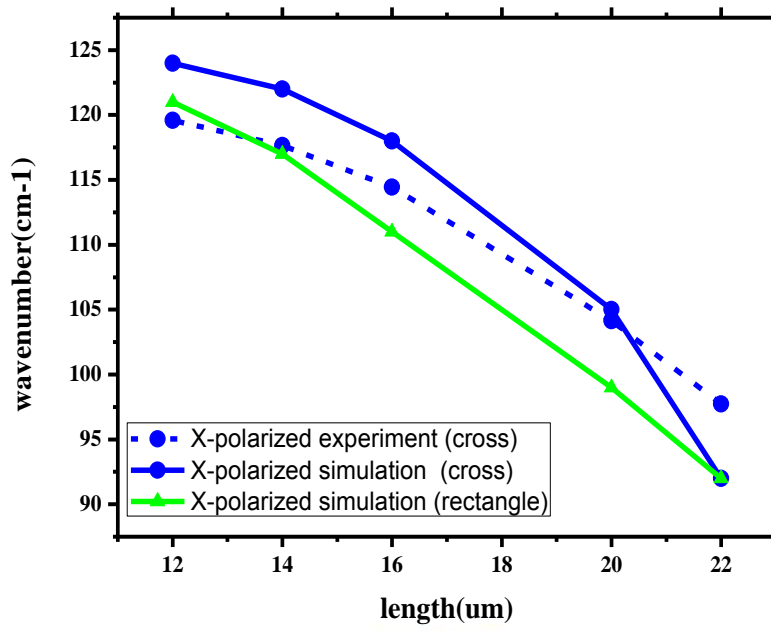


圖 4-9 波峰位置對於長度變化關係圖(2)

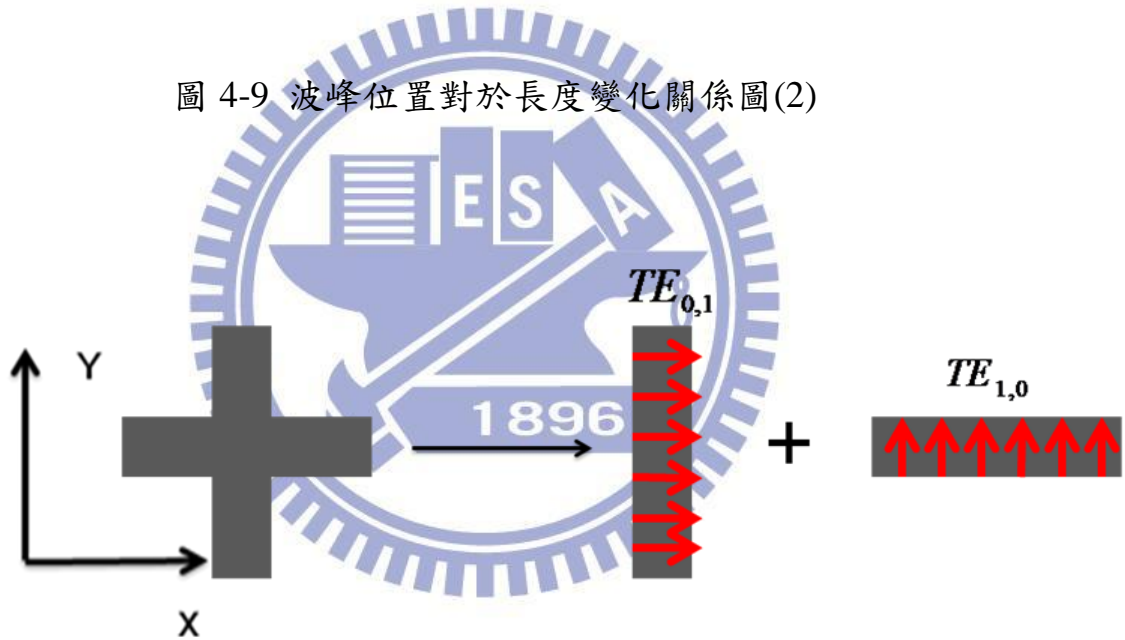


圖 4-10 十字架孔洞近似成兩個互相正交矩形孔洞示意圖

另外在目前的情況下，十字架的水平方向長方形大小長度是不變的，因此推論十字架 Y 方向的穿透頻譜隨著垂直方向長方形的長度變化應當不會有所變動。但我們可以看到圖 4-8 所示，Y 方向穿透頻譜的峰值位置隨著長度變化還是小範圍的變化。所以這顯示利用兩個互相獨立且垂直的矩形波導來分析只是一種近似的方法，需要更進一步修正。

在此我們可以發覺有基板的薄金屬十字架孔洞和獨立型厚金屬十字架孔洞有相同類似的穿透行為[24]。我們知道對於光入射到薄金屬十字架孔洞所激發的波導模態在金屬洞內皆為指數遞減的方式傳播 (cut-off mode)，跟獨立型厚金屬的十字架孔洞內存在有可以傳遞的波導模態不同。但因為我們所製作的薄金屬十字架孔洞金屬厚度夠薄，所以在薄金屬孔洞內波導的傳播還沒損耗太多，就從基板穿透出來。因此最後我們才可以觀察到薄金屬十字架孔洞和獨立型厚金屬的十字架孔洞有相同類似的穿透行為。

接下來觀察相位差量測和模擬的結果，如下圖所示：

相位差改變量圖(實驗)

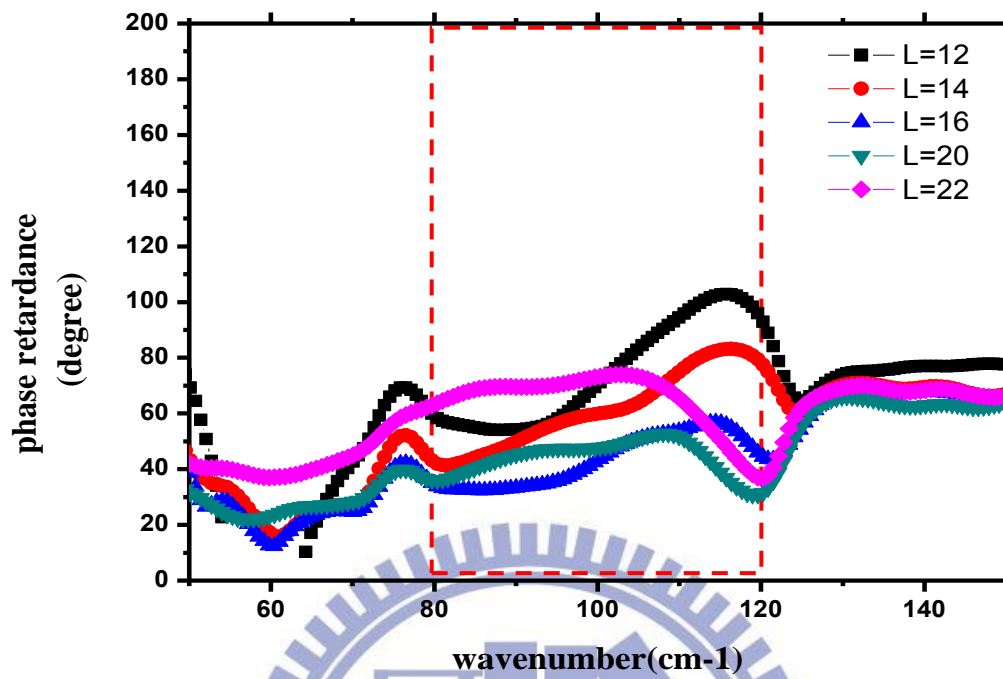


圖 4-11 <變化長度>相位差改變量圖(實驗)

相位差改變量圖(模擬)

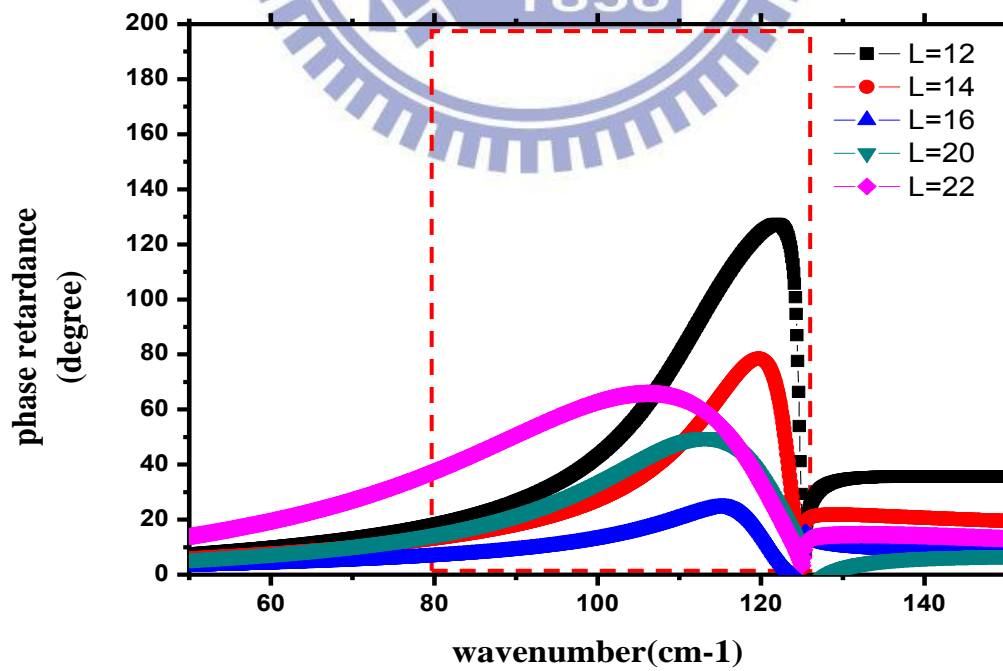


圖 4-12 <變化長度>相位差改變量圖(模擬)

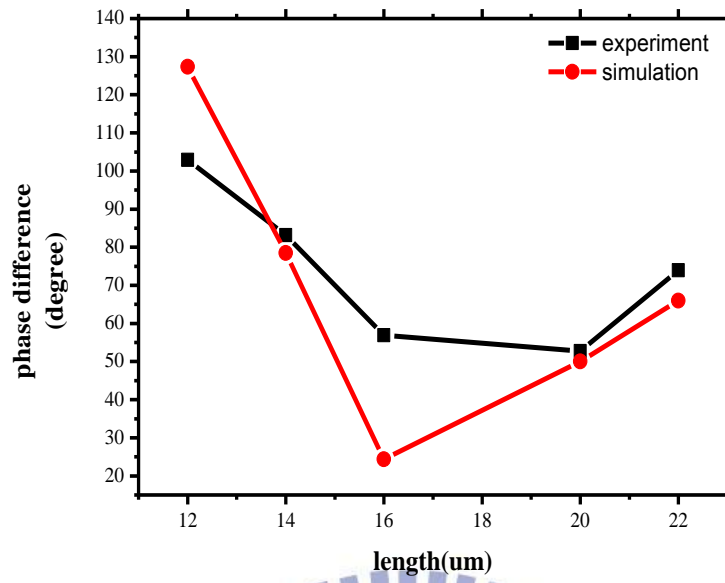


圖 4-13 波峰相位差對於長度變化關係圖(紅色虛線框內)(1)

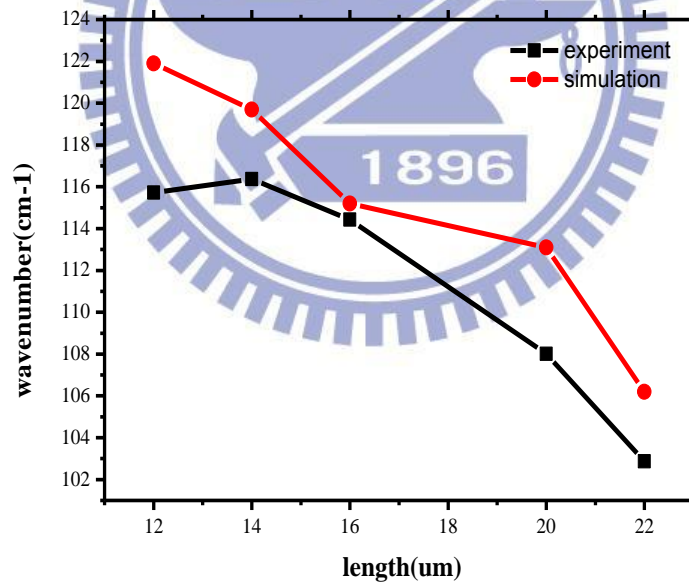


圖 4-14 相位差波峰位置對於長度變化(紅色虛線框內)(1)

(註 3：圖 4-12 中編號 9,10 兩條線原始模擬出來結果相位差為負值，但在此我們想比較的為相位差量，並且實驗結果所使用的相位差計算公式只能計算出正值的相位差，基於上述原因我們將圖 4-12 中編號 9,10 兩條線取絕對值，方便跟實驗結果做比較。)

圖 4-11、4-12 中紅色虛線框為 $\theta=45^\circ, \alpha=90^\circ$ 時，偵測器量測到元件穿透強度的範圍，在此範圍以外因為穿透強度趨近為零，所以在紅色虛線框內的相位差改變量較為可信。我們進一步將圖 4-11、4-12 紅色虛線框內所對應到的波峰相位差值對長度變化作圖和波峰位置對長度變化作圖，如圖 4-13、4-14 所示。我們可以看到兩張圖所呈現的趨勢是實驗與模擬結果相似。圖 4-11、4-12 中定量上造成實驗與模擬產生的落差，可能原因有可能為下列幾項：(1) 實際元件的形狀不是最理想的十字架形狀。(2) 實驗上量測的誤差，例如：不完美之偏振片、實驗量測時旋轉樣品與偏振片的角度誤差，以及量測上頻譜解析度所產生的誤差。(3)所使用的模擬程式沒考慮金屬網下的基板產生的影響等。

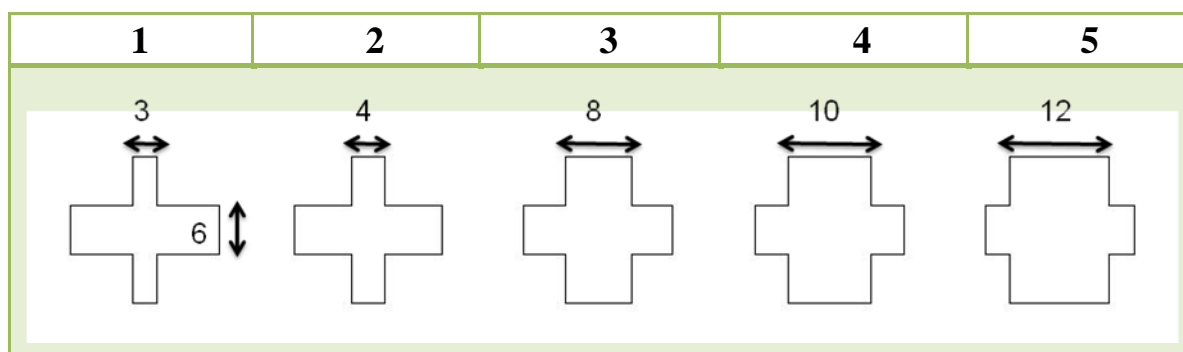
觀察圖 4-11~4-13 中可以發現對於改變十字架單軸長度而言，當十字架兩軸的長度相差越大，所造成的相位差改變量會越大。但如果十字架兩軸長度相差極大可能會產生壓縮入射光的兩個互相垂直方向電場分量其中一個分量的穿透率。若以製作相位延遲片為考量，當

入射光穿透元件後只能使兩個互相正交的電場分量穿透其中一個分量，而所產生的相位差量是沒有意義的。

對於有基板的薄金屬十字架孔洞所產生的相位差現象，目前還無法詳細了解產生的物理機制。由[23]可知，獨立型厚金屬不對稱十字架孔洞所產生的相位差是因為可傳遞的波導模態在金屬孔洞內獲得了不同的相位改變量。但在有基板的薄金屬十字架孔洞下，孔洞內部不會存在有可傳遞的波導模態，因此相位差的產生跟獨立型的厚金屬不對稱十字架孔洞不同。



(2)變化十字架單軸寬度：



觀察 X，Y 電場方向電磁波穿透樣品的頻譜圖實驗與模擬結果，如圖 4-15~4-18 所示。在此可以看到對於改變十字架單軸寬的變化，不會看到如改變十字架單軸長時，入射光穿透元件後只能使兩個互相正交的電場分量穿透其中一個分量的情形。W=3~12 μ m 元件在 X，Y 方向的穿透率皆有一定的強度。

X 方向(\longleftrightarrow)穿透頻譜(實驗)

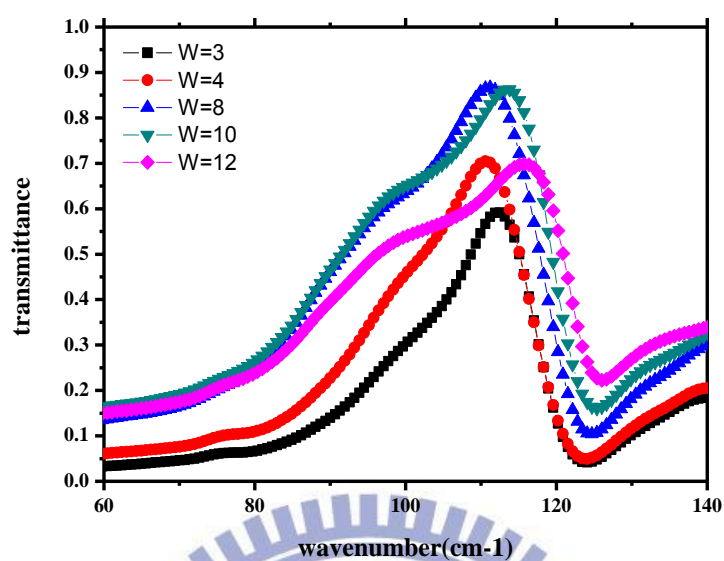


圖 4-15 <變化寬度> X 方向穿透頻譜(實驗)

X 方向(\longleftrightarrow)穿透頻譜 (模擬)

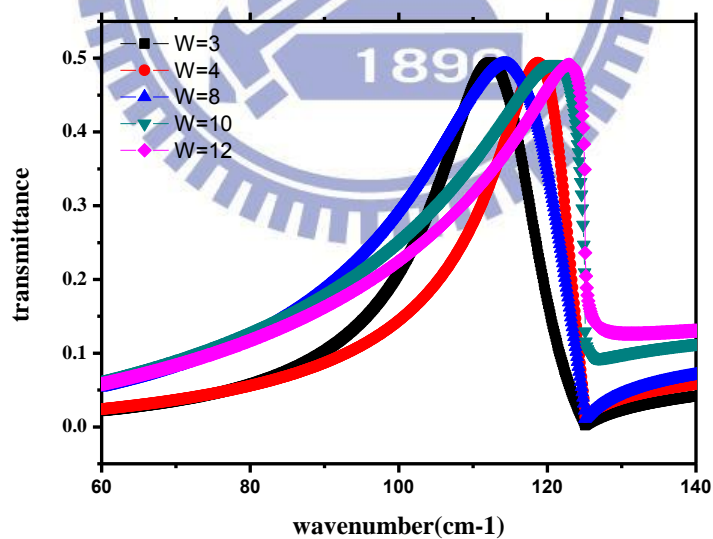


圖 4-16 <變化寬度> X 方向穿透頻譜(模擬)

(註 4：實驗所入射的光源為 X 偏振光，而模擬結果的入射光源為線偏振 45 度光，所以兩頻譜之理想穿透峰值有兩倍之差異。)

Y 方向 (\updownarrow) 穿透頻譜(實驗)

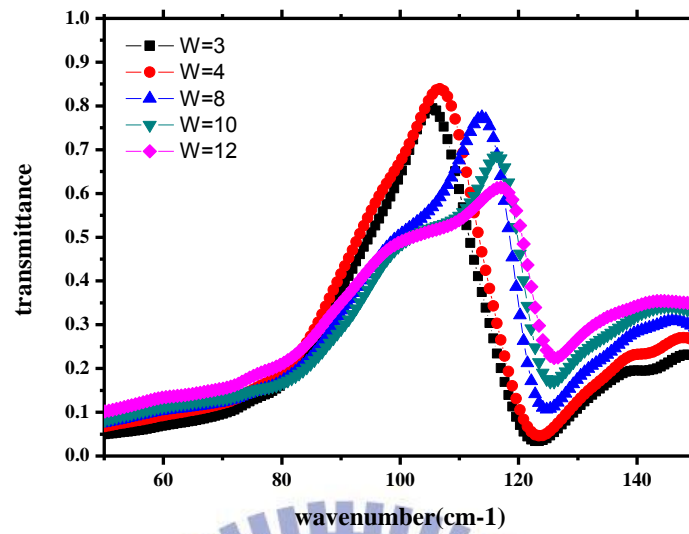


圖 4-17 <變化寬度> Y 方向穿透頻譜(實驗)

Y 方向 (\updownarrow) 穿透頻譜(模擬)

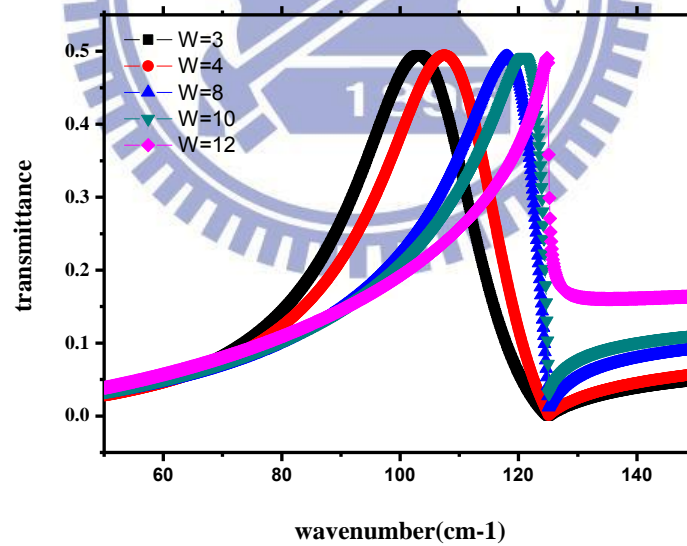


圖 4-18 <變化寬度> Y 方向穿透頻譜(模擬)

(註 5：實驗所入射的光源為 Y 偏振光，而模擬結果的入射光源為線偏振 45 度光，所以兩頻譜之理想穿透峰值有兩倍之差異。)

至於 X、Y 方向穿透頻譜內的共振波波峰位置的變化，在此一樣將實驗樣品寬度的變化對實驗與模擬結果的 X、Y 方向穿透頻譜內的共振波波峰位置作圖來做分析，如下圖所示：

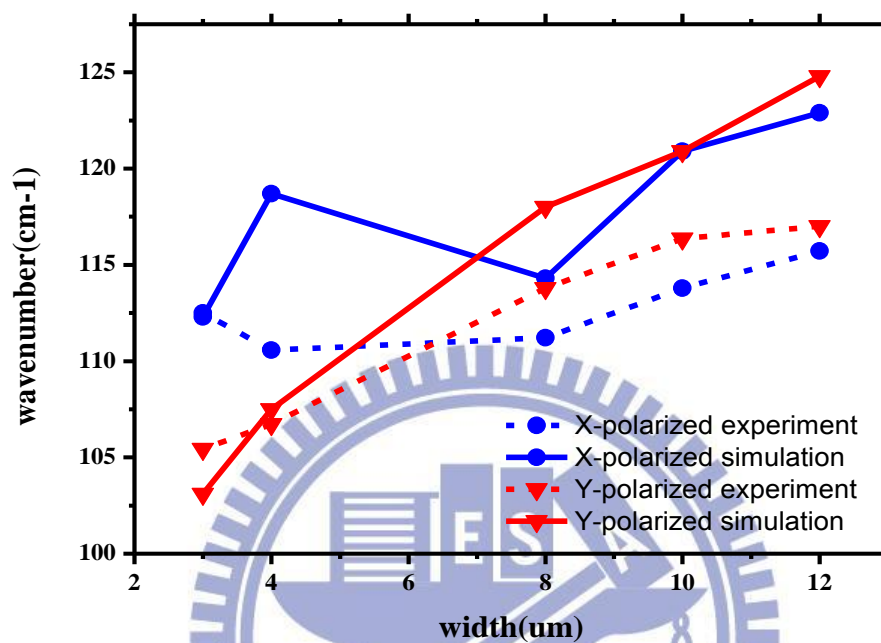


圖 4-19 波峰位置對於寬度變化關係圖

很明顯的 X 方向的穿透行為實驗與模擬的結果不同，但 Y 方向的穿透行為趨勢，實驗與結果相當一致。造成 X 方向的穿透行為，實驗與模擬的不一致情形目前還不清楚。如果用兩個互相垂直的長方形孔洞去近似十字架孔洞穿透行為，目前所變化的為垂直長方形的寬度，所以預期 X 方向的穿透頻譜不會有所變化，但圖 4-19 已告訴我們實驗與模擬 X 方向的穿透頻譜會有不規則變化。另外，Y 方向穿透行為的趨勢也難以運用現有的矩形波導模態來解釋，所以在變化十字架單臂寬度下，用兩個互相垂直的長方形孔洞去近似十字架孔洞穿

透行為是有問題的。

再來觀察相位差的結果。圖 4-20~4-23 中我們可以看到實驗與模擬結果趨勢相當不一致，至於不一致的主要原因目前還不得而知。另外，圖 4-21 中模擬結果的 $L=10、12\mu\text{m}$ 在頻段為 120cm^{-1} 附近有尖端的波峰存在，而圖 4-20 中實驗上 $L=10、12\mu\text{m}$ 是看不到尖端波峰的存在。主要原因為量測上的解析度問題，造成實驗結果在頻段為 120cm^{-1} 附近波峰的消失。此外，圖 4-22 中我們觀察到改變單軸的寬度變化所對應到的相位差改變量並沒有一定的趨勢可循，並且單軸的寬度變化對應到的相位差變化量相對於單軸的長度變化來的小，無論是實驗與模擬都有類似結果。



相位差改變量圖(實驗)

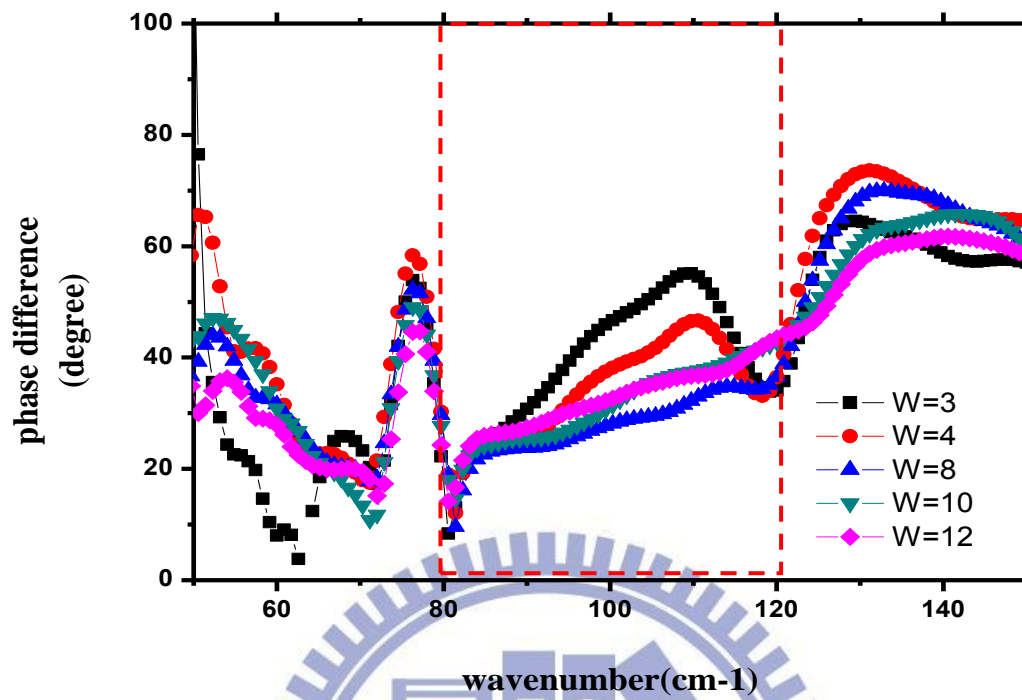


圖 4-20 <變化寬度>相位差改變量圖(實驗)

相位差改變量圖(模擬)

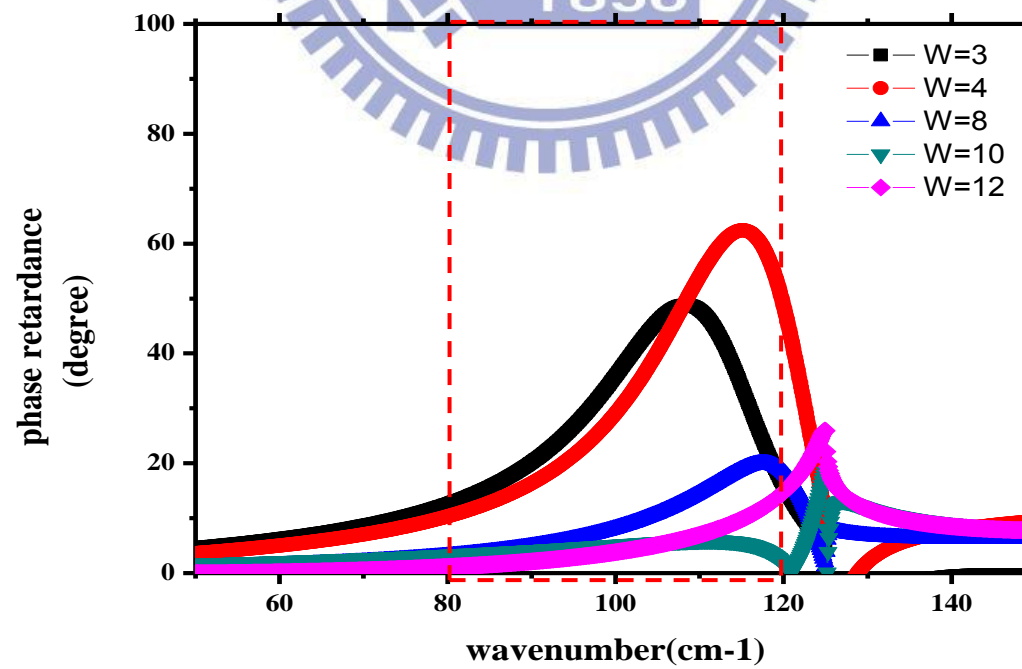


圖 4-21 <變化寬度>相位差改變量圖(模擬)

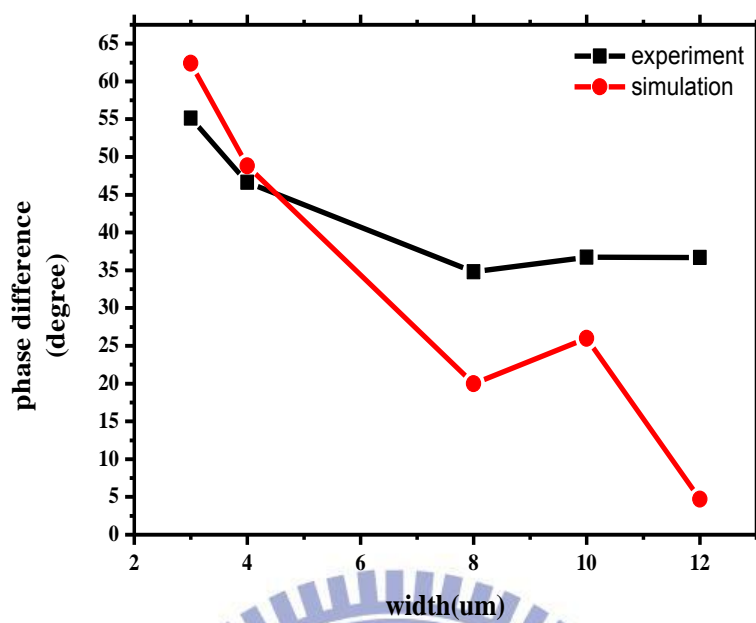


圖 4-22 波峰相位差對於長度變化關係圖(紅色虛線框內)(2)

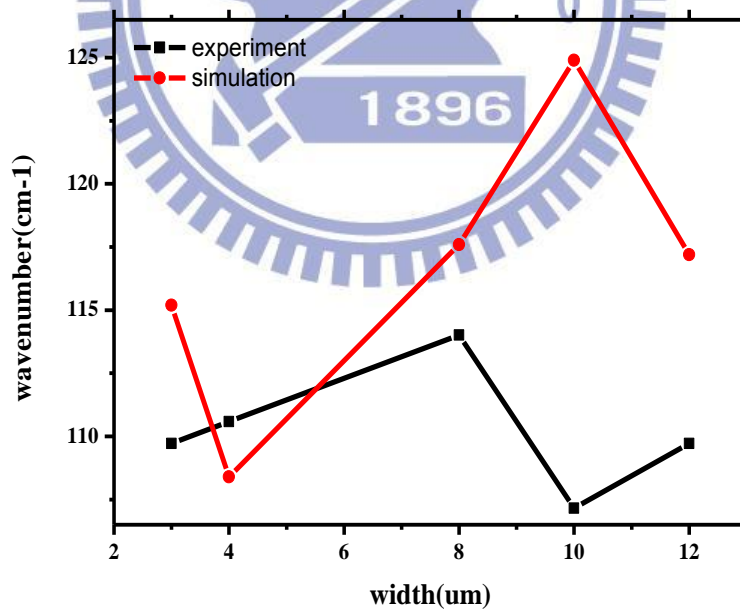


圖 4-23 相位差波峰位置對於長度變化(紅色虛線框內)(2)

(註 6：圖 4-21 中編號 3,4,5 三條線有取過絕對值，使其成為正值，理由如同註 3。)

(3)變化十字架週期

在此我們以樣品編號 10 的形狀大小為主，所變化的週期有 24、26、28、30um，共四種。由圖 4-24~4-27 所示，週期變化對於相位差影響，實驗與模擬結果定性上趨勢相當一致。並且從實驗和模擬結果觀察到，當週期變長，相位差隨之上升。

由圖 4-28~4-31 看到當週期變長，相對到的 X、Y 方向的穿透率皆會下降。將週期變長其實就等同於將十字架孔洞穿透面積做縮小，金屬吸收面積增加，穿透峰值隨之減少。另外 X，Y 方向的穿透頻譜中，雷利波長對應到的位置因為週期改變的關係，所以隨著週期變長往左移動。

相位差改變量圖(實驗)

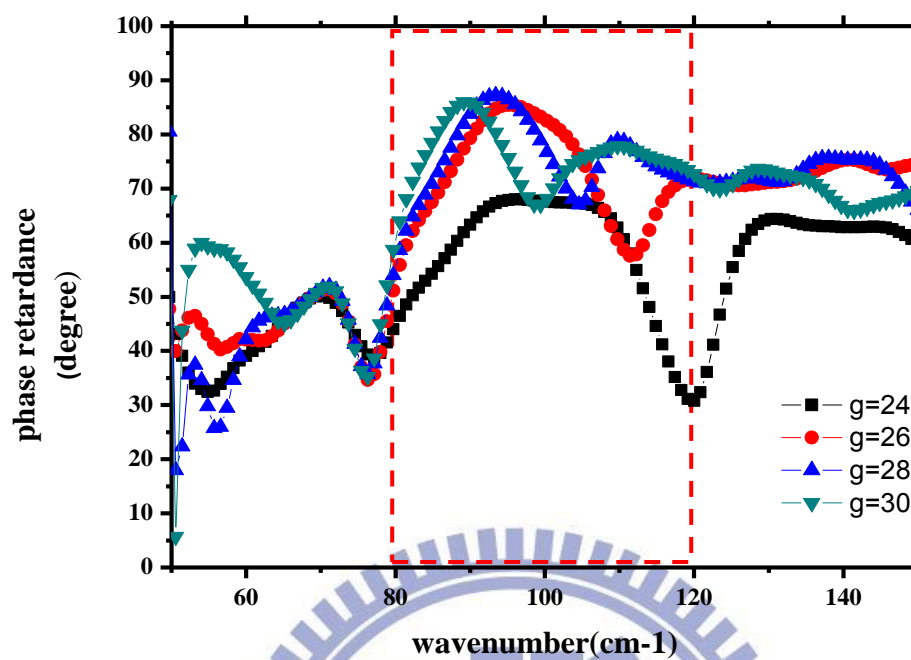


圖 4-24 <變化週期>相位差改變量圖(實驗)

相位差改變量圖(模擬)

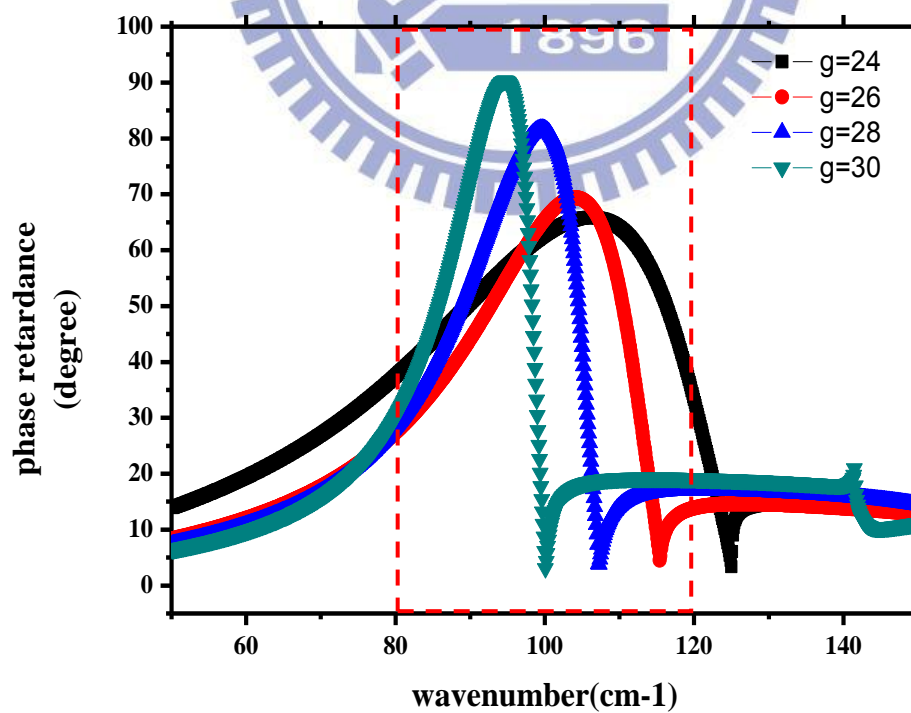


圖 4-25 <變化週期>相位差改變量圖(模擬)

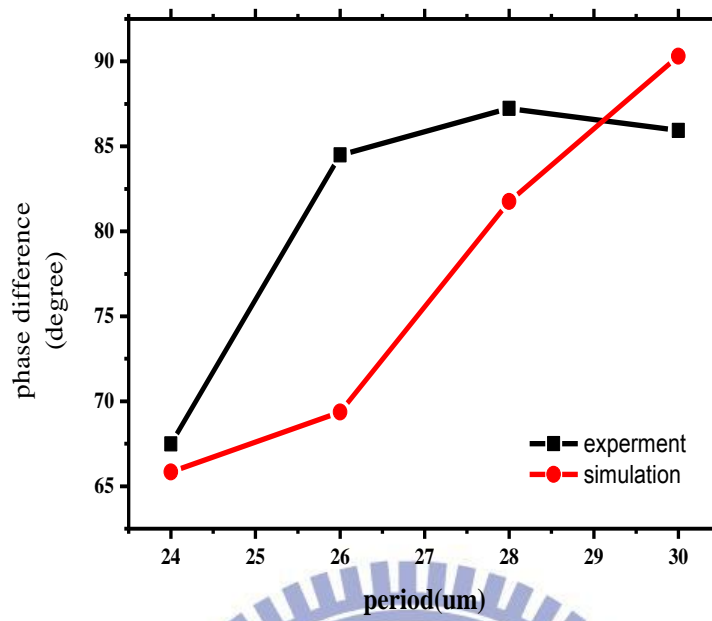


圖 4-26 波峰相位差對於長度變化關係圖(紅色虛線框內)(3)

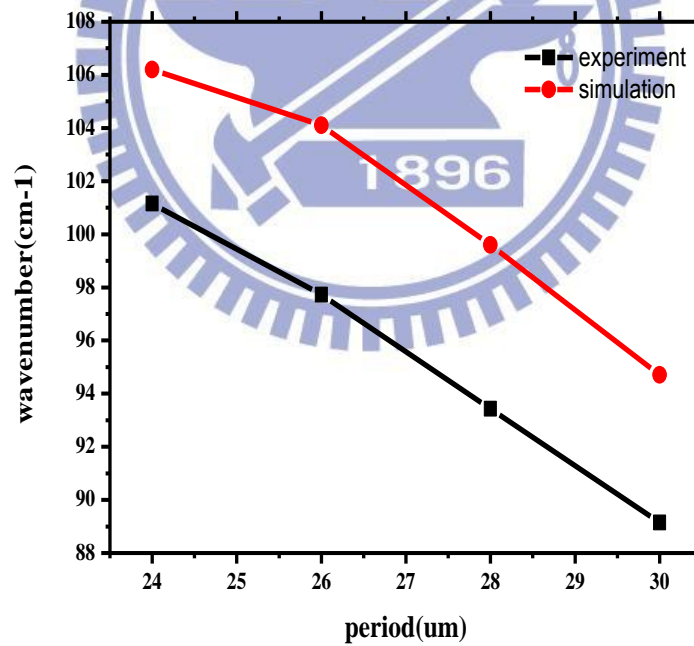


圖 4-27 相位差波峰位置對於長度變化(紅色虛線框內)(3)

(註 7：圖 4-25 中五條線皆有取過絕對值，使其成為正值，理由如同

註 3。)

X 方向(↔)穿透頻譜(實驗)

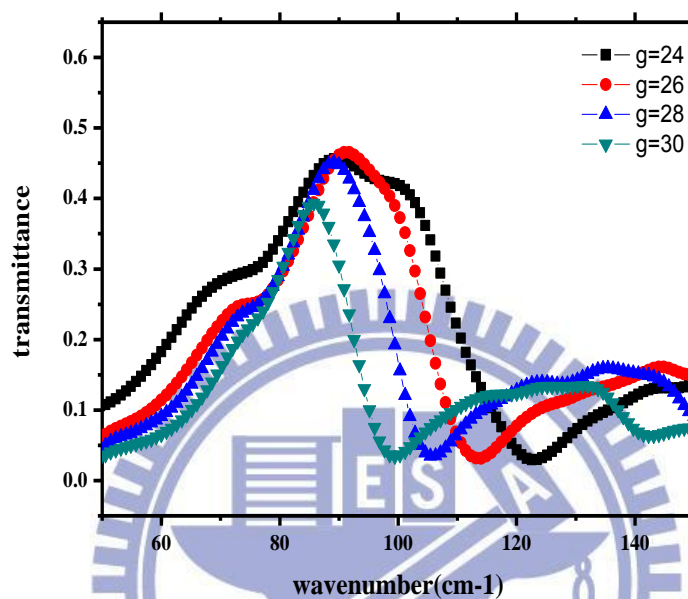


圖 4-28 <變化週期>X 方向穿透頻譜(實驗)

X 方向(↔)穿透頻譜(模擬)

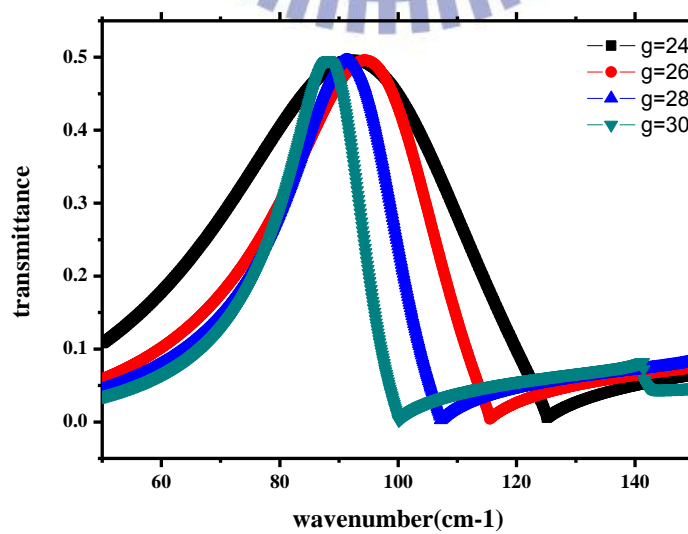


圖 4-29 <變化週期>X 方向穿透頻譜(模擬)

(註 8：圖 4-28 為量測到的相對強度的穿透頻譜圖除以沒有含矽基板的背景，因此穿透強度會較弱。另外實驗所入射的光源為 X 偏振光，而模擬結果的入射光源為線偏振 45 度光。)

Y 方向 (↕) 穿透頻譜(實驗)

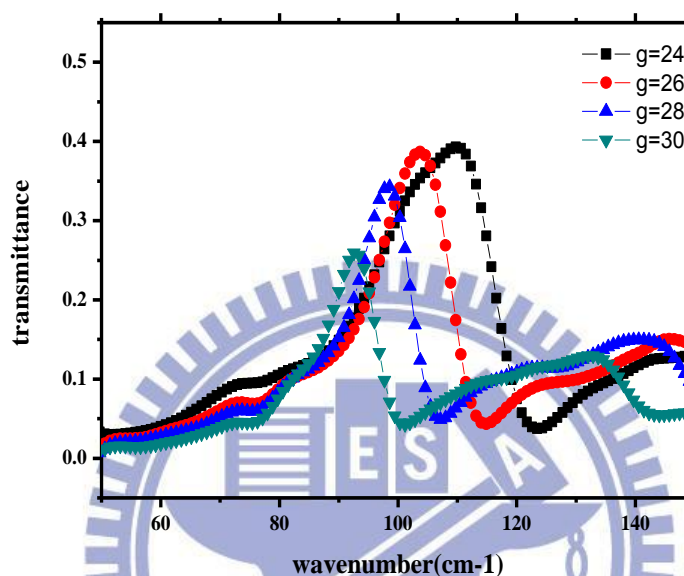


圖 4-30 <變化週期>Y 方向穿透頻譜(實驗)

Y 方向 (↕) 穿透頻譜(模擬)

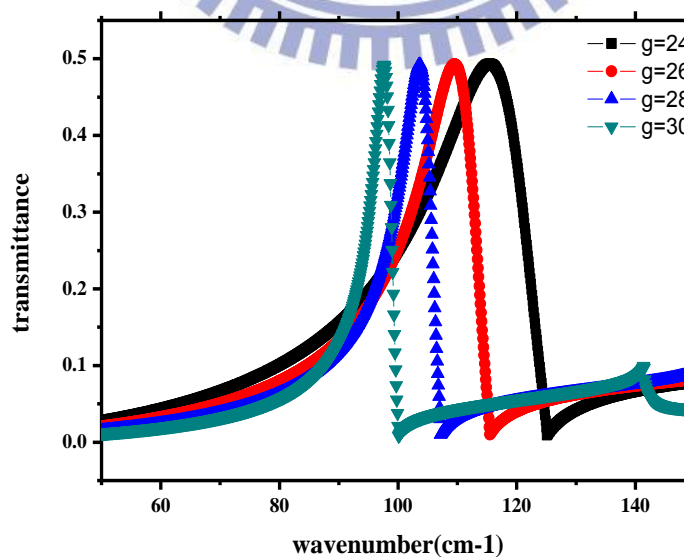


圖 4-31 <變化週期>Y 方向穿透頻譜(模擬)

(註 9：圖 4-30 為量測到的相對強度的穿透頻譜圖除以沒有含矽基板的背景，因此穿透強度會較弱。另外實驗所入射的光源為 X 偏振光，而模擬結果的入射光源為線偏振 45 度光。)

4-4 實驗結論

1. 由實驗結果發現，不對稱十字架偏極穿透特性無法單純以兩相互正交之矩形予以解釋。
2. 獨立型十字架金屬濾波器之相位偏移特性已不適合用於分析製於基板上之十字架金屬濾波器。
3. 觀察了三種不同十字架的變化後，我們發現適當設計不對稱十字架的陣列，致於基板上的金屬網狀濾波器具有潛力當作相位延遲片中的四分之一片來使用。

第五章 結論

本研究使用量測相位延遲片相位移的光學系統，量測薄金屬不對稱十字架週期孔洞濾波器的偏振穿透特性和相位改變量。共設計三種不對稱十字架孔洞金屬網濾波器，分別為變化十字架單臂長、寬和十字架孔洞週期。

歸納實驗量測的結果，可以有下列幾點發現：

- (1) 對於變化十字架單臂長度孔洞形狀的濾波器而言，X、Y 電場方向的電磁波入射元件後，所產生的穿透行為可以以兩互相正交的矩形孔洞來做近似，但同樣方法對於變化十字架單臂寬度孔洞形狀濾波器會產生問題。
- (2) 相位改變量的產生與獨立型厚金屬十字架孔洞的情況不同，目前對於相位改變量產生的物理機制還不明瞭。
- (3) 經由適當的設計週期性不對稱十字架金屬孔洞結構，可使其具有潛力當作相位延遲片中的四分之一片來使用。

參考文獻

- [1] R. Ulrich, *Appl. Optics*, **7**, 1987, 1968.
- [2] K.D.Moller, K.R.Farmer, D.V.P.Ivanov ,et al.,*Infrared Physics & Technology* **40**,475-485(1999).
- [3] R.Ruprecht, W.Bacher, P.Bley ,et al.,*Jahrg.***23** ,2-91, 18-123.
- [4] K.D.Moller, O.sternberg , *JAP* , **91**, 12.
- [5] Andrew J.Gatesman, Andriy Danylov, Thomas M.Goyette,et al., *Proc. SPIE*, 2006, Vol.**6212**, pp62120E1-62120E-12.
- [6] Bortolucci, Maria Zakia, Otto Bauer, et al. ,*Applied Optics*, Vol.47, Issue 32, pp.6064-6069.
- [7]黃信傑，民 98，兆赫波波段金屬網狀濾波器之研究.
- [8] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, *Nature (London)* **391**, 667 (1998).
- [9]S.Astilean ,et al.,*Optics Communications* **175**,265-273(2000).
- [10]J.B.Pendry ,et al.,*Science*,Vol.**305**.no.5685,pp.847-848(2004).
- [11]K.J.Klein Koerkamp,et al.,*Phys.Rev.Lett.***92**, 183901 (2004).
- [12]R.Gordon,et al., *Phys.Rev.Lett.***92**, 037401 (2004).
- [13]T.Li,et al.,*Appl.Phys.Lett.***93**, 021110 (2008).
- [14]M.Sun,et al.,*Phys.Lett.A* **365**,510 (2007).
- [15]F.I.Baida,et al.,*Appl.Phys.B* **79**,1(2004).
- [16]L.Lin,et al.,*Appl.Phys.Lett.***95** ,201116(2009).
- [17]Meng-Dong He,et al.,*Solid State Communications***150**,104-108(2010)
- [18]C.Y.Chen,et al., *Appl.Phys.Lett.***91**,063108(2007).
- [19]R.M.Roth,et al.,*Opt.Lett.*32,3414(2007).
- [20]W.Herres and J.Gronholz,“Understanding FT-IR Data Processing.”(Bruker).
- [21]D. Goldstein, *Polarized Light: Revised and Expanded*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc. New York, 2003.
- [22] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell, S. E. Bell, R. R. Bell, R. W. Alexander, Jr., and C. A. Ward, *Appl. Opt.*, **22**, 1099 (1983).
- [23]謝泓文，民 99，異常光學穿透理論與應用之研究.
- [24]孫仲村，民 99，以含不對稱十字架孔洞金屬膜實現兆赫波段相位延遲器.

簡歷

姓名：蕭晉勛 (Chin-Hsun ,Hsiao)

性別：男

籍貫：台灣高雄縣

出生年月日：民國 73 年 11 月 13 日

學歷：國立台灣師範大學 工業教育學系電機電子組(92.9-96-6)

國立交通大學 電子研究所碩士班(97.9-99.11)

論文題目(中)：兆赫波波段金屬網狀帶通濾波器之偏振性
和相位差研究

論文題目(英)：Studies on polarization and phase retardance of
metallic bandpass filters in Terahertz Frequencies.