

異常光學穿透理論與應用之研究

學生：謝泓文

指導教授：顏順通 博士

國立交通大學

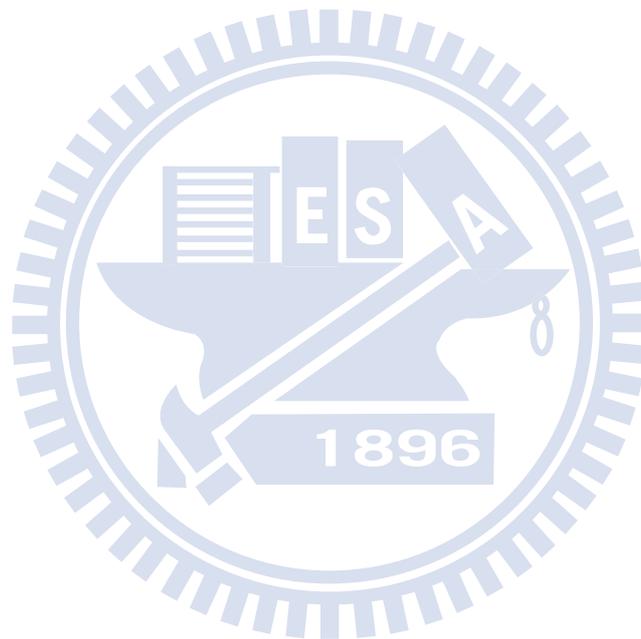
電子工程學系 電子研究所碩士班

摘要

我們對於金屬週期孔洞結構的異常穿透行為進行了理論上的分析，並提出了此結構可能的應用。我們介紹了兩種處理金屬週期孔洞結構的計算方式，第一種是基底展開法，第二種是傅立葉模型法，本論文中詳列了這些方法計算式。在與我們現有的實驗資料比較下，我們所使用的計算結果與實驗非常吻合。這表示了我們的計算方法十分可信，適合去描述此物理系統的圖像。

理論分析的工作部分如下。第一，我們提供一個簡單的方法把費諾共振中的直接穿隧以及共振穿透兩成份給分離開來。第二，我們計算了不同大小的長方形以及十字架形週期孔洞的穿透頻譜，並針對頻譜隨孔洞形狀的演化做出解釋。第三，我們用傅立葉模型法分析了金屬的非完美效應。最後我們使用 Fabry-Perot 共振圖像去解釋當金屬孔洞之中有可傳遞的波導態時的穿透行為。

我們提出兩個金屬週期孔洞結構的應用方向。第一個是把非對稱十字架形的金屬孔洞結構做成光學補波片。第二個是使用金屬孔洞結構的表面強場去提升長波長偵測器的工作能力。



Study of Extraordinary Optical Transmission: Theory and Application

Student : Hong-Wen Hsieh

Advisor : Dr. Shun-Tung Yen

Department of Electronic Engineering & Institute of Electronics

National Chiao Tung University

Abstract

We theoretically analyze extraordinary optical transmission phenomena for metallic hole array structures, and propose some applications for the array structures. We introduce two calculation methods in this paper: one is basis expansion method, and the other is Fourier modal method. We give detail formulas for these two methods. The calculation results give good agreement with our experimental data. This indicates that our calculation is very reliable and is suitable for this array structure.

We do the following works in this paper. First, we demonstrate a simply method to separate direct tunneling channel and resonant transmission channel in a Fano system. Second, we calculate the transmission spectra for rectangular hole arrays and crossed rectangular hole arrays of different sizes, and explain the evolution of the transmission spectra with the changing of the hole dimensions. Third, we use the Fourier modal method to analyze metal loss effects. Finally, we demonstrate that if the waveguide mode inside the hole is propagating, the transmission behavior can be explained by Fabry-Perot resonance.

We propose two applications for metallic hole array structures. First, we show that asymmetric crossed rectangular hole structures can be used as the optical compensator. Second, we show that the strong near field of hole array structure can enhance the sensitivity for long wavelength optical detectors.

誌謝

光陰似箭，遙想當年還是懵懂無知的大一學生，踏著忐忑的步伐進入交大校園，轉眼間就過了六年。四年的大學生涯，兩年的碩士生活，其中有歡笑，也有淚水，有意氣風發，也有痛苦低潮，我都曾經一一品嚐，細細體會。很慶幸我能在交大，度過這黃金般的六年。

碩士班這兩年來我最要感謝的人，是我的指導教授顏順通老師。記得我初次見到顏老師是在我大三下學期的專題課程，做的是關於量子井的理論計算，當時顏老師以及博士班的黃士哲學長給了我非常多的幫助，從計算技巧的教學，文獻如何查詢與利用，到物理圖像的探討、觀念的澄清，以至於論文的撰寫，他們都不厭其煩的一一解惑。之後我碩士班也就打定主意繼續跟隨顏老師做研究，從事了關於光學的計算。每每在我最困惑的時刻，顏老師常常給予了最關鍵的幫助，有如醍醐灌頂一般讓我豁然開朗。更重要的是，顏老師讓我學到了一個學者該有的風範與堅持，這是對於真理追尋的堅持，以及對於研究品質的堅持。

接下來我要感謝實驗室的許多學長同學們，大家為實驗室共同奮鬥的日子，至今想起來仍記憶猶新。感謝德賢學長、佩鋼學長、冠成學長與品維學長在學問上的討論，大家一起腦力激盪，一起與國科會計畫奮鬥，那段辛苦卻值得的過程是一輩子都不能忘記的，很高興我可以遇到這些厲害的學長們。感謝宏偉、皓宇、晉勛、宗謀與仲村這些同學們的陪伴，讓我們的碩士生涯能夠多采多姿。感謝老姜、嗑啼、熊、敬暉、大屁、小榮、魷魚、小羅、阿哲、史大、小捲和小愛這些電資 97 的同學們大學四年的同甘共苦，碩士班雖然有不少人叛逃到台大，大家仍然是常常連絡，相互打氣，互相聊八卦，互相期許一起順利畢業。還有要感謝在許多個夜晚陪我一起運動的那個女孩，和她聊天、分享心事，是我一天中最開心的時光，很慶幸我可以遇到這一位知己。記得以前曾和她一同修課，她積極努力的求學態度，是我學習的榜樣。

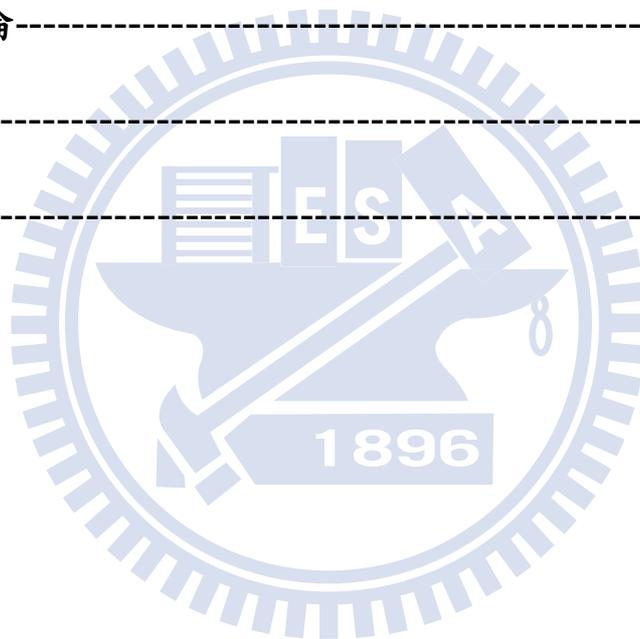
我要感謝我的父母，給我一個溫暖的家庭，全力地支持我，不時地鼓勵我，讓我能夠朝自己喜歡的方向去發展。在他們身上，我學到了誠實的美德，學到了要對萬事萬物充滿愛心，學到了要悲天憫人，學到了努力與惜福。感謝我的父母，我愛你們。

最後我所要感謝的是「上帝」。感謝祂總是在我最無助最需要依靠的時候，給予我勇氣。每當我遇到挫折、感到低潮時，祂總是引領我走過這些低谷，讓我能夠攀上另一座高峰。祂總是在我人生中安排了最合適的歷練，在我不堪磨練而沮喪時，祂又適時伸出援手幫助我成長，讓我更加堅強。願我能時常心懷感激，願我能時常保持謙卑，當我犯有一絲一毫的錯誤時，願上帝能啟發我的良心，讓我感到羞愧，讓我能夠自省。我誠心誠意地感謝上帝。

目錄

中文摘要	i
英文摘要	iii
誌謝	iv
目錄	v
圖目錄	vii
第一章 概論	1
1.1 實驗現象描述	1
1.2 表面態共振	2
1.3 本研究目的	4
第二章 計算方法	6
2.1 基底展開法	6
2.2 傅立葉模型法	16
第三章 理論分析	26
3.1 在基板上的金屬孔洞陣列	26
3.1.1 費諾共振	26
3.1.2 長方形孔洞的奇異行為	29
3.1.3 十字架孔洞	36
3.2 金屬非完美效應	39

3.2.1 傅立葉模型法的正確性-----	39
3.2.2 非完美金屬討論-----	40
3.3 Fabry-Perot 共振-----	42
第四章 應用-----	48
4.1 光學補波片-----	48
4.2 長波長光偵測器的應用-----	52
第五章 結論-----	56
參考文獻-----	58
自傳-----	60



圖目錄

- 圖 1.1** 金屬週期孔洞結構圖 2
- 圖 1.2** 異常穿透的穿透頻譜。紅虛線是此結構的開孔區域面積比例，頻率為 120cm^{-1} 的電磁波具有高於此面積比例的穿透率，也就是說頻率為 120cm^{-1} 的電磁波發生了異常穿透的現象。 2
- 圖 1.3** 費諾共振的示意圖。入射光可以分成兩條路徑去通過金屬孔洞結構，一條是直接穿隧，另一條是共振穿透。這兩條路徑的電磁波會互相干涉而造成最後的穿透結果。 3
- 圖 2.1** 金屬週期孔洞示意圖。區域(一)是空氣層；區域(二)是金屬層，金屬上開有週期孔洞；區域(三)是基板層。入射光是來自區域(一)。 A 與 B 是此結構的週期長度， a 與 b 則是長方形孔洞的長與寬。金屬層的厚度是 L 。 6
- 圖 2.2** 基底展開法的示意圖。 $\mathbf{A}^{(1)}$ 和 $\mathbf{B}^{(1)}$ 是區域(一)的展開系數， $\mathbf{A}^{(2)}$ 和 $\mathbf{B}^{(2)}$ 是區域(二)的展開系數， $\mathbf{A}^{(3)}$ 和 $\mathbf{B}^{(3)}$ 是區域(三)的展開系數。各展開系數的關係由界面的邊界條件而決定。 15
- 圖 3.1** 直接穿隧、共振穿透及干涉項的個別貢獻。圖(a) (b) (c) (d)分別對應 $a = b = 38, 48, 58, 68 \mu\text{m}$ 。黑線是直接穿隧項 ($|a^D|^2$)，紅線是共振穿透項 ($|a^R|^2$)，藍線是干涉項 ($2\text{Re}\{a^D a^R\}$)。當面積越小時，共振穿透將主導整體穿透的行為，而干涉項會產生一個非對稱的修正。 28
- 圖 3.2** (a)是正向入射的實驗結果，我們固定 $A = B = 22 \mu\text{m}$ 、 $L = 0.2 \mu\text{m}$ 與 $a = 18 \mu\text{m}$ ，去把 b 由 $18 \mu\text{m}$ 縮小到 $2 \mu\text{m}$ 。這個結果顯示了隨著 b 的縮小，穿透頻譜有非單調的變化。(b)是針對與(a)同樣的結構採用 2.1 節方法的計算結果。此計算結果也證實了非單調的變化的發生。 29
- 圖 3.3** 不同偏振光在不同長方形幾何結構下的穿透頻譜。 S -波的穿透頻譜會隨著 b 的縮小而快速下降。 31
- 圖 3.4** (a) 穿透峰值頻率對 b 的關係，三角形是實驗數據，綠線是只使用 $\text{TE}_{0,1}$ 與 $\text{TE}_{1,0}$ 兩個波導基底的計算結果；紅線則是使用足夠數目的波導基底已達到收斂的計算結果。(b) $\text{TE}_{1,0}$ 、 $\text{TE}_{1,2}$ 、 $\text{TM}_{1,2}$ 波導模態的電場強度隨 b 的變化。 32
- 圖 3.5** 穿透頻譜隨 k_y 變化的計算結果，我們分別計算了 b 等於(a) $18 \mu\text{m}$ (b) $12 \mu\text{m}$ (c) $6 \mu\text{m}$ (d) $2 \mu\text{m}$ 的情況。在此計算我們令 $k_x = 0$ 。右下角的深藍色區域

是真空的光錐(light-cone)。白線是式子(3-4)的色散關係，最低與最高的白線分別是(0,-1)-能帶與(0,1)-能帶，在中間的白線則是 $(\pm 1,0)$ -能帶。 35

圖 3.6 十字架圖形各邊長度的定義。本處所計算的十字架為左右對稱的圖形。 36

圖 3.7 十字架波導模態電場分佈。(a)TEe₁模態，與長方形的TE_{0,1}相對應；(b)TEm₁模態，與長方形的TE_{1,0}相對應。 37

圖 3.8 (a)對稱十字架的實驗結果 (b)相同結構的計算結果。就定性而言，實驗與計算的結果相當一致。 38

圖 3.9(a)合理的本徵態的平行方向電場強度分佈，電場絕大多數集中於孔洞區域。(b)不合理的本徵態的平行方向電場強度分佈，可看出電場絕大多數集中於金屬區域。此計算的結構如圖 2.1， $A=B=22\ \mu\text{m}$ 、 $a=b=14\ \mu\text{m}$ 。白色框之內是孔洞區域，框外是金屬區域。 40

圖 3.10 不同方法計算的結果比較。紅線為傅立葉模型法的結果；藍線則為基底展開法的結果。 41

圖 3.11 獨立型金屬週期孔洞的穿透頻譜。藍線是帶入銀金屬實際介電常數的計算結果。紅線是把銀金屬介電常數虛部省略後(也就是不考慮金屬對電磁波的吸收)的計算結果。 42

圖 3.12 Fabry-Perot 共振系統。灰色部分是金屬區，波導模態在白色區域傳播。當波導模態碰到左右壁時，分別對應有反射率 $r_1 \exp(i\phi_1)$ 與 $r_2 \exp(i\phi_2)$ 。 43

圖 3.13 (a) 長方形孔洞的結構的穿透頻譜 (b) TE_{1,0}波導模態傳播係數 a_{WG}/b_{WG} 的相位關係。可以發現穿透峰值頻率正好對應到 $n\pi$ 相位關係。本圖結構的為 $A=B=100\ \mu\text{m}$ 、 $a=80\ \mu\text{m}$ 、 $b=20\ \mu\text{m}$ 以及 $L=30\ \mu\text{m}$ 。 45

圖 3.14 (a) 長方形孔洞的結構的穿透頻譜 (b) TE_{1,0}波導模態傳播係數 a_{WG}/b_{WG} 的相位關係。可以發現穿透峰值頻率正好對應到 $n\pi$ 相位關係。本圖結構與圖 3.13 相同，唯 L 改成 $90\ \mu\text{m}$ 。 46

圖 4.1 獨立型對稱十字架結構($V=80\ \mu\text{m}$ 、 $W=30\ \mu\text{m}$ 、 $L=64\ \mu\text{m}$)的 (a) P -波與 S -波的穿透頻譜 (b) TEe₁與TEm₁波導模態傳播係數 a_{WG}/b_{WG} 的相位關係。 48

圖 4.2 非對稱十字架結構的 (a) P -波與 S -波的穿透頻譜 (b) TEe₁與TEm₁波導模態傳播係數 a_{WG}/b_{WG} 的相位關係。(c) P -波與 S -波穿透金屬層之後的相位改變量。 50

圖 4.3 入射左旋光至 $a_1=10\ \mu\text{m}$ 、 $a_2=40\ \mu\text{m}$ 、 $a_3=a_3'=30\ \mu\text{m}$ 、 $a_4=a_4'=10\ \mu\text{m}$ 、 $L=64\ \mu\text{m}$ 的非對稱十字架結構，其透光光的左旋與右旋成分。 51

圖 4.4 入射左旋光至圖 4.3 相同的結構，改變金屬層的厚度為(a) $L = 70.4 \mu\text{m}$ (b) $L = 57.6 \mu\text{m}$ ，其穿透光的左旋與右旋成分。 52

圖 4.5 偵測器示意圖。正向入射的電磁波因為偏振方向必平行於量子井方向，故無法造成內能帶躍遷。側向入射的電磁波因為偏振方向垂直於量子井方向，可以造成內能帶躍遷。 53

圖 4.6 基板中距離金屬深度為 $0.2 \mu\text{m}$ 位置的 z 方向電場分佈。(a)入射頻率為 120 cm^{-1} (b) 138 cm^{-1} (c) 145 cm^{-1} 。入射光為正向入射的左旋光。對應的轉換增益 γ_z 分別為(a) 1.58 (b) 17.82 (c) 4.36。 54

圖 4.7 利用金屬週期孔洞結構改良長波長偵測計的工作示意圖。 55

