

國立交通大學

電子工程學系電子研究所碩士班

碩士論文

利用光子晶體微共振腔製作單模面射型雷射

Single Mode and Surface Emitting Laser by PhC Micro-cavity



研究生：楊宗樺

指導教授：李建平 教授

中華民國九十五年六月

利用光子晶體微共振腔製作單模面射型雷射

Single Mode and Surface Emitting Laser

by PhC Micro-cavity

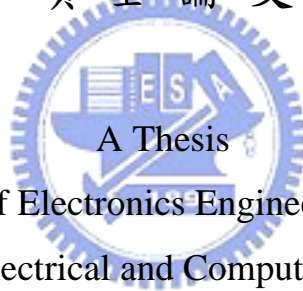
研究生：楊宗樺

Student : Tsung-Hua Yang

指導教授：李建平 博士

Advisor : Dr. Chien-Ping Lee

國立交通大學
電子工程學系電子研究所碩士班
碩士論文



Submitted to Department of Electronics Engineering & Institute of Electronics

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electronics Engineering

June 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

利用光子晶體微共振腔製作單模面射型雷射

學生：楊宗樺

指導教授：李建平 博士

國立交通大學

電子工程學系 電子研究所碩士班

摘要

光子晶體是由反射率週期性變化的材料所構成，會形成光子能帶，是一種可以控制光的結構。本論文結合了二維光子晶體微共振腔與邊射型雷射，讓邊射型雷射所發出的光耦合進入微共振腔中，利用光子晶體微共振腔的特性，製作出單模面射型的雷射。我們製作兩種不同的微共振腔 D1、D2，比較雷射的 L-I 曲線、輸出頻譜、耦合效率與 Q 值。最後，同時製作兩個不同共振波長的微共振腔，做出一個可以同時輸出兩波長的雷射。

Single Mode and Surface Emitting Laser by PhC Micro-cavity

Student: Tsung-Hua Yang

Advisor: Dr. Chien-Ping Lee

Department of Electronics Engineering and Institute of Eletronics
National Chiao Tung University

Abstract

Photonic crystal (PhC) is the material in which the refractive index changes periodically and have a band structure for the photon energy, this structure can control light. In the thesis, we combined 2-D PhC micro-cavity with edge emitting Laser, the light emitted form edge emitting Laser can couple into PhC micro-cavity to create a single mode and surface emitting Laser by the property of PhC micro-cavity. We fabricated two kinds of PhC micro-cavity: D1 and D2, and investigated the L-I curve, output spectrum, coupled efficiency and Q factor of D1 and D2. We made two different kinds of PhC micro-cavity at one device to fabricate the Laser which can output two wavelengths at the same time.

誌謝

感謝李建平老師，老師的思維總是如此的敏銳，總能馬上點出問題的癥結所在，讓我在研究的路途上，少走了許多冤枉路。感謝老師提供了我們非常豐富的資源，讓我們在研究領域上可以盡情發揮，讓我的想法可以付諸實現，研究順利完成，由衷的感謝老師。感謝林聖迪老師，在李老師出國期間帶領我們，在實驗上給我們許多建議，讓我們的研究得以順利進行。

感謝林國瑞學長在儀器量測上的指導。感謝邱舒偉學長提供我們許多實驗的 wafer。感謝林志昌學長，耐心、細心的與我討論，提供我需多寶貴的意見，以及在量測上的協助。感謝王興燁學長在實驗上的指導。感謝黃世傑學長在光子理論上的教導。還有看到羅明城學長的做事方法和凌鴻緒學長對實驗的熱誠，都讓我受益良多。

感謝大雄、阿福和小叮噹在實驗上的幫忙，與我們一起打球，特別是大雄，教導我做實驗，提供我許多經驗，讓我在做實驗時更加迅速確實。

居倫、聖偉和大鈞，你們陪我度過這兩年光陰，大家相互幫忙、提攜，一同歡笑，讓我的研究生生活更加多采多姿，謝謝你們！

學弟妹們，看你們如此有活力、有衝勁，也激勵了我，謝謝你們，大家加油！

感謝筱婷，長久一來一直陪伴著我，當我遭遇挫折時鼓勵我，當我無助時支持我，帶給我無限的歡笑，給我許多希望，有妳真好，謝謝妳！

感謝我的家人，謝謝你們對我的支持與鼓勵，我愛你們。

目錄

第一章 簡介.....	1
第二章 光子晶體微共振腔與邊射型雷射的基本原理.....	2
2-1 光子晶體概述.....	2
2-2 光子晶體微共振腔.....	3
2-3 半導體雷射基本原理.....	4
第三章 光子晶體微共振腔雷射製程與量測系統.....	12
3-1 光子晶體製程.....	12
3-2 光子晶體微共振腔雷射製程.....	13
3-3 雷射特性量測系統.....	13
第四章 光子晶體微共振腔雷射特性討論.....	19
4-1 邊射型雷射.....	19
4-1-1 頻譜特性.....	19
4-1-2 L-I 特性.....	19
4-1-3 溫度特性.....	21
4-2 光子晶體微共振腔雷射.....	21
4-2-1 光子晶體微共振腔圖形設計.....	21
4-2-2 光子晶體微共振腔 D1 雷射.....	22
4-2-2-1 近場圖形.....	22
4-2-2-2 頻譜特性.....	23

4-2-2-3 L-I 特性.....	24
4-2-2-4 溫度特性.....	25
4-2-3 光子晶體微共振腔 D2 雷射.....	26
4-2-3-1 近場圖形.....	26
4-2-3-2 頻譜特性.....	27
4-2-3-3 L-I 特性.....	27
4-2-4 雙波長輸出的光子晶體微共振腔雷射.....	28
第五章 結論.....	54
參考文獻.....	55



圖目錄

- 圖 1-1 本實驗元件原理示意圖
- 圖 2-1 二維光子晶體平板的各項參數
- 圖 2-2 在空氣中做 square 週期性排列的無限長桿子之光子晶體能帶圖
- 圖 2-3 在材料中，挖出 hexagonal 排列的無限深空氣孔洞之光子晶體能帶圖
- 圖 2-4 在空氣中做 square 週期性排列的有限長桿子之光子晶體能帶圖
- 圖 2-5 在材料中，挖出 hexagonal 排列的有限深空氣孔洞之光子晶體能帶圖
- 圖 2-6 當光的能量落在光子能隙中時，這些光會完全被反射，光子晶體就像是一面鏡子
- 圖 2-7 光子晶體微共振腔侷限光的機制
- 圖 2-8 模擬光由微共振腔中的表面發射出來
- 圖 2-9 FP(Fabry-Perot)共振腔示意圖
- 圖 3-1 光子晶體製程流程簡圖
- 圖 3-2 光子晶體 SEM 圖
- 圖 3-3 實驗所使用的 wafer 磊晶結構
- 圖 3-4 製程流程簡圖如所示
- 圖 3-5 L-I 曲線量測系統圖

圖 3-6 近場光學量測系統

圖 3-7 雷射輸出光譜量測系統圖

圖 4-1 共振腔長度 1500 μm 在不同驅動電流的輸出頻譜

圖 4-2 長度 1500 μm 雷射在 20°C下的L-I曲線圖

圖 4-3 $(1/\eta_d)$ 對共振腔長度L的作圖

圖 4-4 (a)長度 1500 μm 雷射的頻譜隨溫度變化圖

(b)中心波長隨溫度變化圖

圖 4-5 光子晶體雷射的示意圖

圖 4-6 光子晶體平板(slab)

圖 4-7 光子晶體微共振腔 D1 結構示意圖

圖 4-8 微共振腔位置與共振波長的關係圖

圖 4-9 實際元件模擬圖 (λ' 為微共振腔的 D1 的共振波長)

圖 4-10 微共振腔 D1 雷射的上視 SEM 圖

圖 4-11 微共振腔 D1 雷射的側視 SEM 圖

圖 4-12 操作溫度 20°C、驅動電流為 150mA時的近場圖形與SEM對照圖

圖 4-13 光子晶體不完美所造成的散射

圖 4-14 微共振腔 D1 表面輸出頻譜

圖 4-15 D1 雷射劈裂面端的輸出頻譜

圖 4-16 模擬光的能量剛好落在光子晶體能隙的範圍時的反射率

圖 4-17 模擬光子晶體結構包含微共振腔 D1 時的光反射率

圖 4-18 D1 雷射在 20°C 下劈裂面端和微共振腔 D1 表面輸出的 L-I 曲線

圖 4-19 輸入光源有 20um 的寬度，但是可以耦合進入微共振腔 D1 的寬度
遠小於 20um

圖 4-20 輸入光譜約有 2.5nm 半高寬的範圍，但是可以耦合到微共振腔 D1
的光只有約 0.9nm 的半高寬

圖 4-21 耦合效率示意圖

圖 4-22 D1 雷射表面輸出頻譜隨溫度變化圖

圖 4-23 輸出強度隨溫度升高而先升後降圖解

圖 4-24 光子晶體微共振腔 D2 結構示意圖

圖 4-25 光子晶體微共振腔 D2 元件模擬圖

圖 4-26 微共振腔 D2 雷射的上視 SEM 圖

圖 4-27 微共振腔 D2 雷射的側視 SEM 圖

圖 4-28 D2 雷射在操作溫度 21.5°C、驅動電流為 160mA 時的近場圖形

圖 4-29 微共振腔 D2 在電流從 115mA 與 198mA 的表面輸出頻譜

圖 4-30 微共振腔 D2 雷射與微共振腔 D1 雷射的表面輸出頻譜比較

圖 4-31 藉由調整雷射的操作溫度改變輸入頻譜，進而包含微共振腔的
共振波長

圖 4-32 D1 雷射與 D2 雷射的劈裂面端輸出 L-I 曲線圖

圖 4-33 D1 雷射與 D2 雷射的微共振腔表面輸出 L-I 曲線圖

圖 4-34 微共振腔 D2 有較大的發光面積

圖 4-35 微共振腔 D2 有較大的耦合寬度

圖 4-36 模擬得到微共振腔的共振波長與其周圍光子晶體的直徑(2r)關係圖

圖 4-37 雙波長輸出的光子晶體微共振腔雷射 SEM 上視圖

圖 4-38 元件操作在 23.5°C 驅動電流為 180mA 的近場圖形

圖 4-39 雙波長輸出的光子晶體微共振腔雷射表面發光頻譜



第一章 簡介

光子晶體(photonic crystals)為一人工晶體，被視為非常具有潛力的新一代光電材料。光子晶體的應用很廣，可取代金屬，作為低吸收效果的反射鏡，以增加光的利用率。光子晶體的線缺陷可用來製作高角度彎曲的波導，或高品質參數的光子晶體濾波器，若在發光材料上製作光子晶體點缺陷的微共振腔結構，則可製成光子晶體雷射，還可利用負折射率特性，製作出超短焦聚的透鏡等等。

本實驗是利用光子晶體點缺陷所形成的微共振腔擁有單模與面射型的特性，以傳統的邊射型雷射作為光源，打入光子晶體微共振腔，讓光耦合到微共振腔中共振，如圖 1-1 所示，成功地製作出單模面射型的雷射。

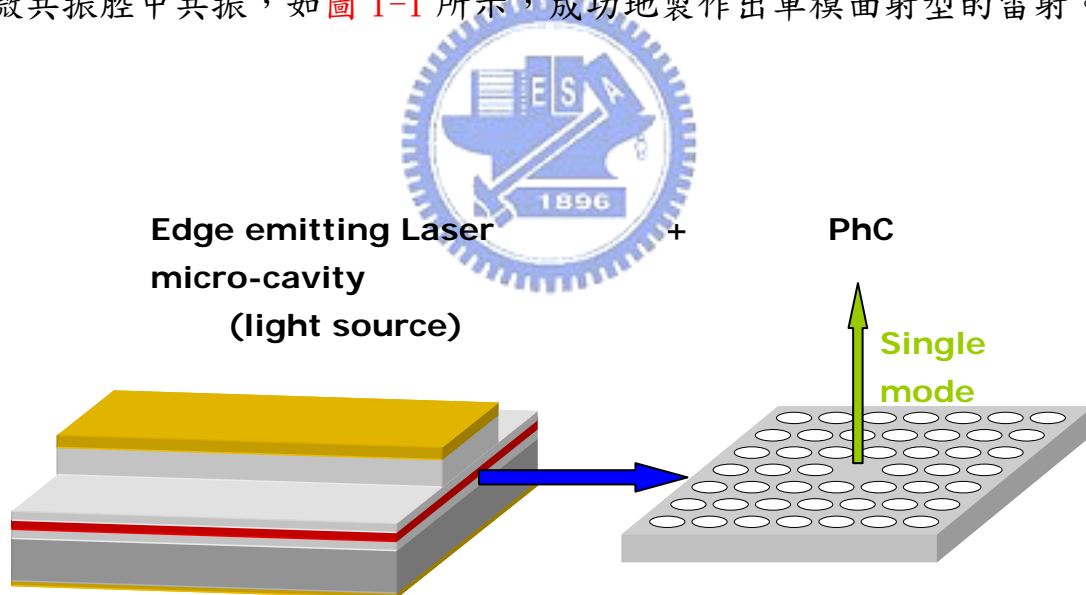


圖 1-1 本實驗元件原理示意圖

第二章

光子晶體微共振腔與邊射型雷射的基本原理

2-1 光子晶體概述

光子晶體的概念最早是由美國麻省理工學院Yablonovitch 教授在 1987 年所提出的^{[1][2]}，此一概念簡單的來說就是折射率在空間上具有週期性變化的物質。電磁波在此物質中看到週期性變化的折射率，有如電子在晶體中位能，亦會形成光能帶結構，無需改變物質的內在化學性質，就可以得到我們想要的光特性，例如可以製造出光子的能隙(Photonic bandgap)，使某些波長的光子無法在此介質中傳播，形成一種光子的絕緣體。這種新的人工晶體被叫做光子晶體(Photonic crystal)^[3]。一般以折射率變化維度來分，光子晶體可分成一維，二維，以及三維光子晶體。由於製程難易度的因素，目前被廣泛應用到實際元件上的大部分屬於一維及二維光子晶體，而三維的光子晶體目前仍著重於製程方式的研究與發展。

由於本實驗所製作的光子晶體屬二維光子晶體，因此在此節特別討論其相關特性。二維光子晶體的晶格結構主要有正方(Square)晶格與六角(Hexagonal)晶格兩種，其中的重要參數為：相鄰兩個空氣洞中心的距離(晶格常數)：a、空氣孔洞的半徑：r、二維光晶體在Z方向的厚度：d、介電材料的折射率：n。(以上參數如圖 2-1 所示)

先來探討結構在Z軸方向無限延伸的二維光子晶體^[4]。圖 2-2 為在空氣中做square週期性排列的無限長桿子之光子晶體能帶圖，由圖斜條紋地帶可以發現，在這樣的結構之下存在一個TM波的光子能隙，意即在此能隙範圍內，任何方向的TM波都無法穿過此光子晶體。(TM波即入射光波的磁場方向平行於欲入射的光子晶體平面)

圖 2-3 為在介電常數材料中，挖出 hexagonal 排列的無限深空氣孔洞之

光子晶體能帶圖。相同的，由圖斜條紋地帶可以發現，在這樣的結構之下存在一個 TE 波的光子能隙，意即在此能隙範圍內，任何方向的 TE 波都無法穿過此光子晶體。(TE 波即入射光波的電場方向平行於欲入射的光子晶體平面)

現在我們來探討在 Z 軸方向非無限延伸的二維光子晶體結構，此即光子晶體平板。圖 2-4 與圖 2-5 為此結構的能帶圖。在光子晶體平板的結構之下，因為結構對稱性的關係，沒有完美的 TM 或 TE 光子能隙，只能說是類似 TE 或 TM。因此我們將原本的 TM 能隙稱之為 odd 能隙，TE 能隙稱之為 even 能隙。光子晶體平板能帶圖有一區域稱之為 light cone，在 light cone 裡面的模態是連續的而且是向四面八方輻射出去的，因此在 light cone 內的模態我們稱之為 radiation mode；反之在 light cone 外的模態是不連續的，這些模態可以被侷限在光子晶體內部，我們稱之為 guided mode。由於本實驗是整合邊射型雷射和光子晶體，然而邊射型雷射一般為 TE 波，故我們選用的是 hexagonal 排列的二維光子晶體平板，以得到 TE 能隙。

2-2 光子晶體微共振腔^{[5][6]}

完整的光子晶體擁有光子能隙，當光的能量落在光子能隙中時，這些光會完全被反射，光子晶體就像是一面鏡子，提供極高的反射率，如圖 2-6 所示。如果在這完美的光子晶格上製作一個點缺陷，也就是不挖洞！就會使能隙中多出一個能階，這個能階就是可以被捕捉(trap)到這個點缺陷的特定光子能量，此能量的光子會被侷限在這個點缺陷中，左右被光子晶體形成的鏡面所侷限住，上下被介電材料與空氣接面的全反射所侷限，如圖 2-7，所以點缺陷就如同一個 micro 等級的共振腔，所以稱為”微共振腔”(micro-cavity)。

由於上下是靠介電材料與空氣接面的全反射所侷限，所以當微共振腔中

的光入射介面時的角度小於臨界角時，光就會由微共振腔中的表面發射出來，如圖 2-8 模擬。所以光子晶體微共振腔可以讓特定能量的光存在裡面，並且該能量的光可以從表面發射出去，本實驗就是利用此光子晶體微共振腔的特性，製作出單模面射型的雷射。

Q factor 是判別光子晶體微共振腔的好壞的一個參數，定義如下：

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

λ 為在微共振腔中共振的波長， $\Delta\lambda$ 為其半高寬。Q 值越大，表示共振腔越好。

2-3 半導體雷射基本原理^{[7][8]}

由於我們的元件是將半導體雷射與光子晶體結構結合，所以我們也對半導體雷射做一些基本原理的介紹。

傳統邊射型半導體雷射，電子經由電極注入，流至主動層(active layer)與電洞結合，產生自發性發光(Spontaneous emission)，此光子再藉由兩端自然斷裂面所形成的共振腔來回反射震盪傳播。在其傳播的過程中，光子又會激發電子電洞對結合產生新的光子，新生成的光子會與入射光子有共同的頻率，共同的方向，也就是所謂的同調性 (Coherent)，如此循環使得在共振腔內的光子愈來愈多，這樣的機制稱為受激發光 (Stimulated emission)，也是半導體雷射運作的基本原理。

臨界條件

圖 2-9 表示雷射縱向切面與 FP(Fabry-Perot)共振腔的示意圖，當光在共振腔內行徑時，其強度如下：

$$I = I_0 \exp[(\gamma - \alpha_i)Z]$$

其中， I_0 為光在 $Z=0$ 處的強度， γ 為增益係數(gain coefficient)， α_i 為吸收係數(Absorption coefficient)。當光由 $Z=0$ 處走到 $Z=L$ 處，再經 r_2 鏡面反射時，其

光強度為

$$I = r_2 * I_0 \exp[(\gamma - \alpha_i)L]$$

同理，當光由 r_2 鏡面反射再向 r_1 鏡面前進，且由 r_1 鏡面反射後所得強度應如下：

$$I = r_1 r_2 * I_0 \exp[(\gamma - \alpha_i) * 2L]$$

當此時強度回到原來的強度 I_0 時，才會達到共振條件，即：

$$I_0 = r_1 r_2 * I_0 \exp[(\gamma - \alpha_i) * 2L]$$

$$\text{Or } r_1 r_2 \exp[(\gamma - \alpha_i) * 2L] = 1$$

也就是：

$$\gamma_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right)$$

其中， γ_{th} 為臨界增益，另外我們還需考慮光場分布在主動區的比例，即為 Γ (侷限因素；Confinement factor)，其定義如下：

$$\Gamma = \frac{\text{在主動層內光強度}}{\text{主動層內外光強度總和}} = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} E^2(z) * dz}{\int_{-\infty}^{\infty} E^2(z) * dz}$$

故臨界增益關係式修改為：

$$\Gamma \gamma_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{r_1 r_2}\right)$$

起始電流密度 (Threshold Current Density)

雷射形成的首要條件，是要外加電壓使準費米能階(Quasi-Fermi level)分開到大於可被激發的光子能量 $[(E_{FC} - E_{FV}) > h\nu]$ ，如此使受激輻射率大於吸收率而產生增益(Gain)。當達到雷射的共振條件時，雷射發光的機制由自發性發光轉變為受激發光，這時候注入雷射的電流稱為起始電流(Threshold current) I_{th} ，而起始電流密度則定義為：

$$J_{th} = \frac{I_{th}}{WL}$$

其中 W 為雷射條紋的寬度，L 則是雷射共振腔的長度。

差額量子效率(Differential Quantum Efficiency)

當少數載子注入主動層後，會與多數載子經輻射性復合(Radiative recombination)產生光子，或經非輻射性復合(Non radiative recombination)造成損失，載子在主動層內產生光子的比例，稱做是內在量子效率， η_i (Internal quantum efficiency)，又所產生的光子經持續放大達到共振條件形成雷射，此一外加的差額能量所產生的光子，一部份抵銷內部損耗(ΔP_{int})，一部份在鏡面中穿透形成雷射光輸出(ΔP_{ext})，所以我們可以將雷射輸出的功率表示為

$$P_{out} = \frac{1}{2} \cdot h\nu \cdot \frac{\Delta P_{ext}}{\Delta P_{ext} + \Delta P_{int}} \cdot \eta_i \cdot \frac{(I - I_{th} - \Delta I_L)}{q}$$

其中 h 是普郎克常數， ΔI_L 為漏電流，是隨 I 上升的增加項，另因半導體雷射兩面均能輻射光，故乘以(1/2)。接下來我們定義差額量子效率，或稱做是外在量子效率(External quantum efficiency)：

$$\eta_D = \frac{\text{單位時間射出之光子差額}}{\text{單位時間注入之電子差額}}$$

$$= \eta_i \cdot \frac{\Delta P_{ext}}{\Delta P_{ext} + \Delta P_{int}} = \eta_i \cdot \frac{\frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right)}{\alpha_i + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right)}$$

將 P_{out} 對 I 做微分，並帶入上面的結果，可以得到

$$\eta_D = \frac{2q}{h\nu} \frac{dP_{out}}{dI} = \frac{\lambda}{1.24} \frac{dL}{dI}$$

其中 $\frac{dL}{dI}$ 稱為 slope efficiency。

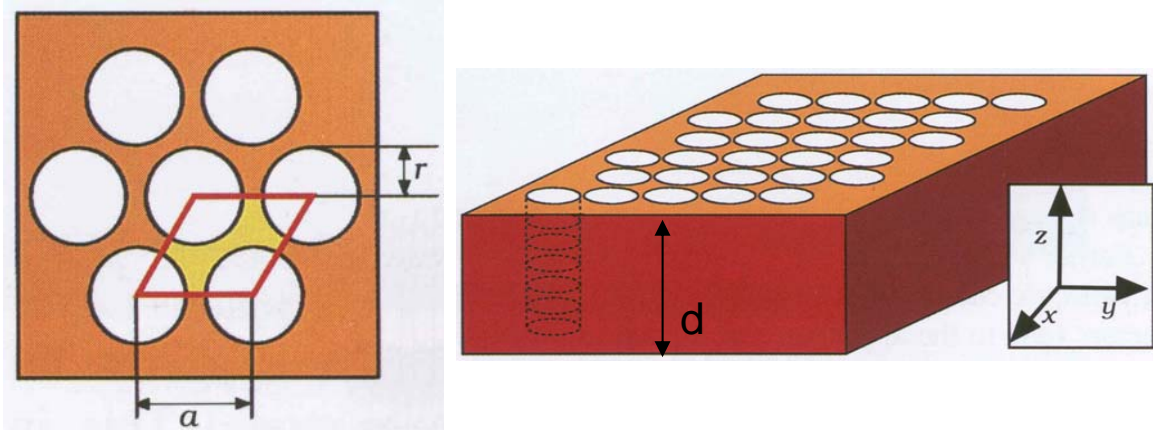


圖 2-1 二維光子晶體平板的各項參數

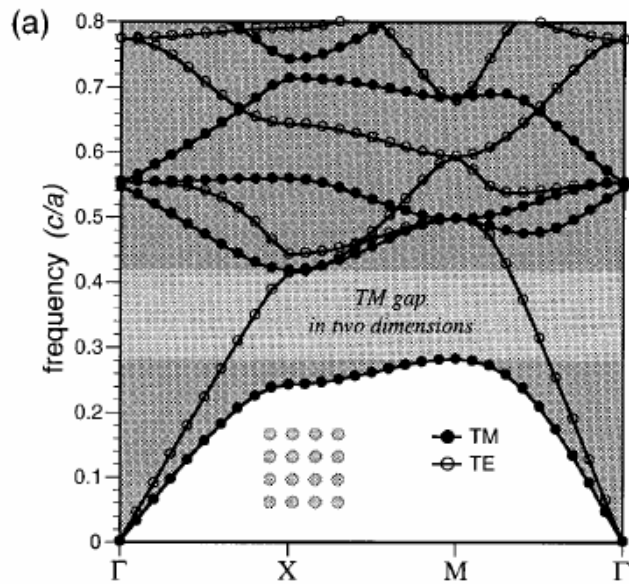


圖 2-2 在空氣中做 square 週期性排列的無限長桿子之光子晶體能帶圖

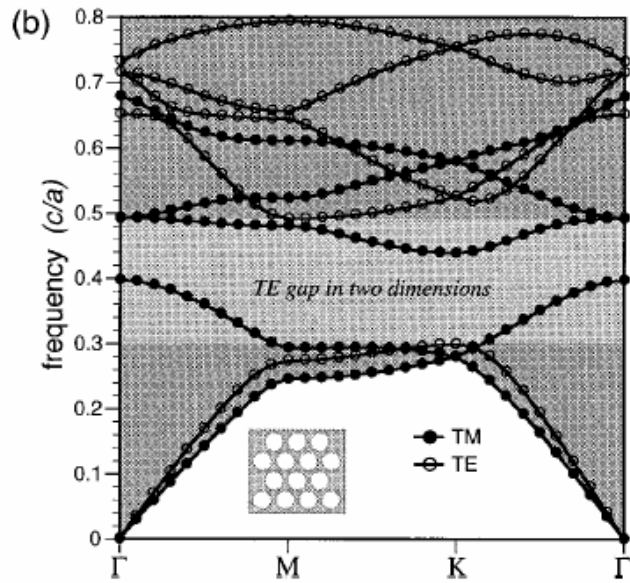


圖 2-3 在材料中，挖出 hexagonal 排列的無限深空氣孔洞之光子晶體能帶圖

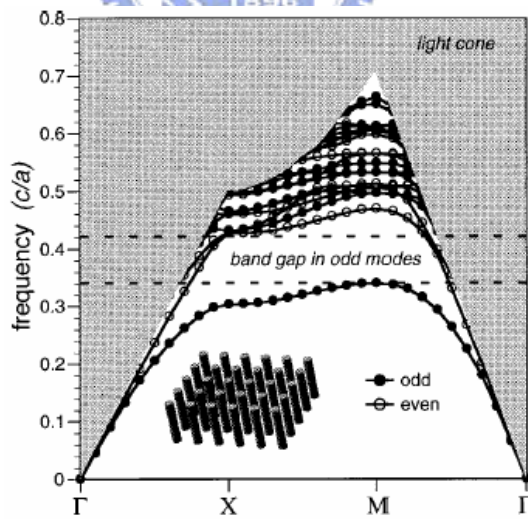


圖 2-4 在空氣中做 square 週期性排列的有限長桿子之光子晶體能帶圖

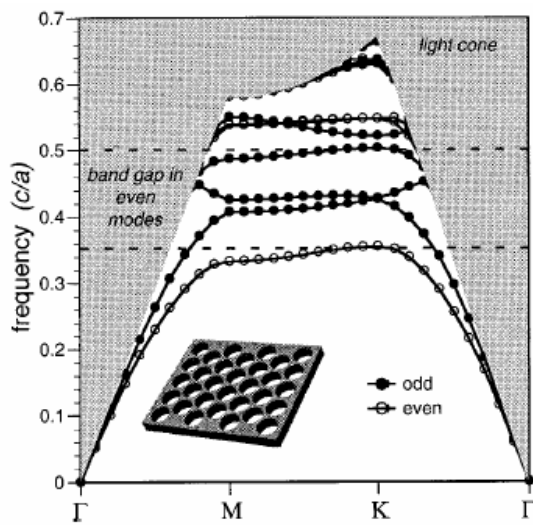


圖 2-5 在材料中，挖出 hexagonal 排列的有限深空氣孔洞之光子晶體能帶圖

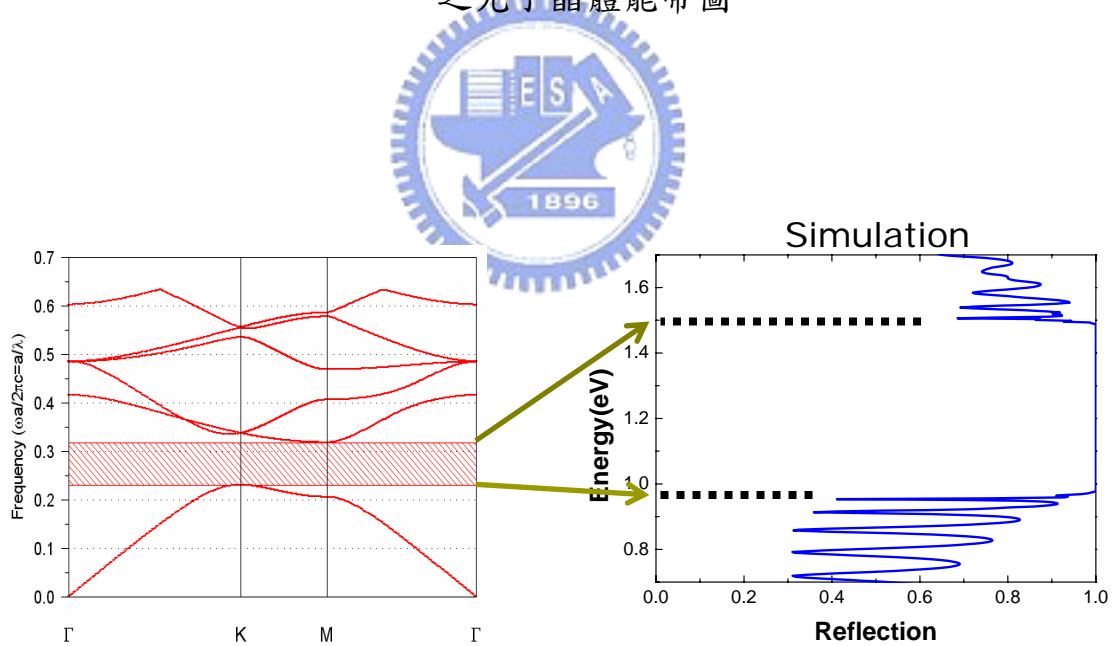
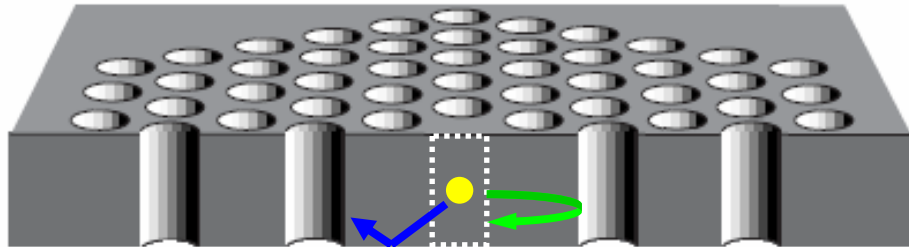


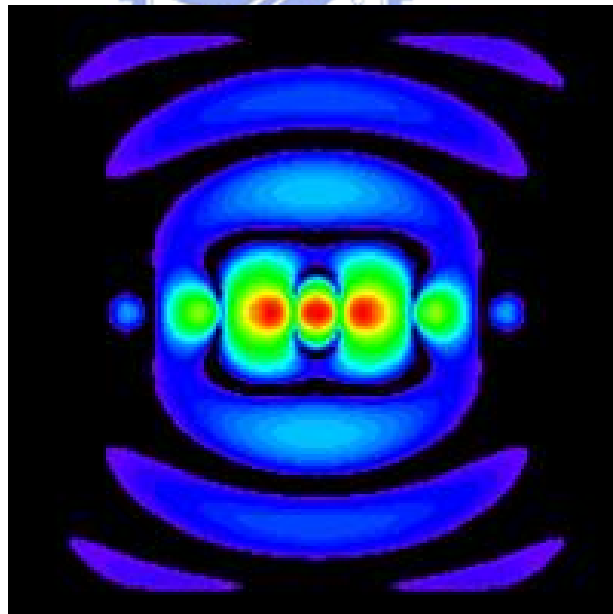
圖 2-6 當光的能量落在光子能隙中時，這些光會完全被反射，光子晶體就像是一面鏡子

Side View



- Total internal reflection
- Reflection by PhC mirror

圖 2-7 光子晶體微共振腔侷限光的機制



(來源網址<http://pbg.kaist.ac.kr/>)

圖 2-8 模擬光由微共振腔中的表面發射出來

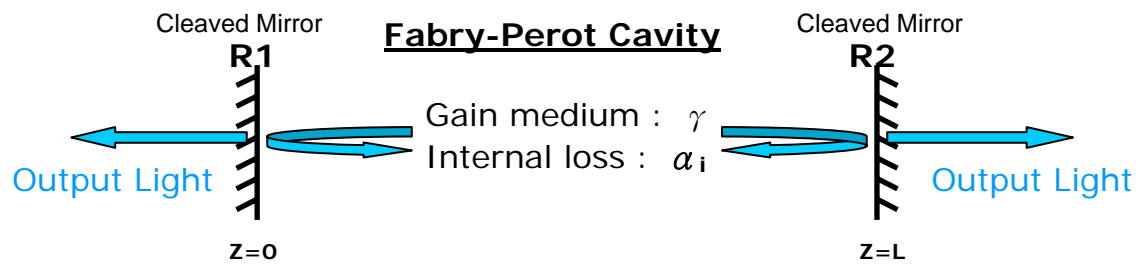


圖 2-9 FP(Fabry-Perot)共振腔示意圖



第三章

光子晶體微共振腔雷射製程與量測系統

3-1 光子晶體製程

利用電子束微影系統(E-beam lithography)與電感耦合電漿乾式蝕刻(Inductive coupled plasma etching ; ICP)在 GaAs 晶片上製作二維光子晶體。因為電子束微影專用的光阻"PMMA"分子結構不夠緻密，無法在做乾式蝕刻時有效的擋住 ICP 電漿的轟擊，所以先用電漿增強型化學氣相沉積(Plasma enhanced CVD ; PECVD)在晶片上沉積一層 SiN，厚度約 3200 Å 來當作蝕刻阻擋層，之後再旋鍍上 PMMA，厚度約 2300Å。

旋鍍上光阻後，將光阻以 180°C 硬烤 90 秒，便將設計好的圖樣經由電子束微影系統直接寫在光阻上面，之後經由顯影液 MIBK / IPA (1:3)顯影和定影液 IPA 定影之後，便可將圖樣順利的轉移到光阻上。

將圖樣轉移到光阻之後，接下來就是利用乾式蝕刻將圖樣轉移到晶片上。ICP(Inductively coupled plasma)蝕刻或RIE(reactive ion etching)是被廣泛使用的蝕刻技術，它結合了物理性離子轟擊與電漿氣體化學反應，所以兼具了物理性蝕刻的非等向性以及化學性蝕刻的高選擇比兩項優點。第一步，使用CHF₃ / O₂ 混合氣體利用RIE模式轟擊，將光阻的圖樣轉移到SiN，並用O₂ 氣體RIE模式去除光阻，只留下有光子晶體圖樣的SiN；第二步，使用SiCl₄/Ar混合氣體ICP模式，將SiN的圖樣轉移到GaAs，並以CHF₃ / O₂ 混合氣體RIE模式將殘餘的SiN去除，留下GaAs；第三步，利用B. O. E (buffered oxide etchant) 蝕刻液經由已製作好的光子晶體孔洞中往下蝕刻Al_{0.9}Ga_{0.1}As，以形成光子晶體平板。光子晶體製程流程簡圖如圖 3-1 所示。製作出來的光子晶體SEM圖如圖 3-2。

3-2 光子晶體微共振腔雷射製程

我們用來製作光子晶體微共振腔雷射的磊晶結構如圖 3-3 所示。製程的流程如下：利用黃光微影製程定義出 P 型金屬區域後，接著使用電子槍蒸鍍系統鍍上 P 型金屬 (Ti 300Å - Pt 300Å - Au 1500Å)，鍍完金屬後將晶片泡入丙酮中，掀起 P 型金屬區域外的光阻。至此，我們做出了雷射的 P 型金屬接觸條紋以及接下來電子束微影所需的對準標記。

接下來利用濕式蝕刻來製作脊狀波導，選用的溶液為 H₂SO₄ : H₂O₂ : H₂O = 1 : 8 : 40，蝕刻速率約為每秒 200Å，由於光子晶體製程的考量，蝕刻到距離主動區上方約 200nm 左右。

然後開始光子晶體的製作，光子晶體的製作流程如 3-1 節所述。藉由之前製作的對準標記輔助，我們可以精確的將光子晶體圖樣製作在 P 型金屬的前端。

為了讓雷射在劈裂時較為容易，我們將晶片背面磨薄，採用的方法是濕式蝕刻，溶液為 NH₄OH : H₂O₂ = 1 : 3，蝕刻速率約為每分鐘 6um，磨至晶片厚約 120~150um 左右，接著再次利用電子槍蒸鍍系統在晶片背面鍍上 N 型金屬 (Ni300Å-Ge300Å-Au1500Å)。

為了使金屬與半導體間形成較好的歐姆接面，將晶片放入快速退火 (Rapid thermal annealing; RTA) 系統中做退火，實驗條件為 420°C，30 秒，通 H₂/N₂ 混和氣體。至此，元件結構已經完成，利用晶片劈裂機將雷射晶片根據我們希望的長度切割成雷射條，便可以開始做各種雷射特性的量測了。製程流程簡圖如圖 3-4 所示。

3-3 雷射特性量測系統

圖 3-5 為 L-I 特性曲線量測系統，將雷射二極體置於樣品金屬座上，驅動電流藉電流源經探針注入二極體，二極體所發的光被光偵測器吸收後，轉

換成光電流並傳到訊號平均器(Boxcar averager)做平均，最後光電訊號經 GPIB 介面傳到電腦中做資料處理及儲存。

圖 3-6 為近場發光圖形量測系統，將顯微鏡聚焦於半導體雷射的發光處，藉由顯微鏡上的 CCD 攝影機將雷射的發光圖形拍攝下來。

圖 3-7 為雷射輸出頻譜量測系統，用光纖將雷射的輸出光訊號傳送到頻譜儀。



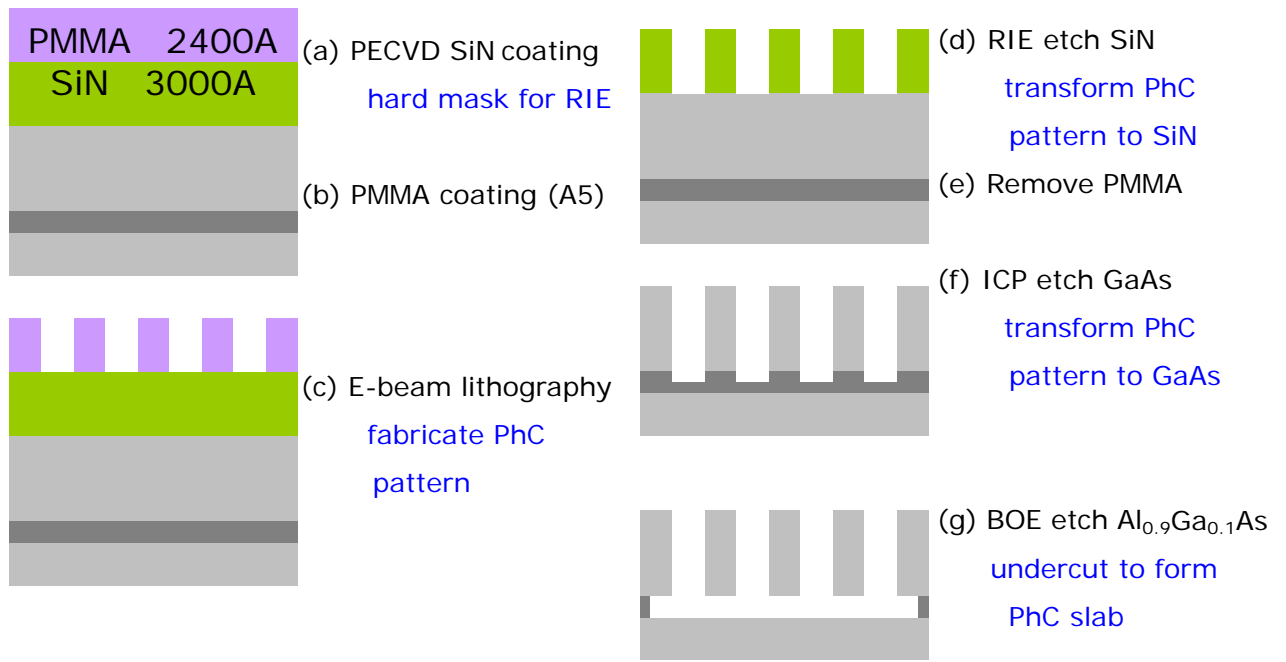


圖 3-1 光子晶體製程流程簡圖

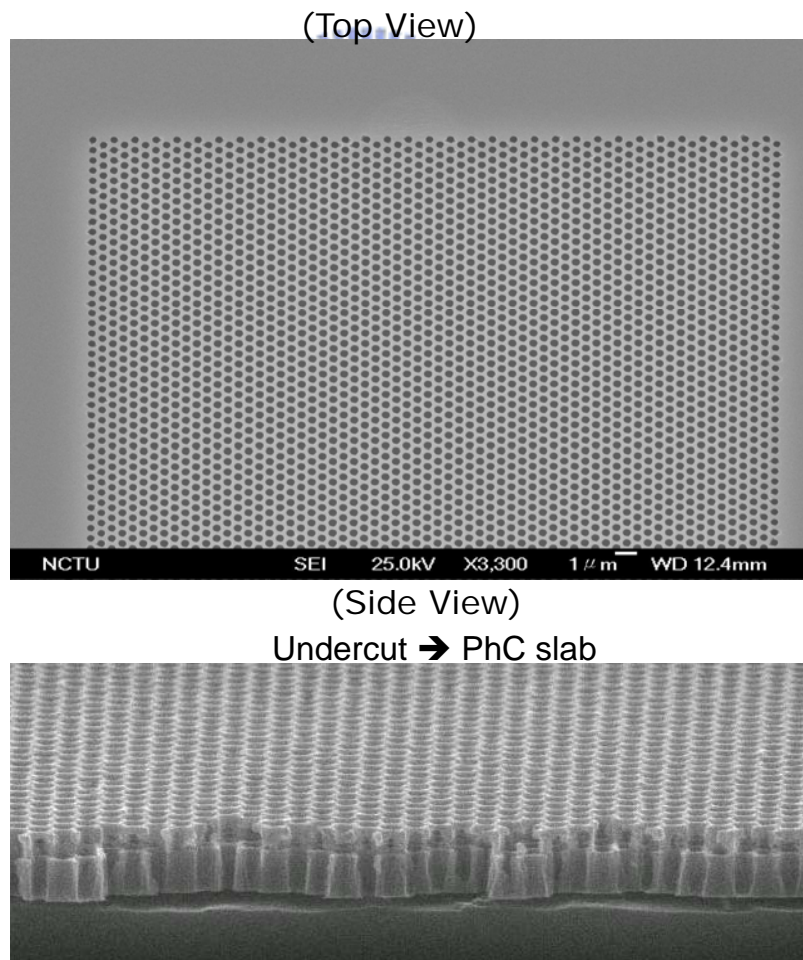


圖 3-2 光子晶體 SEM 圖

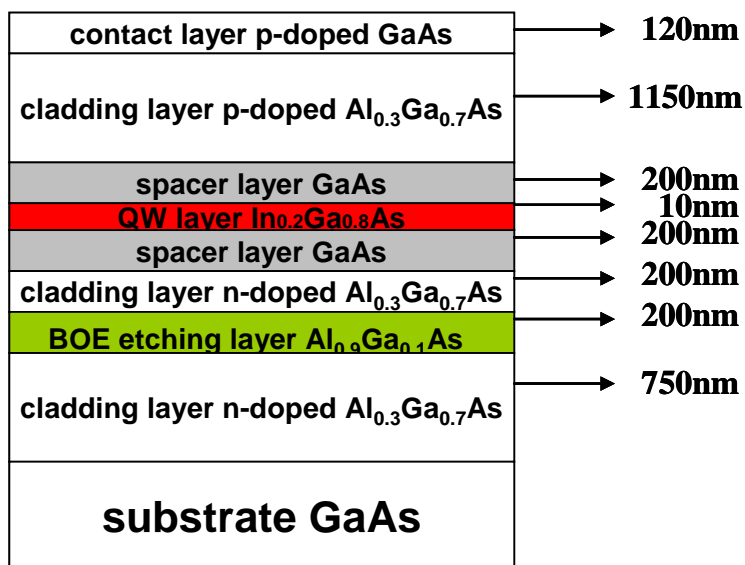


圖 3-3 實驗所使用的 wafer 磊晶結構

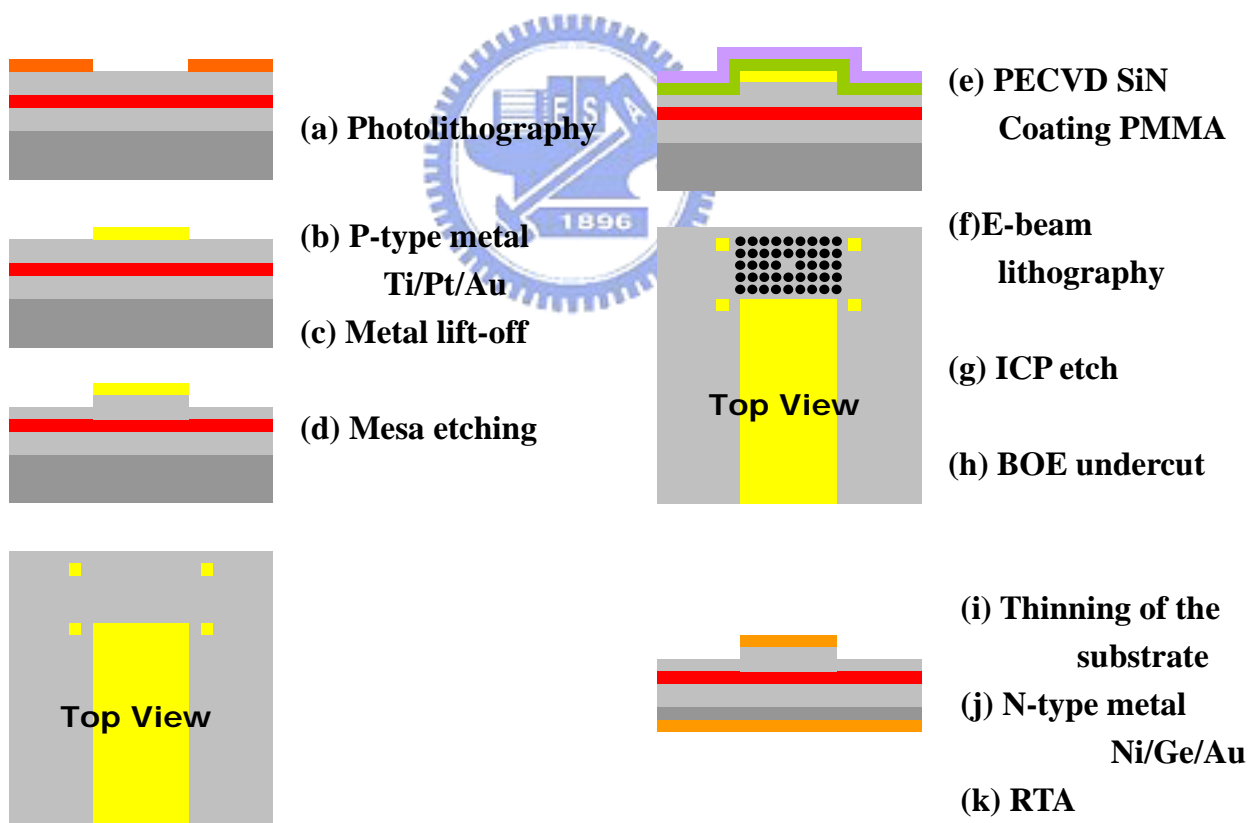


圖 3-4 製程流程簡圖如所示

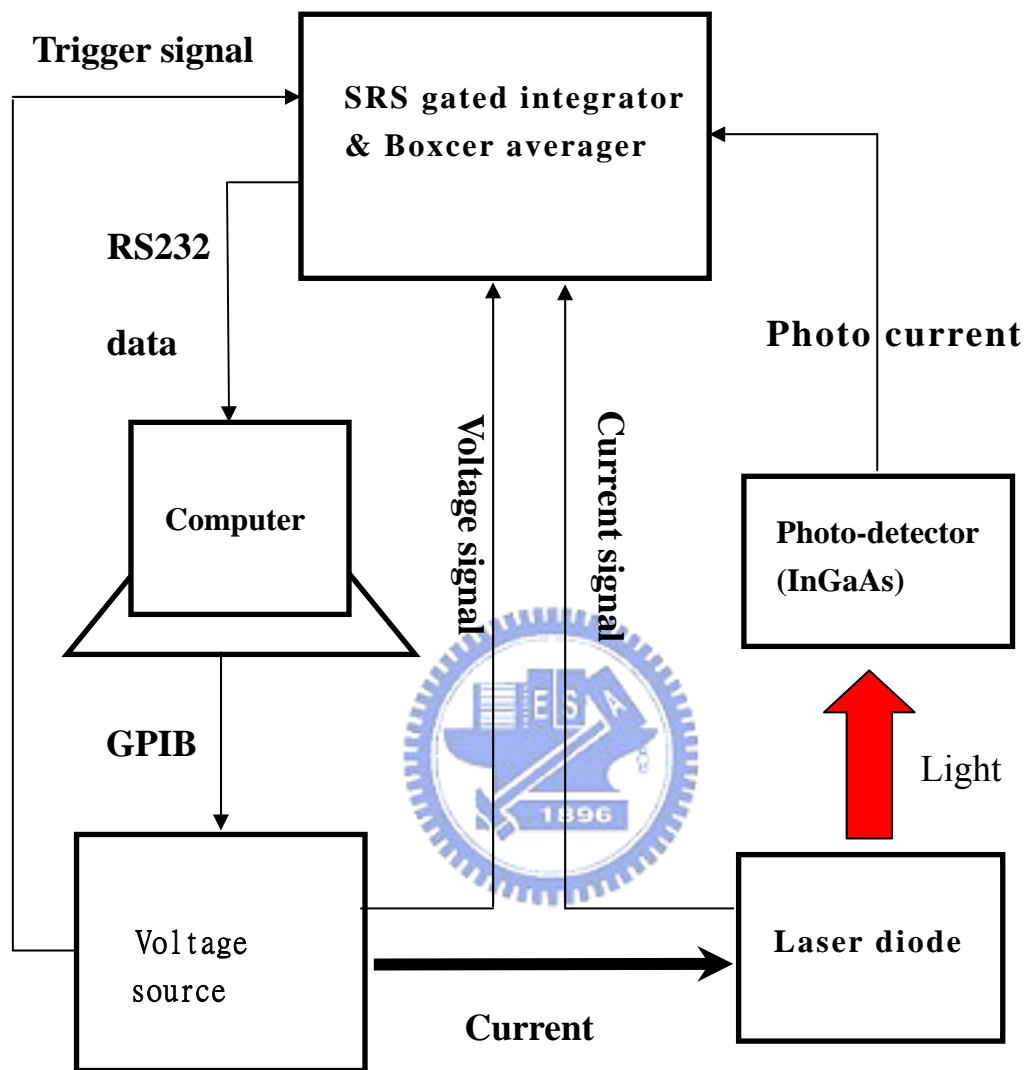


圖 3-5 L-I 曲線量測系統圖

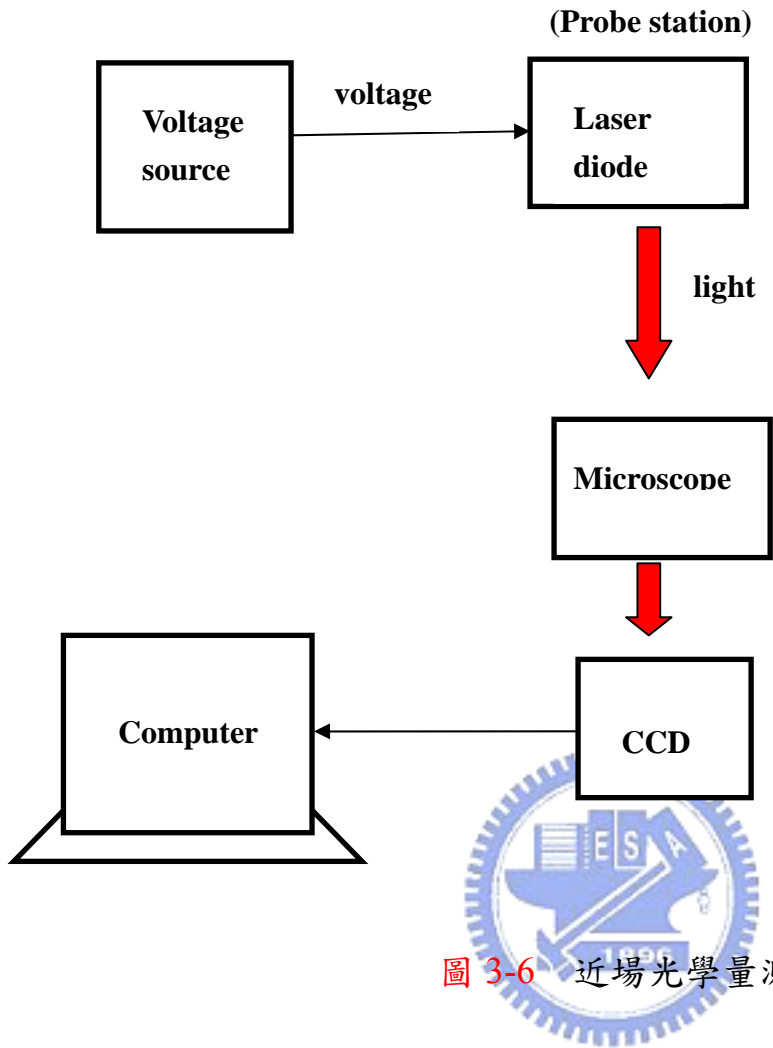


圖 3-6 近場光學量測系統

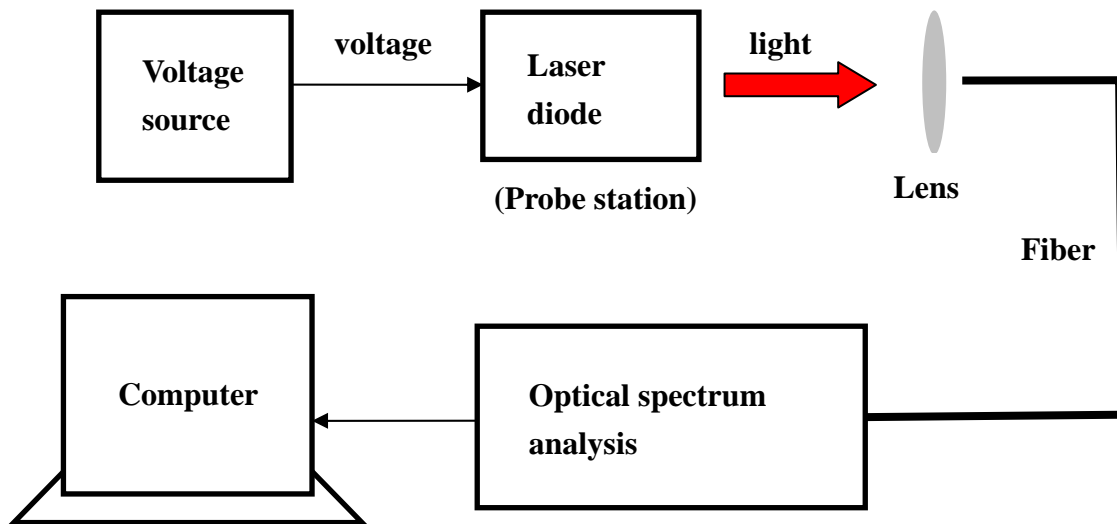


圖 3-7 雷射輸出光譜量測系統圖

第四章

光子晶體微共振腔雷射特性討論

本研究成功地將二維光子晶體微共振腔整合在邊射型雷射上，製作出單模面射型雷射。並且比較 D1(拿掉一個週期的洞)、D2(拿掉兩個週期的洞)微共振腔的差異，還有利用微共振腔的特性，做進一步的應用。以下我們將一一探討這些元件的特性。

4-1 邊射型雷射

由於我們的光子晶體微共振腔雷射是整合在邊射型雷射上，所以，在討論光子晶體雷射前，我們必須先了解一下邊射型雷射的輸出特性。我們用來製作雷射的wafer是 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 量子井結構，其詳細磊晶結構請參考第 3-3 節。邊射型雷射是以兩端劈裂面當鏡面的Fabry-Perot共振腔雷射。雷射的條紋(Strip)寬度為 20 μm ，長度分別為 500 μm 、1000 μm 、1500 μm 與 2000 μm 。劈裂成不同長度，是為了萃取雷射基本參數。以下我們分別對此雷射的頻譜特性、L-I特性、溫度特性做討論。

4-1-1 頻譜特性

圖 4-1 為共振腔長度 1500 μm 在 20°C下不同驅動電流的輸出頻譜，就如一般QW邊射型雷射一樣，中心波長為 992.5 μm 。在高驅動電流時，頻譜寬度大約有 2.5nm。

4-1-2 L-I 特性

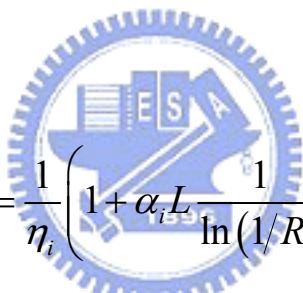
圖 4-2 為長度 1500 μm 雷射在 20°C下的L-I曲線圖。臨界電流(Threshold current)為 110 mA，臨界電流密度(Threshold current density)為 366 A/cm^2 ，

η_s (slope efficiency) 為 0.19。

為了萃取雷射參數，我們改變共振腔長度，量測其 slope efficiency 之變化，以下為其整理表：

cavity length	η_s (one side) (mW/mA)
500 um	0.30962
1000 um	0.23728
1500 um	0.19323
2000 um	0.15567

長度變長， slope efficiency 增加，把這些關係帶入下面 Fabry-Perot 共振腔雷射基本公式中：


$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_s} \times \frac{1.24}{\lambda} = \frac{1}{\eta_i} \left(1 + \alpha_i L \frac{1}{\ln(1/R)} \right) \quad (\text{公式 4-1})$$

η_d ：外部量子效率(external quantum efficiency)

η_i ：內部量子效率(internal quantum efficiency)

η_s ：slope efficiency

λ ：雷射輸出波長

α_i ：內部損失(internal loss)

L：Fabry-Perot 共振腔長度

R：反射率

以 $(1/\eta_d)$ 對共振腔長度L的作圖，得圖 4-3，由截距與斜率可以萃取出 η_i 和 α_i ，分別為 74.5 %和 11.08 cm^{-1} 。

4-1-3 溫度特性

圖 4-4(a) 為長度 1500um 雷射的頻譜隨溫度變化圖，可以看出當溫度升高時，輸出波長呈現紅移(red shift)，整理成圖 4-4(b)，可以得到中心波長移動速度為 $0.45\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，這是由兩個因素造成：1. 溫度升高，主動層材料的能隙(band gap)變小，所以發出的光波長會變長；2. 溫度升高，材料的折射率變大，所以在共振腔中的共振波長變長。

4-2 光子晶體微共振腔雷射

由上一節，瞭解了邊射型雷射的基本特性，現在我們就可以將邊射型雷射與光子晶體微共振腔結構結合在一起。光子晶體雷射的示意圖如圖 4-5 所示，把邊射型雷射的一端用擁有微共振腔的光子晶體結構取代，另一端依然為劈裂鏡面。光子晶體的底部必須掏空，形成一個平板(slab)，如圖 4-6 所示，用以增加微共振腔的品質，與減少光在微共振腔中的損失^[9]。以邊射型雷射作為光源，打入光子晶體，只有特定波長可以耦合進入微共振腔中共振，並且由表面發射，製作出單模面射型的雷射！

以下我們從光子晶體的設計到元件特性一一做詳細的討論，最後對光子晶體微共振腔雷射做進一步的應用。(為了方便比較，所以作為光源的邊射型雷射都為相同的結構，為 Fabry-Perot 共振腔長度 1500um，條紋寬度 20um，mesa etch 深度為 1.1um，並且光打入光子晶體的方向皆為 M 方向)。

4-2-1 光子晶體微共振腔圖形設計

設計時，最重要的是要知道輸入光源的波長，此波長就是邊射型雷射的輸出波長，由 4-1-1 節可知，輸出波長為 991~994 nm，所以設計的光子晶體能隙範圍必須包含 991~994 nm，並且微共振腔的共振波長也要落在其中，這樣才能有光在微共振腔中共振。由於邊射型雷射產生的光主要為 TE 模態，故採用六角排列(hexagonal)的柱狀孔洞結構，以產生 TE 模態能隙。

我們利用 R-Soft Design Group 所開發的模擬軟體來設計我們的光子晶體微共振腔 D1(拿掉一個週期的洞)，由於 3 維模擬過於繁瑣，所以我們採取的是 2 維無窮長加上修正項的光子晶體結構來模擬。經過一系列的模擬，我們找到一個最適合的光子晶體結構， $2r = 165\text{nm}$ ， $a = 260\text{nm}$ ，共振波長為 992.5nm ，其結構示意圖如圖 4-7。

現在還要考慮一個條件，那就是微共振腔的位置，由於我們是採用光源從側邊入射，讓光可以耦合進入到微共振腔，所以位置不宜離邊緣太遠，太遠會使進入的光太少，甚至沒有；但是也不宜太近，太近會使微共振腔的 Q 值變差！圖 4-8 是微共振腔位置與共振波長的關係圖，可以發現放在距離邊緣第五個週期為最佳的位置，有最佳的強度與 Q 值。

圖 4-9 為實際元件模擬圖。邊射型雷射光源打入光時，當入射波長 λ (λ 在光子晶體微共振腔能隙中) 不符合微共振腔的 D1 的共振波長 λ' 時，光子晶體結構可以視為一個單純的鏡面；只有波長 λ' 可以耦合進入並且共振，其共振模態為 dipole mode，並且旁邊無微共振腔的光子晶體，也可當作鏡面 [10]。

4-2-2 光子晶體微共振腔 D1 雷射

圖 4-10 是光子晶體微共振腔 D1 雷射(以下簡稱微共振腔 D1 雷射)的上視 SEM 圖，圖 4-11 為其側視 SEM 圖，光子晶體底部淘空，形成光子晶體平板，厚度約為 400nm 。以下我們分別對 D1 雷射的近場圖形、頻譜特性、L-I 特性與溫度特性做討論。

4-2-2-1 近場圖形

利用第 3-3 節中所介紹的近場量測系統，拍攝在操作溫度 20°C 、驅動電流為 150mA 時的近場圖形，圖 4-12，右邊為其 SEM 對照圖。在微共振腔 D1 的位置處，可以看到有光射出，符合我們的預期，光會從表面發射。不僅在

微共振腔D1 處有光，在光子晶體與邊射型雷射的接面處，也有不少光射出，推測是因為實際製作出光子晶體的柱狀孔洞並非完美圓滑，會產生許多散射，從四面八方散出，如圖 4-13 所示。

4-2-2-2 頻譜特性

圖 4-14 為微共振腔D1 在電流 110mA到 194mA的表面輸出頻譜，可以清楚看出為單一模態，就算是在高驅動電流的情況下，依然維持單一模態輸出，並且此單一波長一直維持在 992.8nm。微共振腔D1 的輸出頻譜的半高寬為 0.9nm，共振波長為 992.8nm，所以 $Q = 1100$ ，此Q值不高，主要的原因是因為微共振腔D1 的共振模態為Dipole mode，Dipole mode的共振模態有X方向和Y方向，此兩方向的共振模態會degenerate Q值^[11]。

圖 4-15 為劈裂面端電流 110mA到 194mA的輸出頻譜，跟雙劈裂面的邊射型雷射頻譜大同小異，同樣是輸出波長約為 991~994nm，並沒有因為加上光子晶體而改變。唯一的不同就是，不論在多少的驅動電流下，波長為 992.8nm的強度，都比附近波長的強度弱，這可以由反射率來解釋。我們知道，當光的能量剛好落在光子晶體能隙的範圍時，理論上可以達到 100%的反射率，如圖 4-16 所示；但是我們設計的光子晶體結構包含微共振腔D1，並且波長為 992.8nm的光可以耦合進去，所以一定會對反射率造成一些影響。圖 4-17 為光子晶體包含微共振腔D1 結構所計算出的反射率，在波長 992.8nm處，反射率比較小，這是因為微共振腔D1 只允許波長 992.8nm的光耦合進去，既然此光可以傳過去，所以反射量就會減少，反射率當然會比較低，對其他波長而言，光子晶體依然可視為一個完美鏡面。以雷射原理的來說明，當反射率R變小時， α_m (mirror loss)就會變大，輸出強度自然就會變小。

4-2-2-3 L-I 特性

圖 4-18 為 D1 雷射在 20°C 下 劈裂面端和微共振腔 D1 表面輸出的 L-I 曲線，臨界電流為 106 mA，臨界電流密度為 352 A/cm²。

由雷射基本原理，我們可以利用劈裂面端的 L-I 曲線的斜率 (slope efficiency, η_s)，推算出包含微共振腔 D1 的光子晶體鏡面等效反射率 R_{PhC} ，公式如下：

$$\eta_s = (\eta_i) \times \frac{(1/2L) \ln(1/R)}{\alpha_i + (1/2L) \ln(1/R) + (1/2L) \ln(1/R_{PhC})} \times \left(\frac{1.24}{\lambda} \right) \quad (\text{公式 4-2})$$

α_i 和 η_i 分別為 11.08 和 74.5% (由 4-1-2 節得知)，L 為邊射型雷射的共振腔長度，R 為 GaAs 劈裂面的反射率 32%，得出 R_{PhC} 為 53%。理論上，當光能量落在光子晶體能隙中時，應該為 100% 的反射率，但是實際上會有許多損失，像是材料的吸收，不圓滑柱狀孔洞的散射等等，都會造成的 R_{PhC} 下降，這在學長 王勝雄 的論文中詳細討論，在此就不贅述。

由 **圖 4-18** 可看出相較於劈裂面端，從共振腔 D1 輸出的光強度非常弱，我們推論是以下幾個原因：1. 因為邊射型雷射有 20um 的寬度，所以入射光就有 20um 的寬度，但是可以耦合進入微共振腔 D1 的寬度遠小於 20um，所以大部分的光都會被光子晶體鏡面反射回去，如 **圖 4-19** 所示；2. 邊射型雷射的輸入光譜約有 2.5nm 半高寬的範圍，但是可以耦合到微共振腔 D1 的光只有約 0.9nm 的半高寬，如 **圖 4-20** 所示；3. 微共振腔 D1 的材料結構包含主動層，會吸收光，並且實際上不可能是完美的光子晶體圖形，不圓滑的柱狀孔洞，都會造成光的散射損失。

在此我們定義一個參數：微共振的耦合效率 (Coupled Efficiency)， η_c ，參數定義為：

$$\eta_c = \frac{\text{微共振腔輸出強度}}{\text{邊射型雷射輸入光子晶體總強度}} \quad (\text{公式 4-3})$$

此耦合效率已經包含了上一段所述光在光子晶體的全部損失，以得出邊射型雷射加上光子晶體微共振腔結構後，對入射光的真正有效利用率，所以可預期耦合效率是非常低的！

耦合效率的示意圖，如圖 4-21。當我們知道邊射型雷射的一端輸出強度 (Output 1)，利用公式(4-2)就可以計算出另一端的輸出強度(Output 2)。

$$\frac{\text{Output 1}}{\text{Output 2}} = \frac{\eta_{s,R}}{\eta_{s,R_{PhC}}} = \frac{\ln(1/R)}{\ln(1/R_{PhC})} \quad (\text{公式 4-4})$$

可得出兩端的輸出強度成一個比例關係，Output 2 就是輸入光子晶體的總強度。所以耦合效率就為：

$$\text{Coupled efficiency}(\eta_c) = \frac{\text{Output 3}}{\text{Output 2}} = \frac{\eta_{s,\mu\text{-cavity}}}{\eta_{s,R_{PhC}}} \quad (\text{公式 4-5})$$

得微共振腔D1 雷射的 η_c 為 0.06%。

4-2-2-4 溫度特性

圖 4-22 為其頻譜隨溫度變化圖，當溫度改變時，不僅輸出波長改變，輸出強度也產生明顯變化。先討論波長變化，波長隨溫度增加呈現紅移(red shift)現象，移動速度為 0.09nm/°C，這是由於溫度升高，材料的折射率變大，所以在微共振腔D1 中的共振波長變長。強度變化是由邊射型雷射的溫度特性與微共振腔D1 的溫度特性同時影響。邊射型雷射的輸出頻譜紅移速度為 0.45 nm/°C，這也就是輸入光子晶體的光源頻譜紅移速度，而微共振腔D1

中的共振波長紅移速度為 $0.09 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ，要使微共振腔D1 有光射出，輸入的光源必須包含其共振波長，並且由 4-2-2-3 節得知，微共振腔D1 輸出光的強度，與輸入光在其共振波長的強度成正比，由以上的關係，我們可以整理成圖 4-23，由圖解可以瞭解為何強度會隨溫度升高而先升後降。

4-2-3 光子晶體微共振腔 D2 雷射

微共振腔D1 雷射的Q值不高，主要的原因是因為D1 為dipole mode的共振模態，所以有許多研究，用一些方法提高Q值^{[12][13][14]}，其中一種方法就是改變微共振腔的結構，使其為monopole mode的共振模態，可使Q值提升。

所以我們也利用同樣的方法，把微共振腔由 D1 改成 D2(拿掉兩個週期的洞)，使入射光波的共振模態為 monopole mode，以達到提高 Q 值的目標。我們也是利用 R-Soft 的模擬軟體來設計我們的光子晶體微共振腔 D2 結構，找到一個最適合的結構， $2r = 166 \text{ nm}$ ， $a = 260 \text{ nm}$ ，monopole mode 的共振波長為 992.6 nm ，其結構示意圖如圖 4-24 所示。微共振腔 D2 的位置與 D1 相同，為距離邊緣第五個週期，以方便 D1 與 D2 的比較。圖 4-25 為實際元件模擬圖，符合共振波長的光可以耦合到微共振腔 D2 中共振，共振模態為 monopole mode。

圖 4-26 為微共振腔 D2 雷射的上視 SEM 圖，圖 4-27 為其側視 SEM 圖，光子晶體底部淘空，形成光子晶體平板，厚度與微共振腔 D1 雷射相同約為 400nm 。以下我們分別對微共振腔 D2 雷射的近場圖形、頻譜特性、L-I 特性與 D1 做比較。溫度特性與 D1 相同，在此就不多做討論。

4-2-3-1 近場圖形

圖 4-28 是D2 雷射在操作溫度 21.5°C 、驅動電流為 160mA 時的近場圖形，在D2 微共振腔的位置有光發出。與D1 雷射相同，在光子晶體與邊射型雷射的界面處也有光射出。

4-2-3-2 頻譜特性

圖 4-29 為微共振腔D2 在操作溫度 21.5°C下電流從 115mA與 198mA的表面輸出頻譜，如同微共振腔D1 為單一模態，就算是在較高驅動電流的情況下，依然為單一模態輸出。與微共振腔D1 的表面輸出頻譜比較，圖 4-30，D1 輸出波長為 992.8nm，D2 為 993.5nm，這是因為D1 雷射操作在 20°C而D2 雷射是在 21.5°C，溫度提高會有紅移現象發生。為何不讓D2 雷射操作在與D1 雷射相同的溫度呢？這是由於光子晶體製作過程中，有許多因素都會影響光子晶體圓柱孔洞的洞徑大小(也就是 r)，使得製作出光子晶體微共振腔的共振波長與設計的有所誤差。當輸入光源的波長沒有包含微共振腔的共振波長，微共振腔就不會有光存在，也就不會有光輸出。雖然光子晶體製作的誤差很難去精確控制，但是我們可以控制輸入光源的波長，利用邊射型雷射的溫度特性，控制邊射型雷射的操作溫度，改變輸入光源的波長，調整到包含微共振腔的共振波長，使微共振腔D2 雷射可以運作，並且為了最佳化微共振腔D2 的輸出強度，會將邊射型雷射輸入光源的強度最大波長對準微共振腔的共振波長，圖解如圖 4-31。經過調整，微共振腔D2 雷射最佳操作溫度為 21.5°C。

圖 4-30 也可看出微共振腔 D2 有較小的半高寬，為 0.3nm，得到 Q 值為 3550，相較於微共振腔 D1(Q = 1100)有不小的提升，達到我們要提高微共振腔 Q 值的目的。

4-2-3-3 L-I 特性

D1 雷射與D2 雷射的劈裂面端輸出L-I曲線圖如圖 4-32，D2 雷射的臨界電流為 109mA比D1 雷射大 3mA，D2 雷射的slope efficiency為 0.191 比D1 雷射的 0.21 小，也就是D2 雷射的邊射型雷射光源特性比較差，推測主要原因是D2 雷射有較差的光子晶體鏡面等效反射率，由公式(4-2)，可算出D2 雷

射的光子晶體鏡面等效反射率為 0.39，比D雷射的 0.53 還小，反射率小， α_m (mirror loss)大，所以D2 雷射的特性較差。

D1 雷射與D2 雷射的微共振腔表面輸出L-I曲線圖如圖 4-33，臨界電流的大小是由提供光源的邊射型雷射主導，與微共振腔為D1 或D2 無關，所以臨界電流的差異如上一段所述。D2 雷射輸出slope efficiency較D1 雷射高，推測原因有兩點，1. 微共振腔D2 有較大的發光面積，如圖 4-34 所示；2. 光源可以耦合進入微共振腔D2 的寬度較D1 大，如圖 4-35 所示。

D2 的 η_c 為 0.9%，比D1 的 η_c 為 0.6%高，推測主要的原因與上一段相同，為D2 的發光面積與耦合寬度都較D1 大，所以表面輸出強度較強。

4-2-4 雙波長輸出的光子晶體微共振腔雷射

微共振腔的共振波長，主要是由構成微共振腔周圍的光子晶體孔洞半徑 r 與晶格常數 a 來控制，在固定 a 的情況下，改變周圍的光子晶體的 r ，由模擬可得到共振波長對 $2r$ 的關係圖，圖 4-36，其關係為直徑改變 1nm，共振波長改變 -1.08nm。我們就利用微共振腔的這種特性，在光子晶體上設計兩個不同共振波長的微共振腔，製作出可同時輸出雙波長的光子晶體微共振腔雷射。

由 4-2-3 節得知，微共振腔D2 有較好的特性，所以我們就用微共振腔D2 來製作，並且採用相同的 $2r=166\text{nm}$ 與 $a=260\text{nm}$ 來設計。先利用模擬軟體，找出另一個合適的 r ，由於微共振腔的輸入光源頻譜寬度大約只有 2.5nm，所以設計出來的兩共振波長間距不能寬於 2.5nm，得出一適當的 $2r'$ 為 165.2nm。兩個微共振腔D2 相距 10 個週期，左邊為 r 所構成的微共振腔D2(簡稱為D2_L)，右邊為 r' 所構成的微共振腔D2(簡稱為D2_R)。

實際元件的SEM上視圖為圖 4-37，圖 4-38 是此元件操作在 23.5°C 驅動電流為 180mA 的近場圖形，可以看到同時有兩個光點，光點位置分別與D2_L 和D2_R 位置相同，量測其微共振腔表面發光頻譜為圖 4-39，同時發出兩個波

長的光，波長分別為 993.4nm 與 994.2nm，Q 值分別為 3500 和 2840，兩波長間距為 0.8nm。微共振腔 $D2_R$ 所發出的 994.2nm 光，有較差的 Q 值與強度，推測應該是 $D2_R$ 周圍的光子晶體相較於 $D2_L$ 較不完美，使其光子晶體形成的微共振腔特性變差！



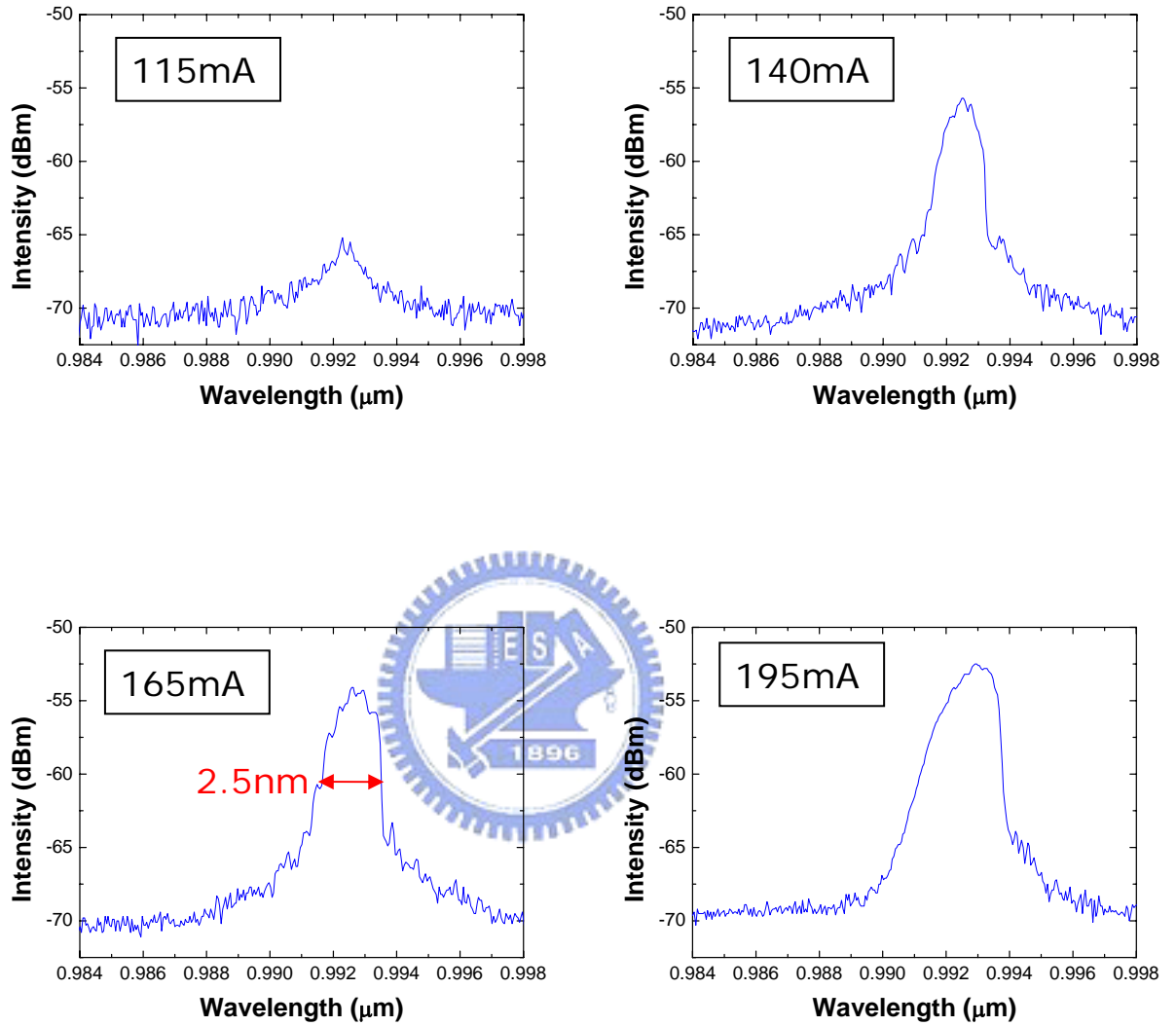


圖 4-1 共振腔長度 1500 μm 在不同驅動電流的輸出頻譜

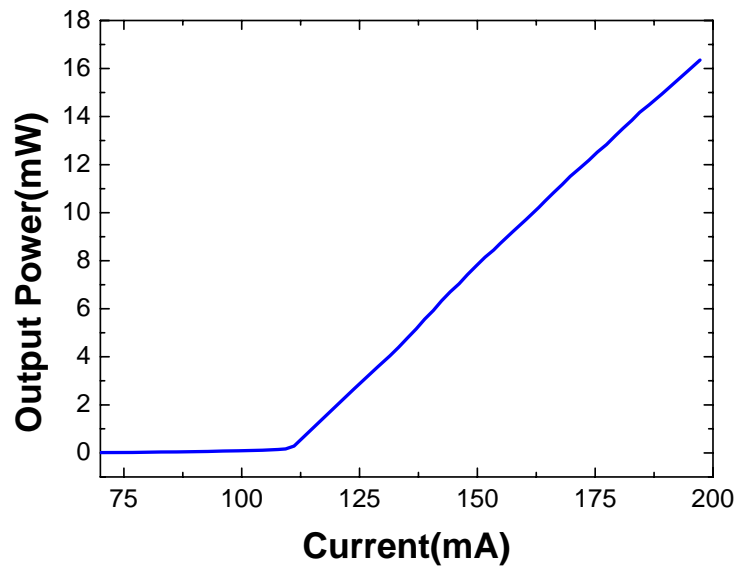


圖 4-2 長度 1500um雷射在 20°C下的L-I曲線圖

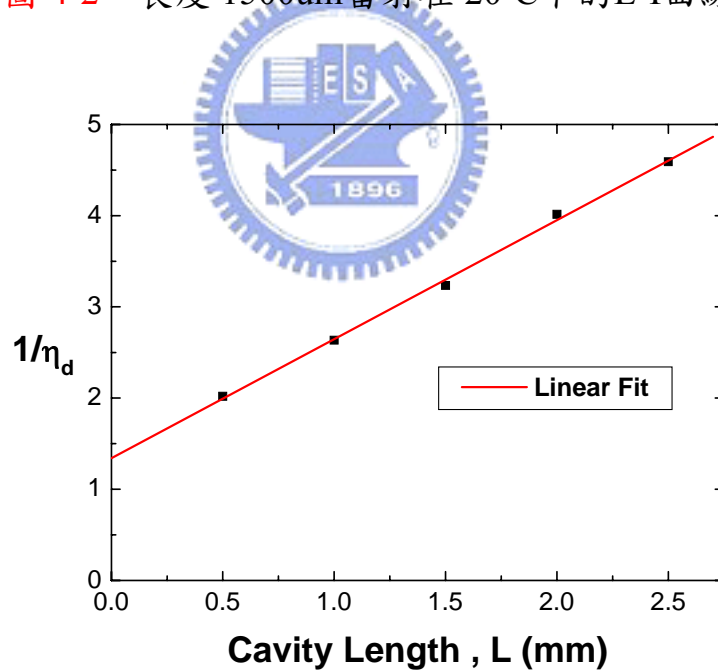
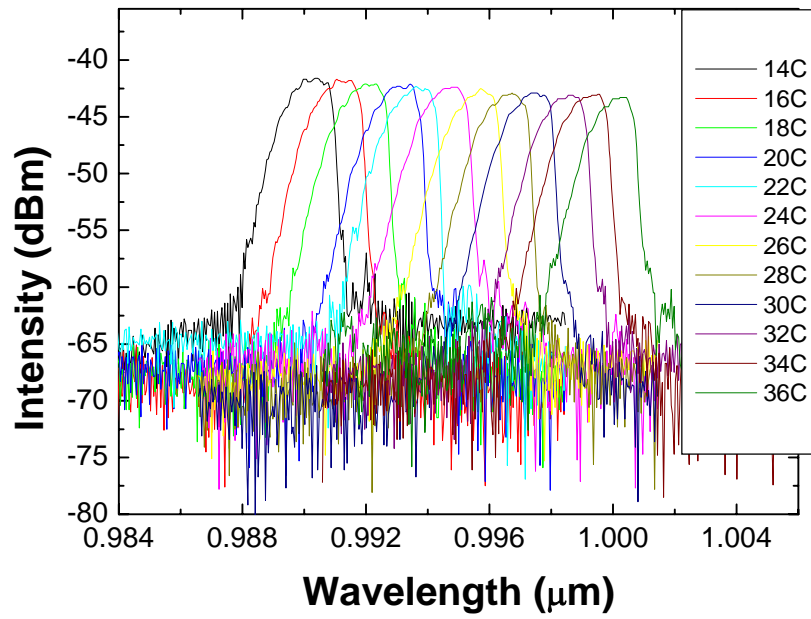
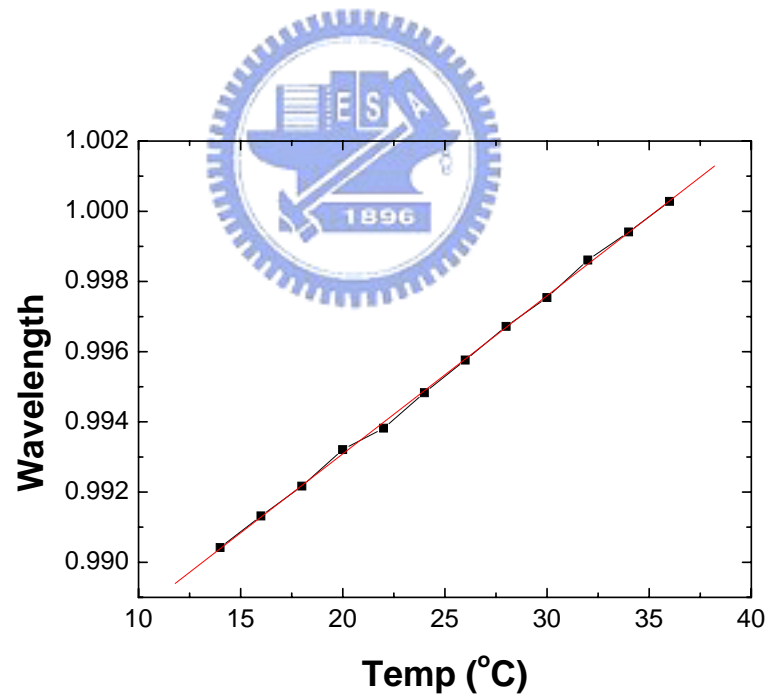


圖 4-3 $(1/\eta_d)$ 對共振腔長度L的作圖



(a)



(b)

圖 4-4 (a)長度 1500um 雷射的頻譜隨溫度變化圖
(b)中心波長隨溫度變化圖

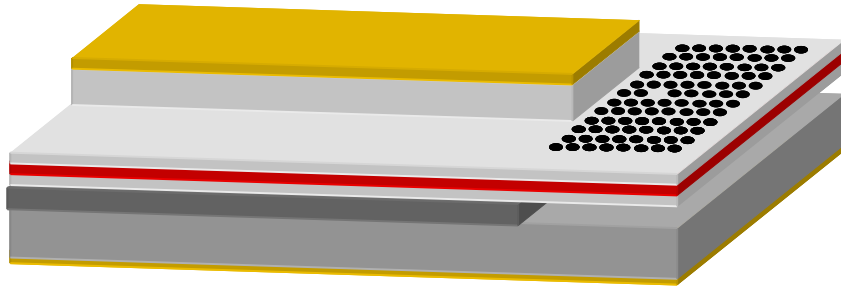


圖 4-5 光子晶體雷射的示意圖

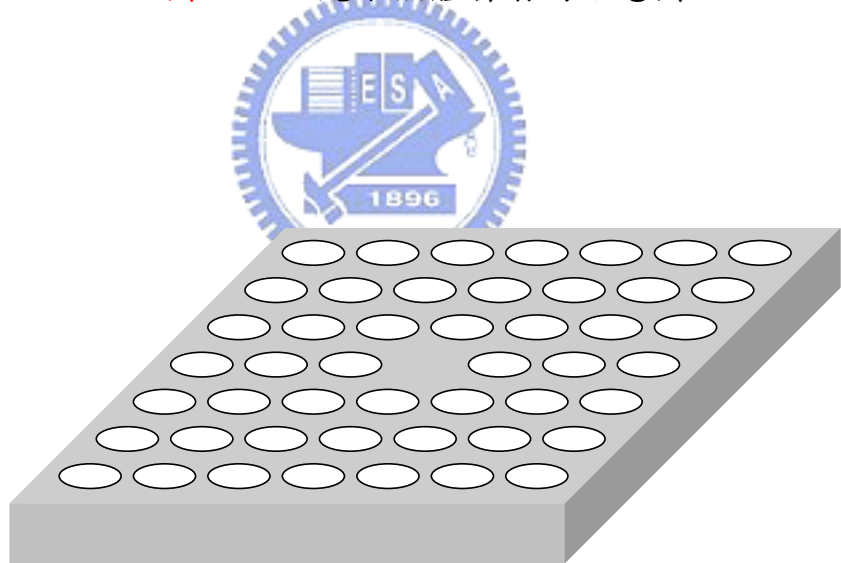


圖 4-6 光子晶體平板(slab)

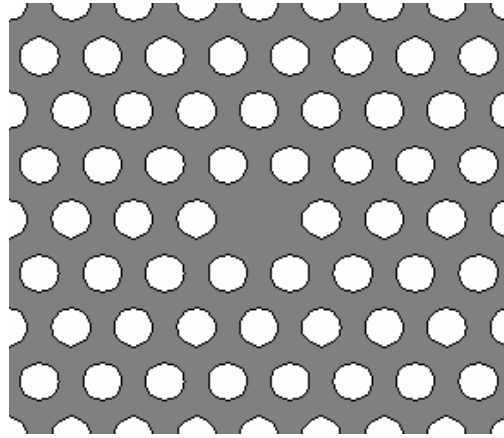


圖 4-7 光子晶體微共振腔 D1 結構示意圖

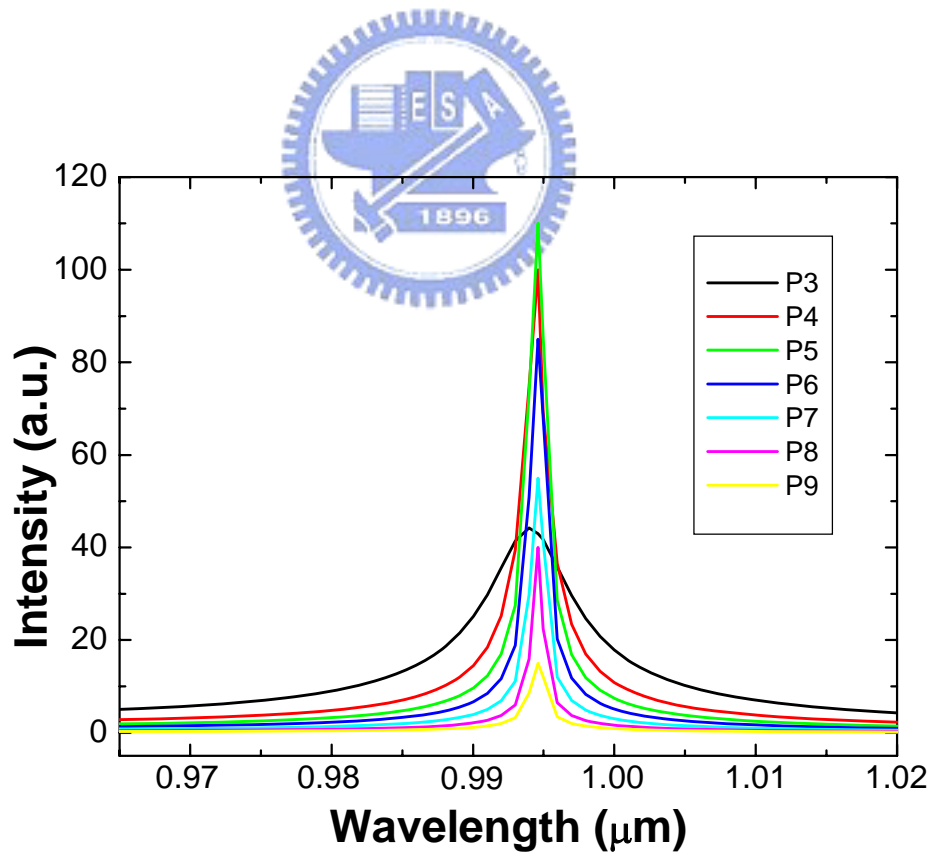


圖 4-8 微共振腔位置與共振波長的關係圖

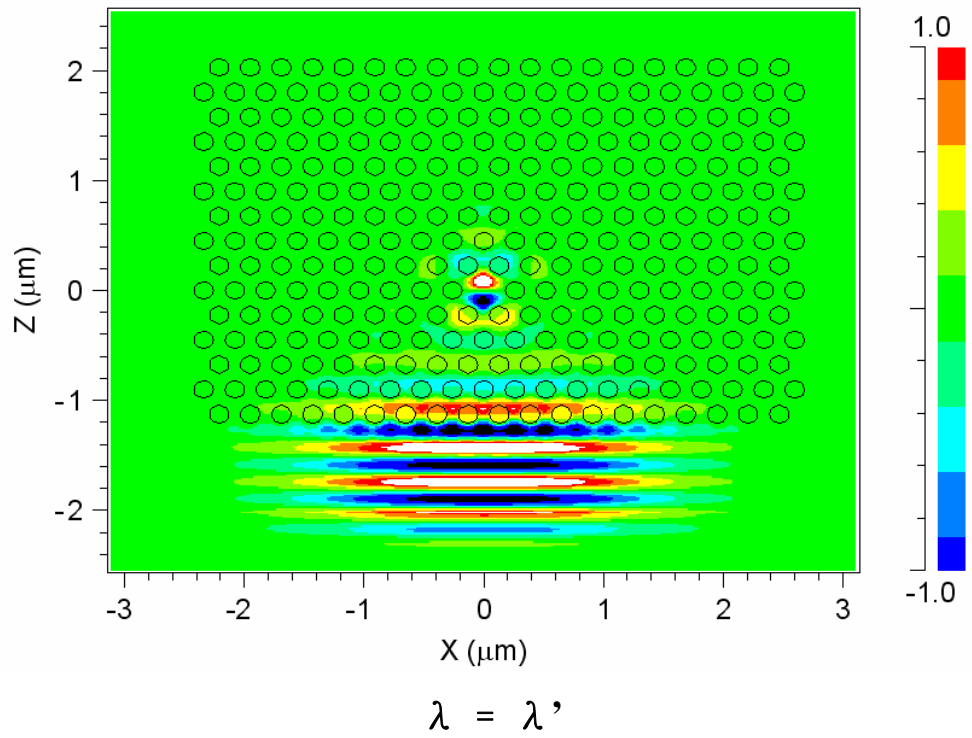
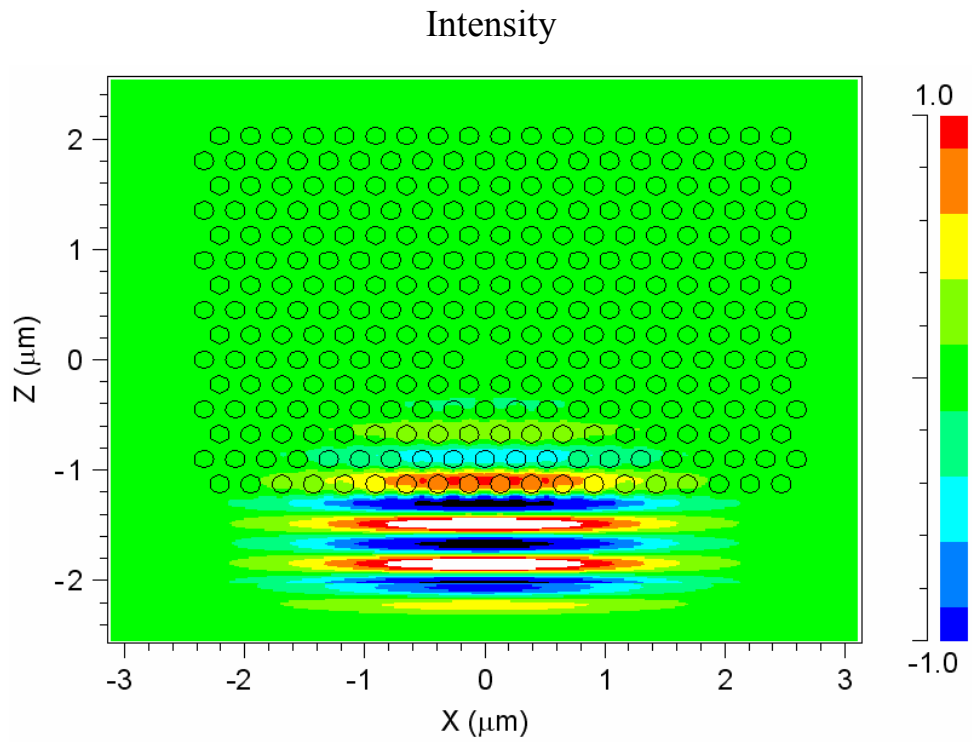


圖 4-9 實際元件模擬圖(λ' 為微共振腔的 D1 的共振波長)

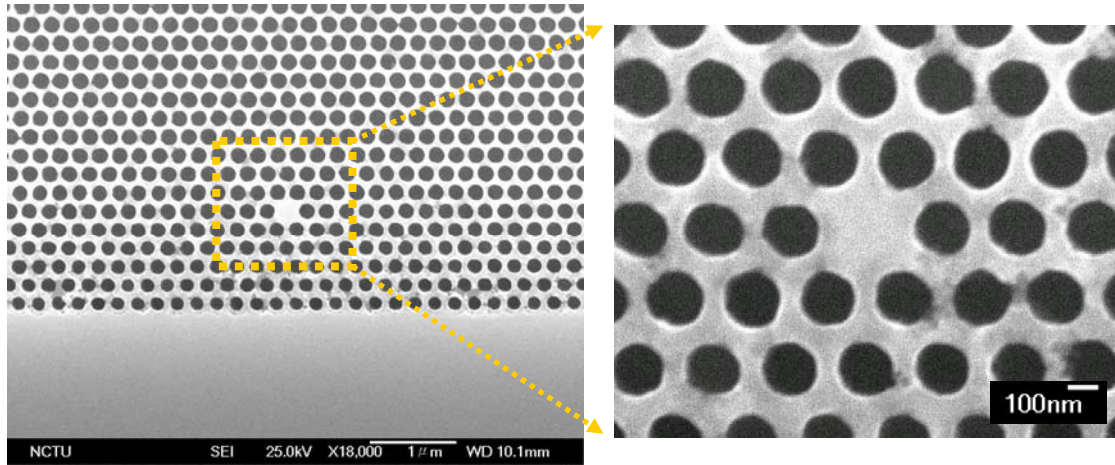


圖 4-10 微共振腔 D1 雷射的上視 SEM 圖

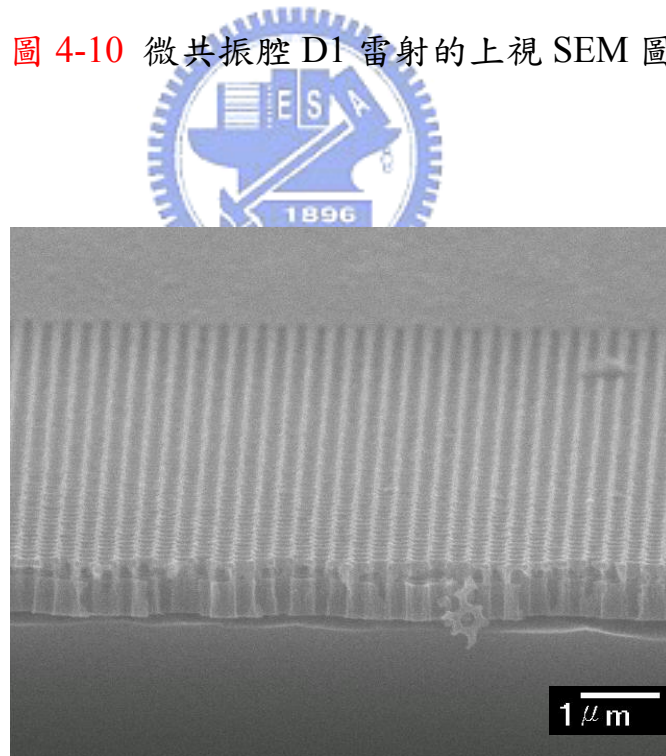


圖 4-11 微共振腔 D1 雷射的側視 SEM 圖

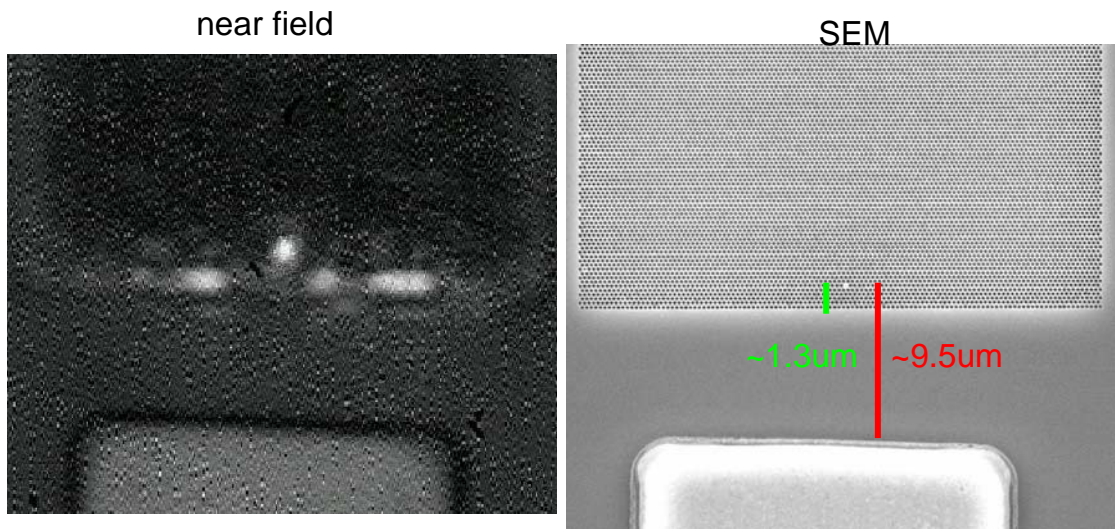


圖 4-12 操作溫度 20°C、驅動電流為 150mA 時的近場圖形
與 SEM 對照圖

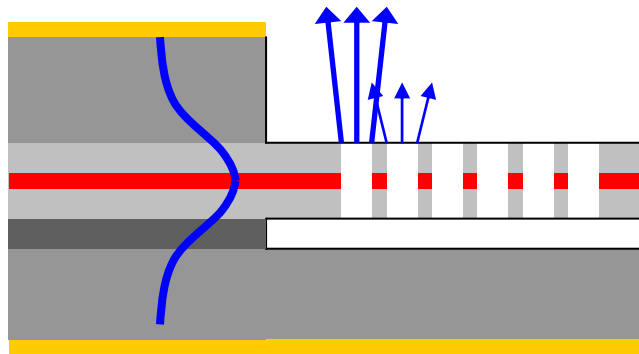


圖 4-13 光子晶體不完美所造成的散射

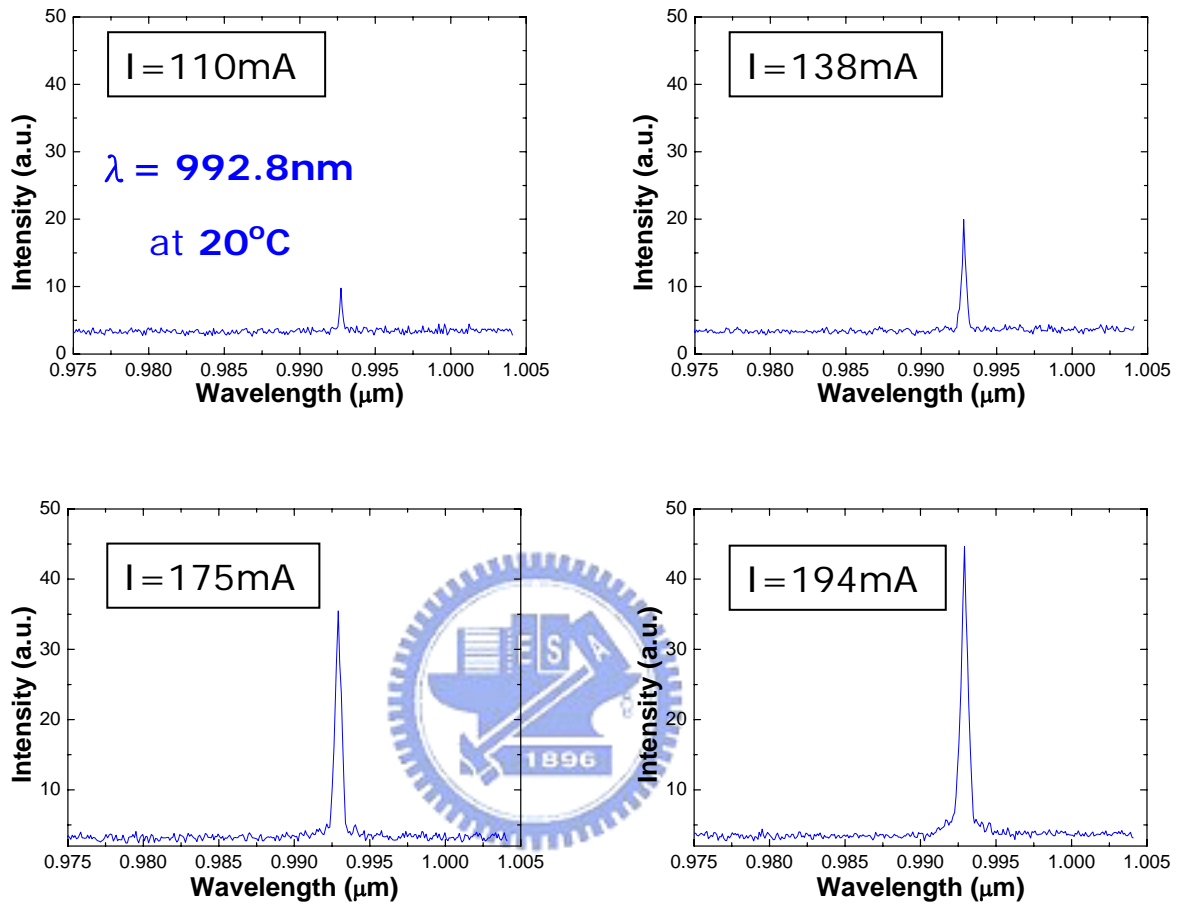


圖 4-14 微共振腔 D1 表面輸出頻譜

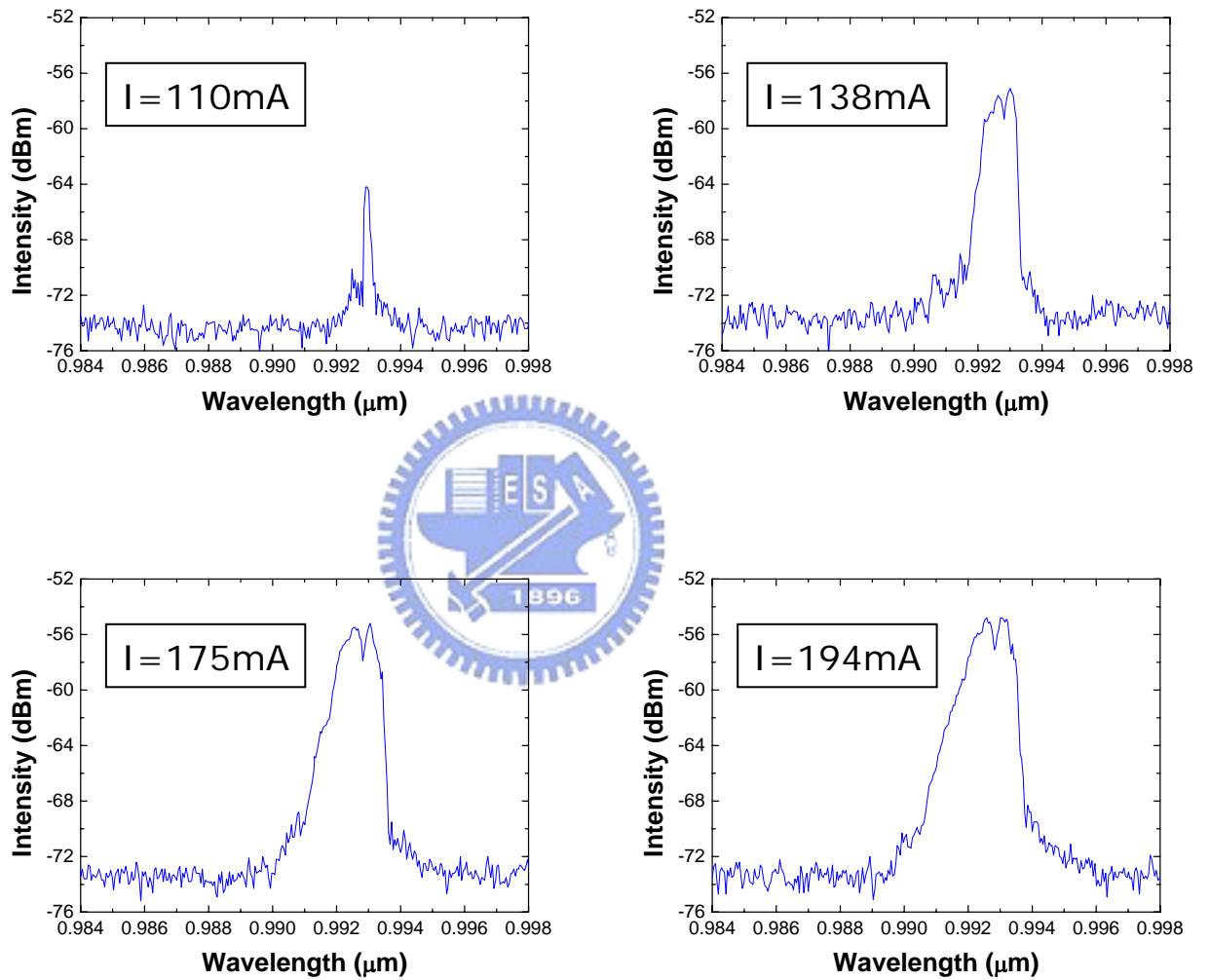


圖 4-15 D1 雷射劈裂面端的輸出頻譜

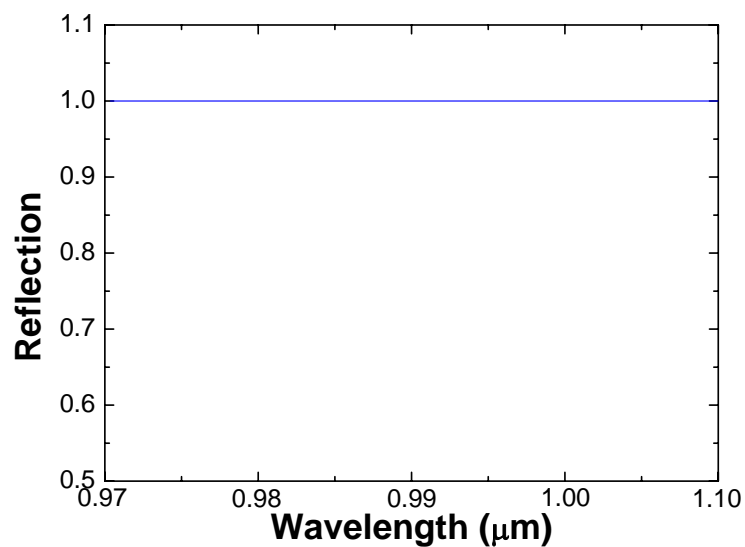


圖 4-16 模擬光的能量剛好落在光子晶體能隙的範圍時的反射率

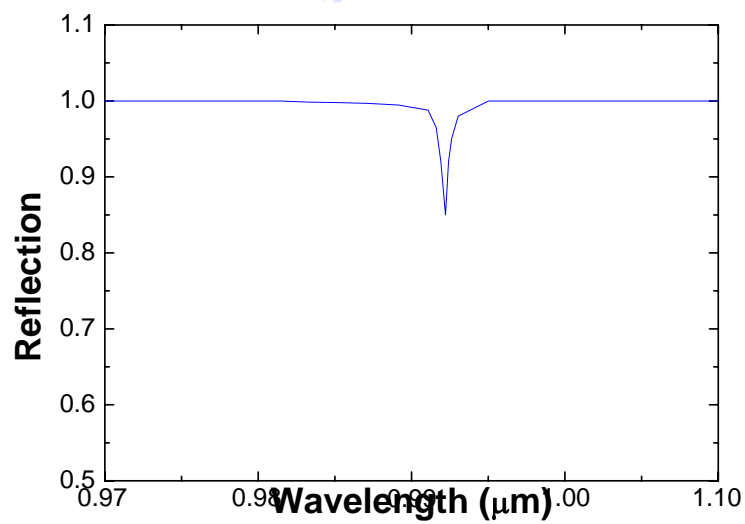
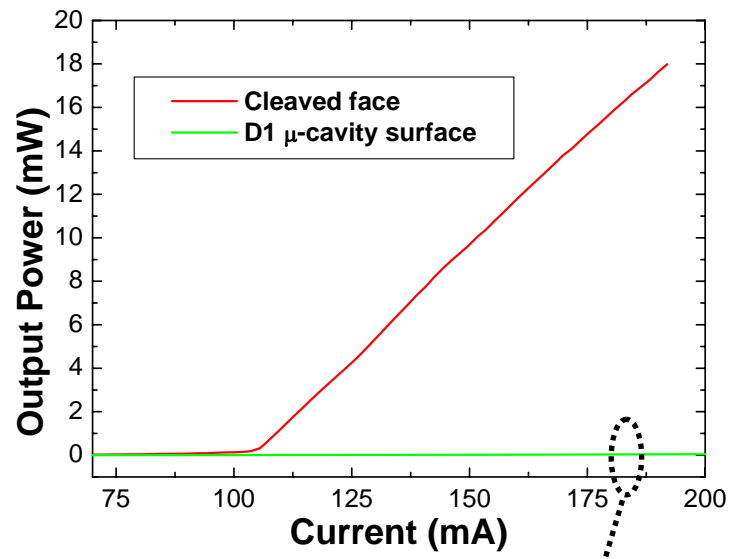


圖 4-17 模擬光子晶體結構包含微共振腔 D1 時的光反射率



放大

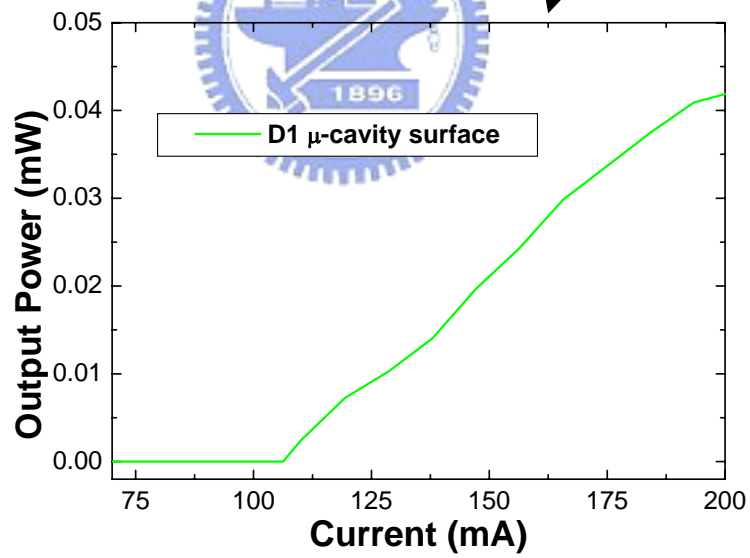


圖 4-18 D1 雷射在 20°C 下劈裂面端和微共振腔D1 表面輸出的L-I曲線

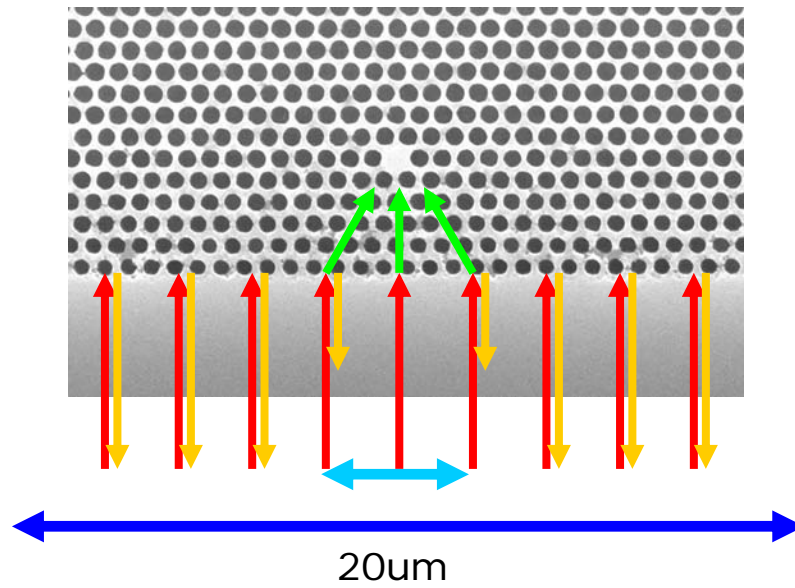


圖 4-19 輸入光源有 20μm 的寬度，但是可以耦合進入微共振腔 D1 的寬度遠小於 20μm

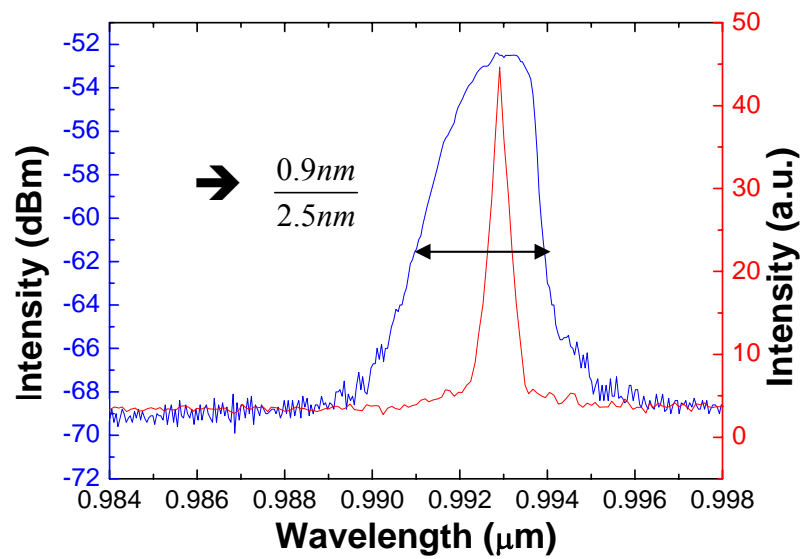


圖 4-20 輸入光譜約有 2.5nm 半高寬的範圍，但是可以耦合到微共振腔 D1 的光只有約 0.9nm 的半高寬

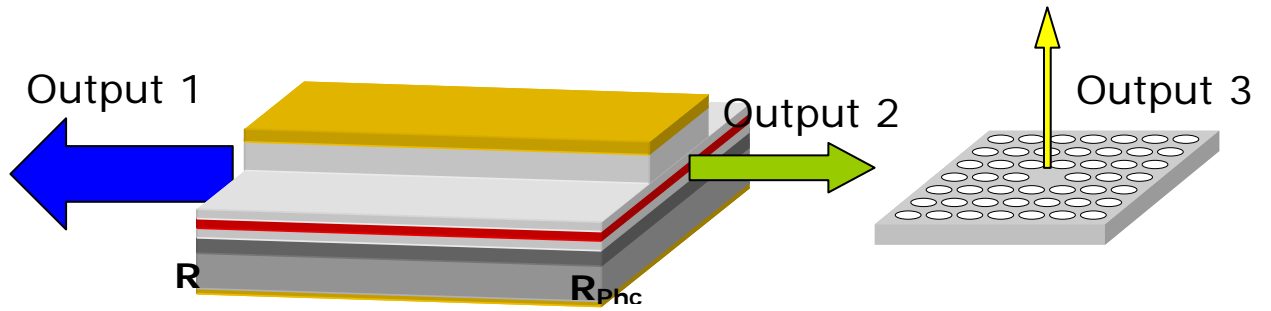


圖 4-21 耦合效率示意圖

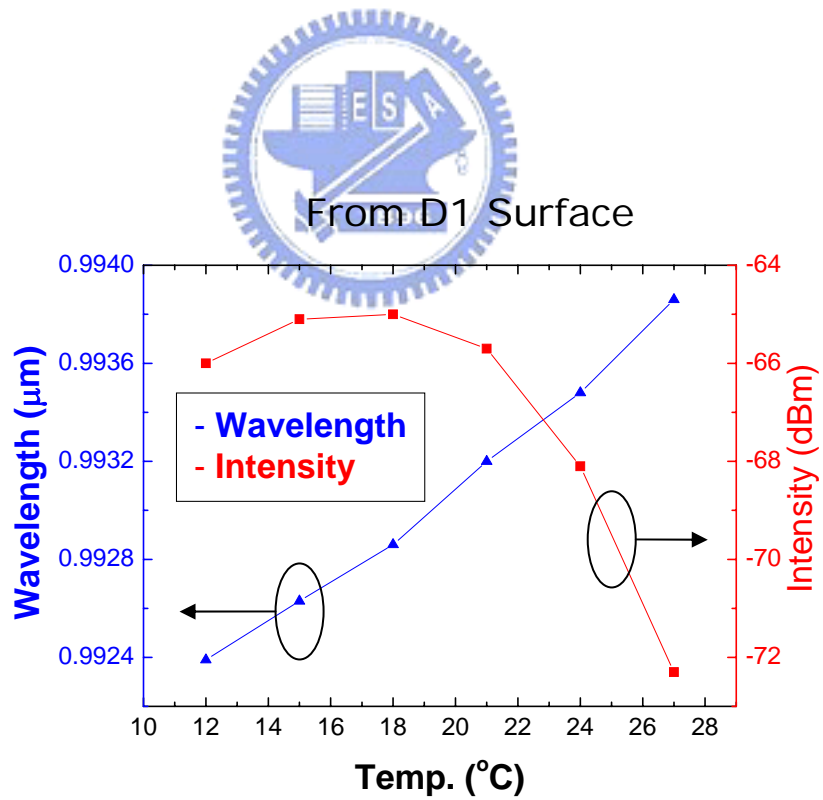


圖 4-22 D1 雷射表面輸出頻譜隨溫度變化圖

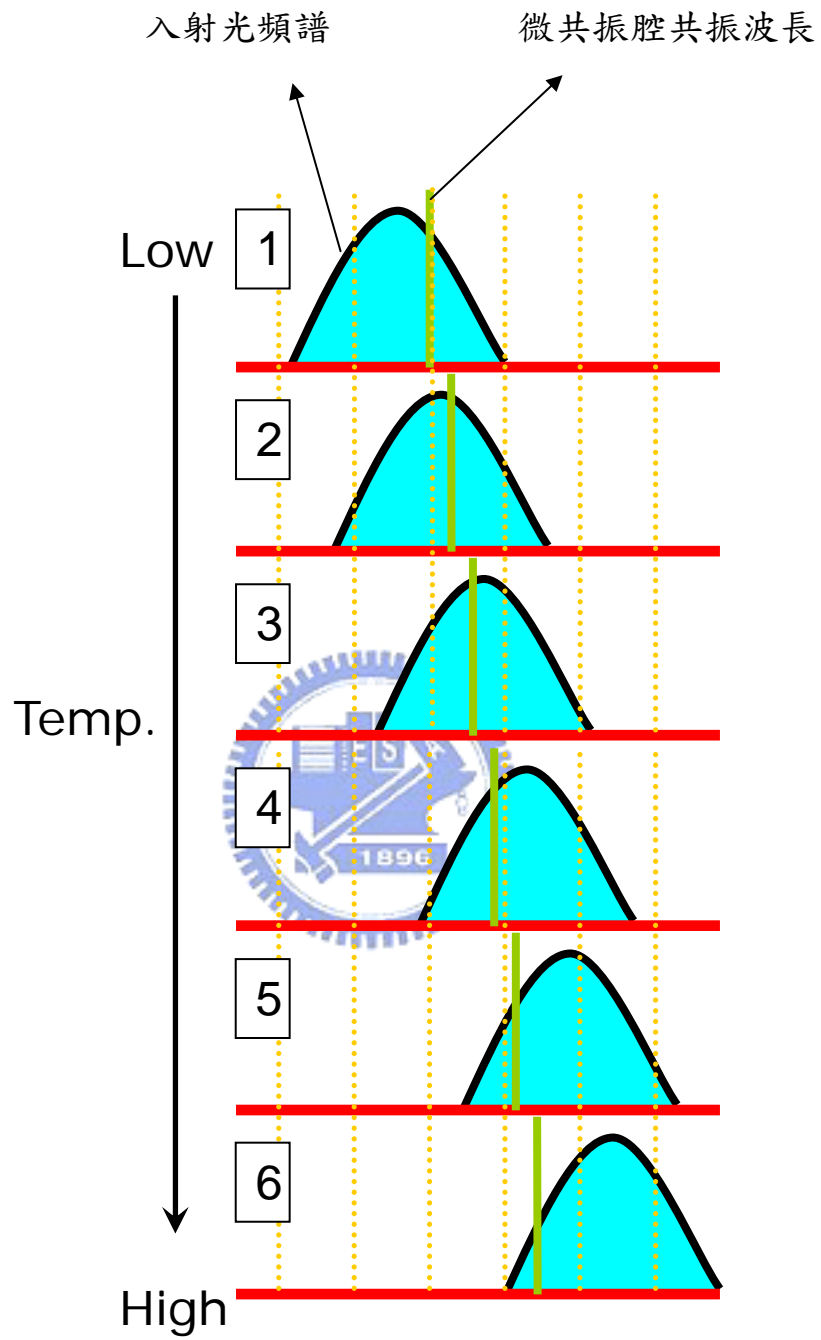


圖 4-23 輸出強度隨溫度升高而先升後降圖解

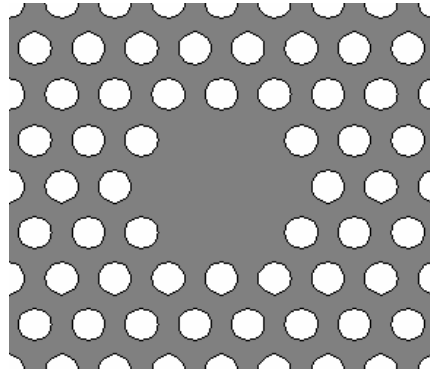


圖 4-24 光子晶體微共振腔 D2 結構示意圖

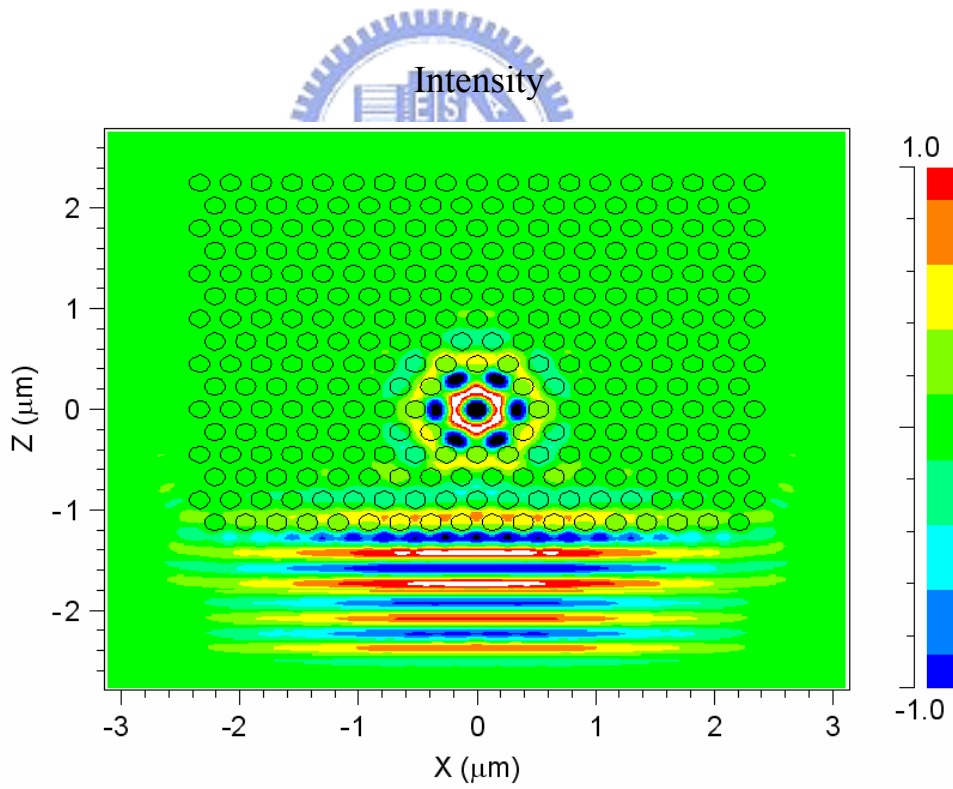


圖 4-25 光子晶體微共振腔 D2 元件模擬圖

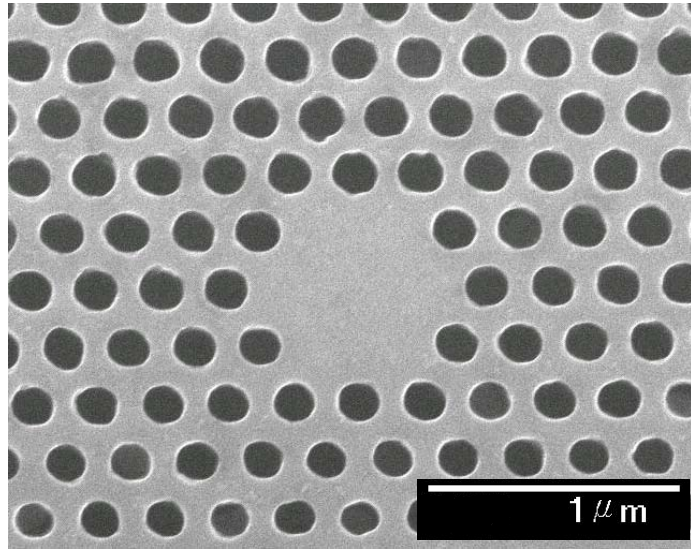


圖 4-26 微共振腔 D2 雷射的上視 SEM 圖

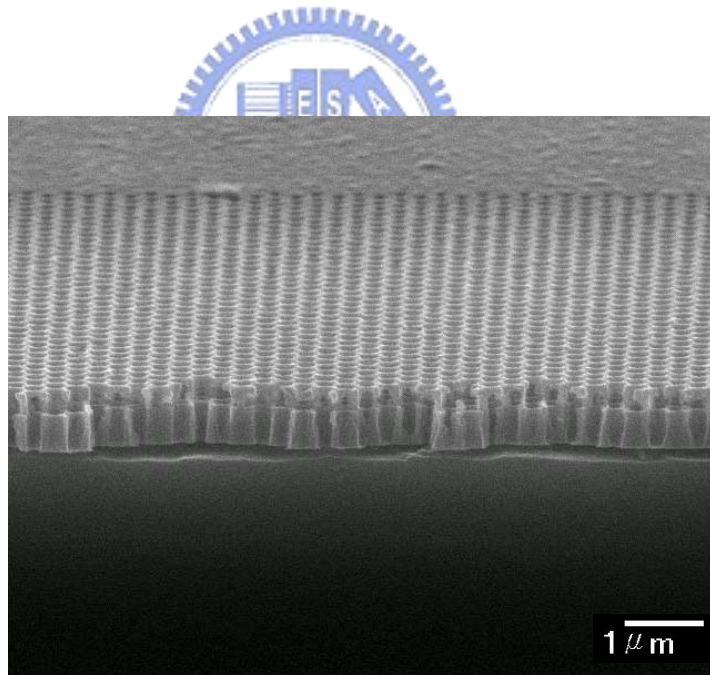


圖 4-27 微共振腔 D2 雷射的側視 SEM 圖

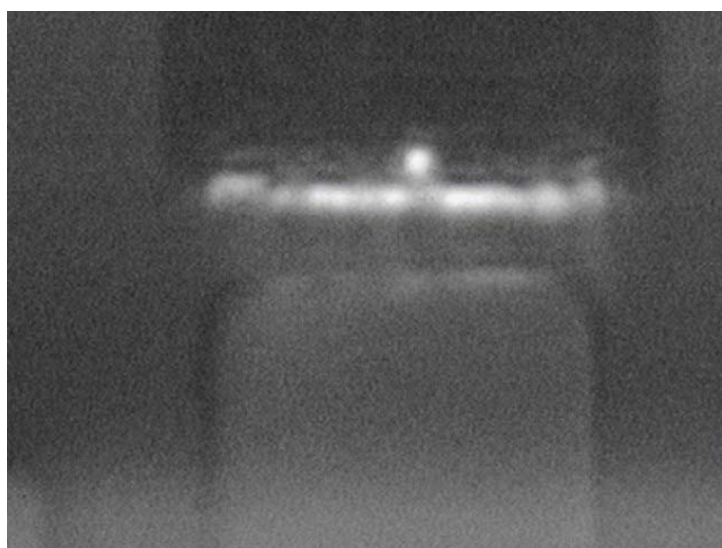


圖 4-28 D2 雷射在操作溫度 21.5°C 、驅動電流為 160mA 時的近場圖形



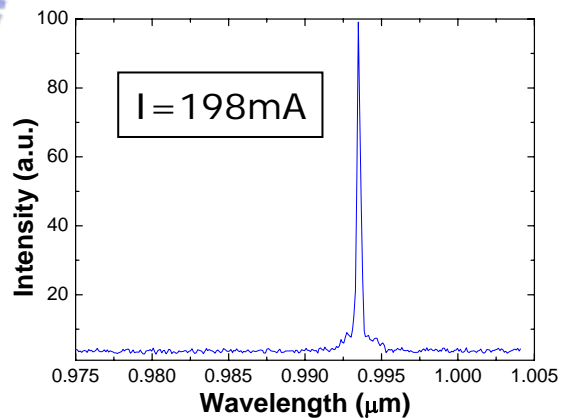
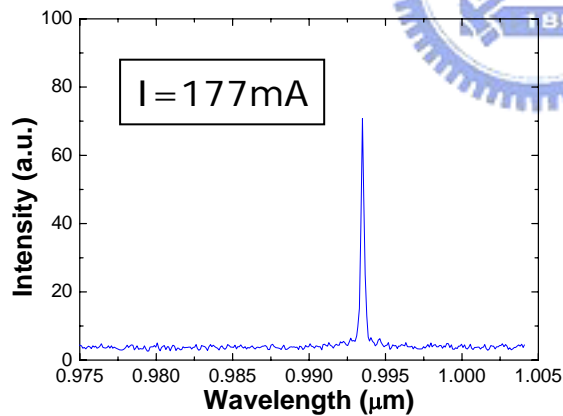
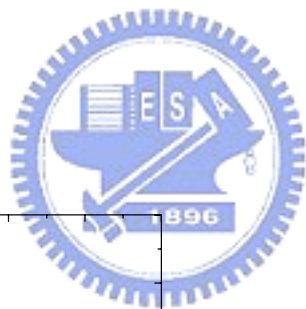
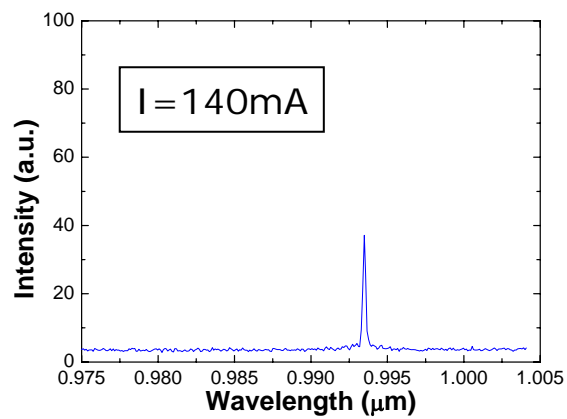
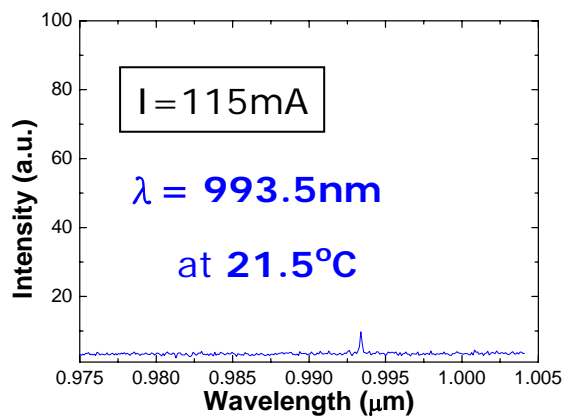


圖 4-29 微共振腔 D2 在電流從 115mA 與 198mA 的表面輸出頻譜

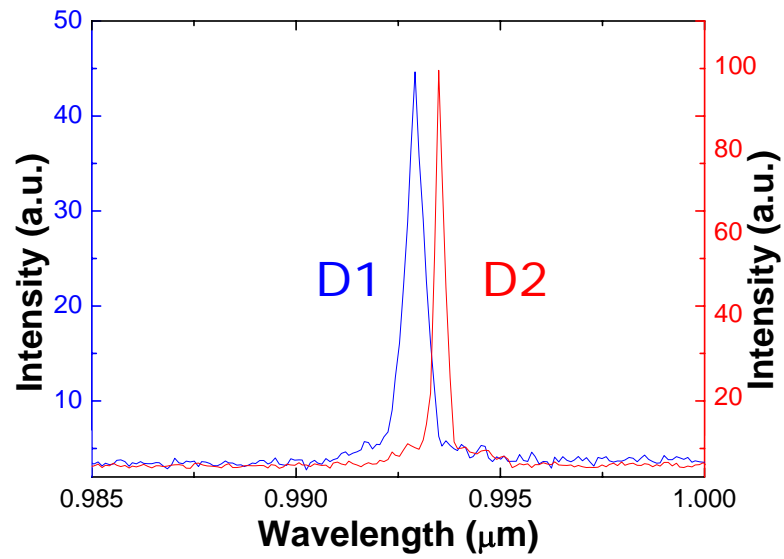


圖 4-30 微共振腔 D2 雷射與微共振腔 D1 雷射的表面輸出頻譜比較

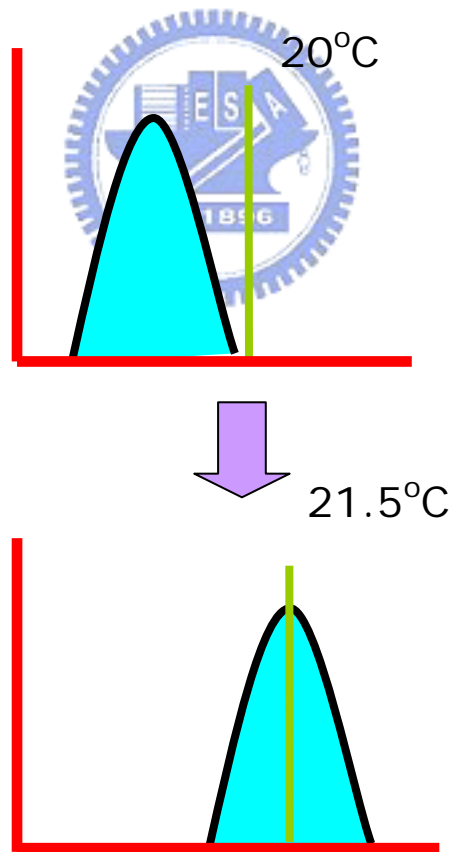


圖 4-31 藉由調整雷射的操作溫度改變輸入頻譜，進而包含微共振腔的共振波長

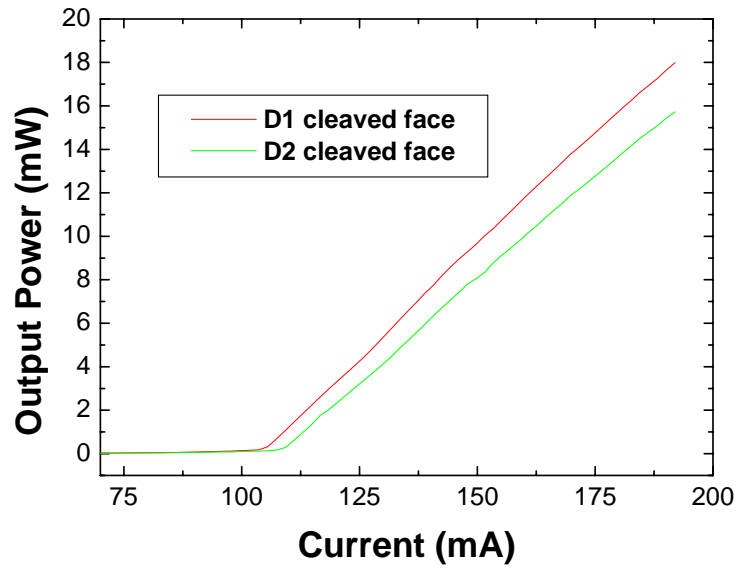


圖 4-32 D1 雷射與D2 雷射的劈裂面端輸出L-I曲線圖

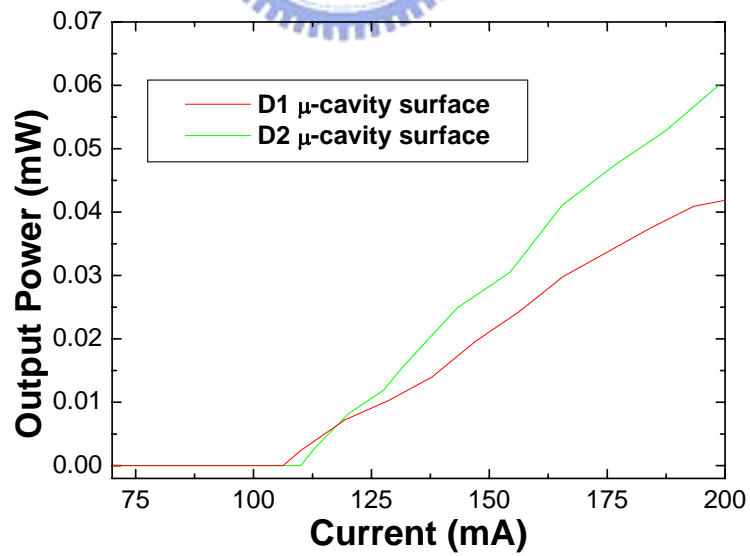
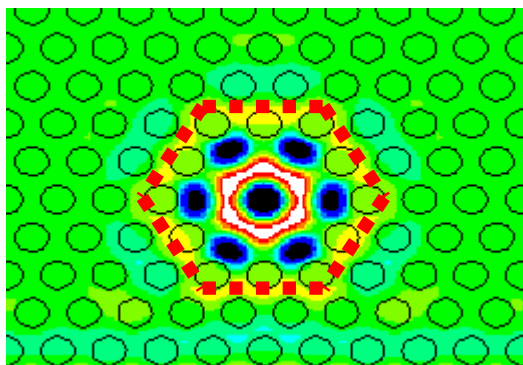


圖 4-33 D1 雷射與D2 雷射的微共振腔表面輸出L-I曲線圖

D2 simulation



D1 simulation

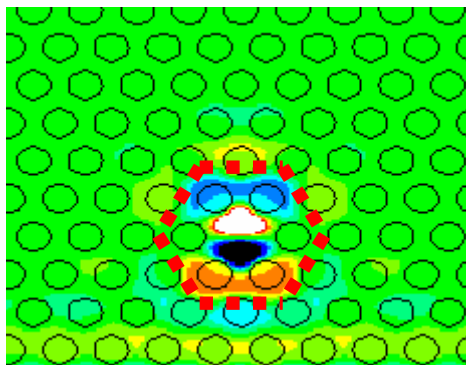


圖 4-34 微共振腔 D2 有較大的發光面積

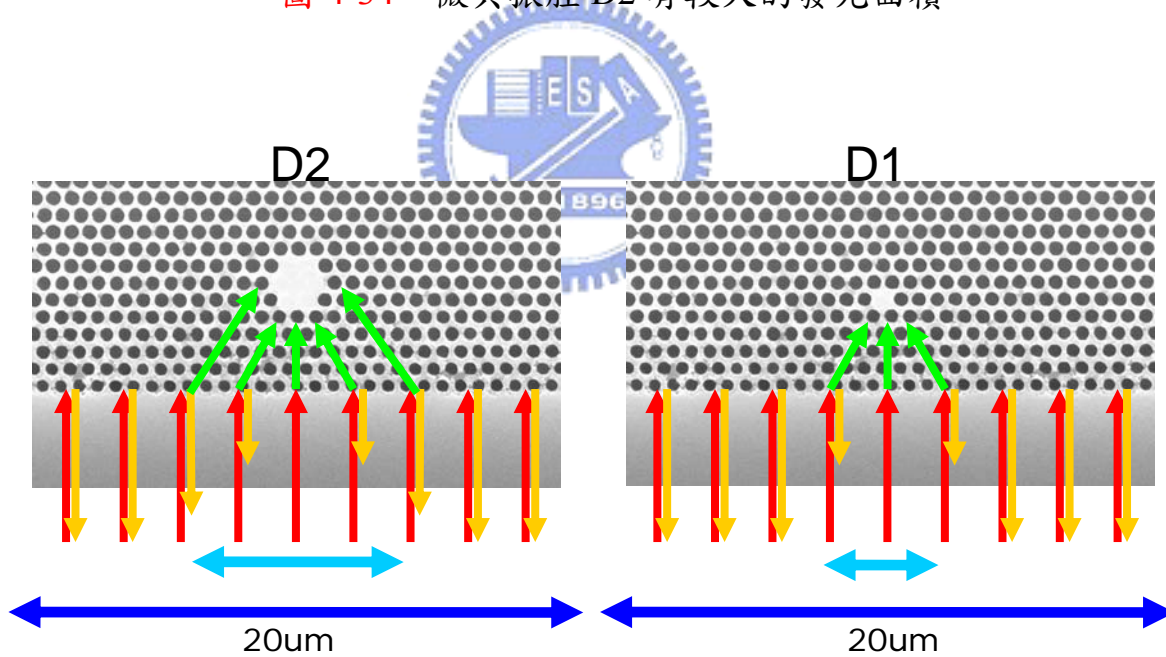


圖 4-35 微共振腔 D2 有較大的耦合寬度

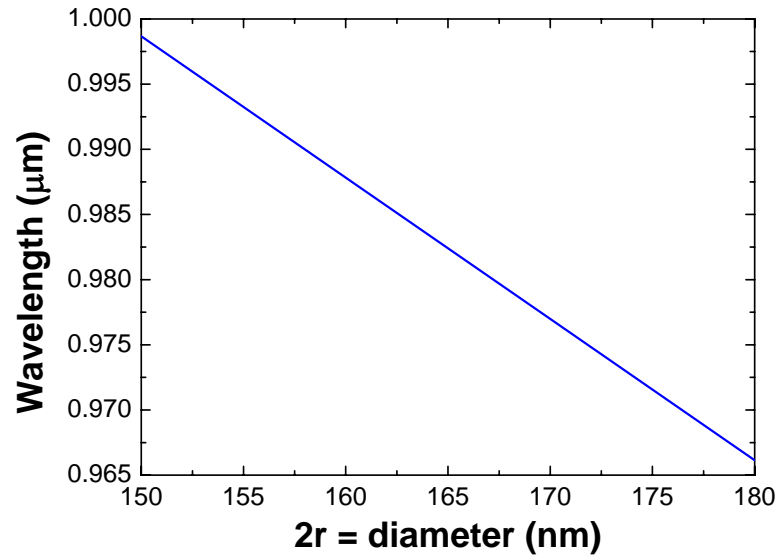


圖 4-36 模擬得到微共振腔的共振波長與其周圍光子晶體的直徑(2r)關係圖

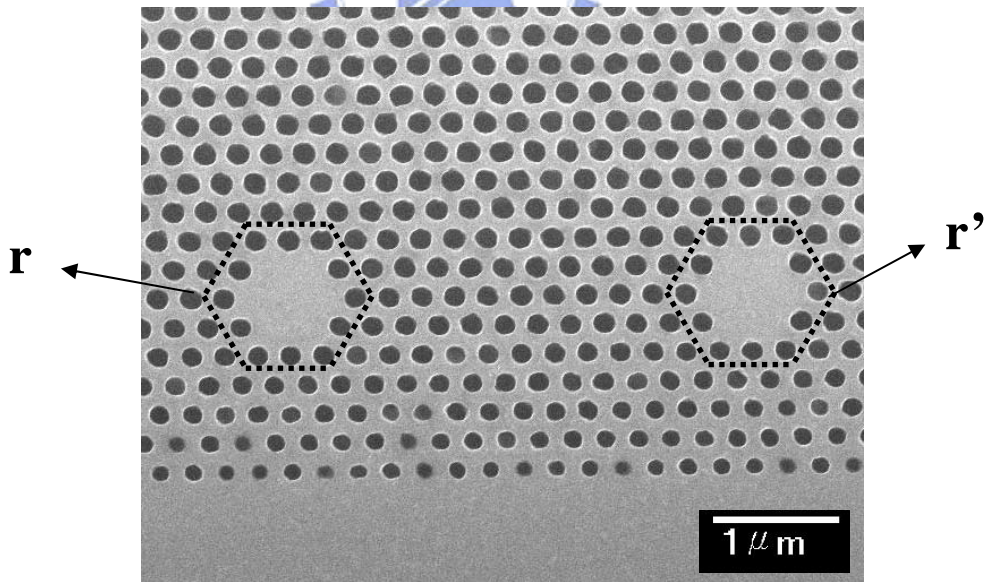


圖 4-37 雙波長輸出的光子晶體微共振腔雷射 SEM 上視圖

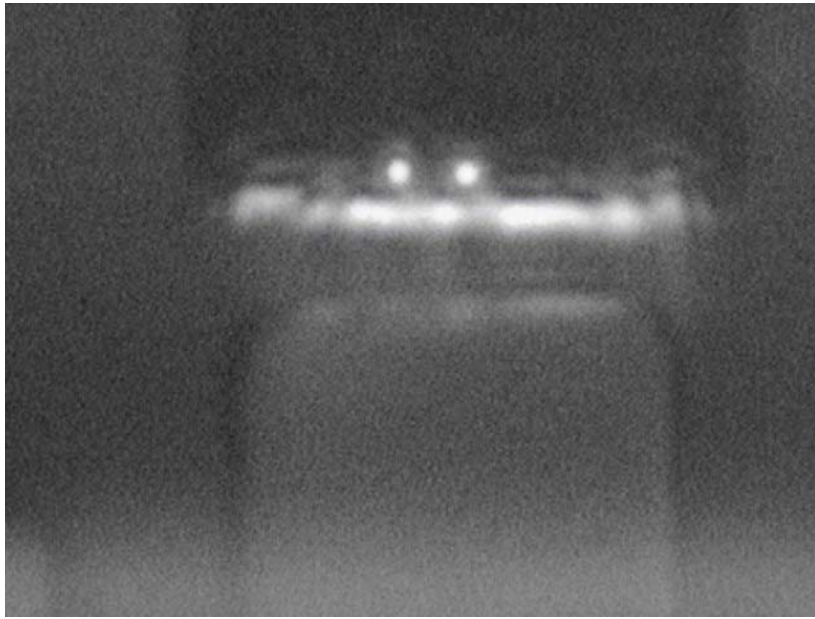


圖 4-38 元件操作在 23.5°C 驅動電流為 180mA 的近場圖形

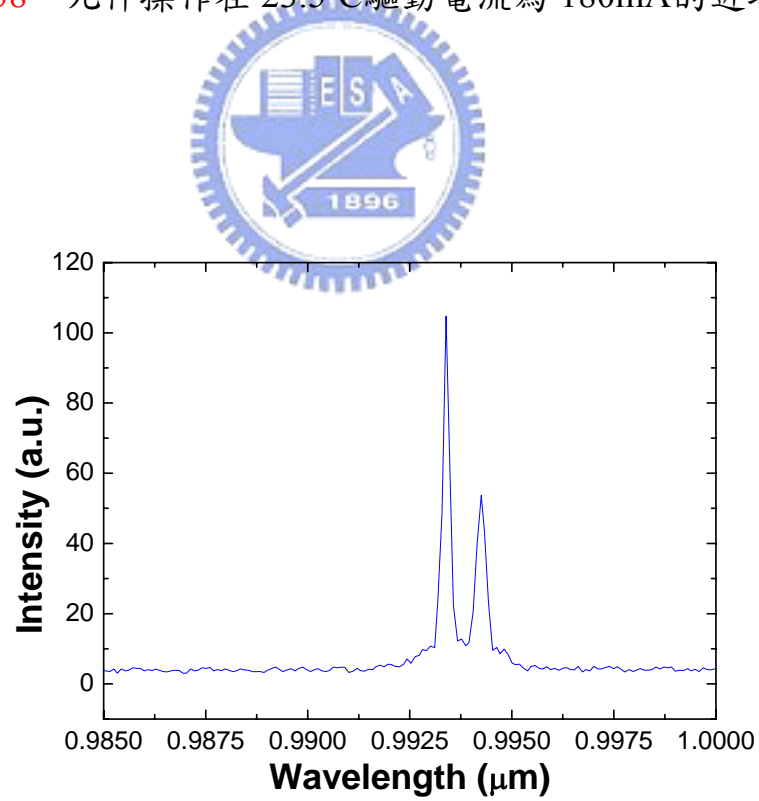


圖 4-39 雙波長輸出的光子晶體微共振腔雷射表面發光頻譜

第五章 結論

我們成功的把光子晶體微共振腔與邊射型雷射結合在一起，邊射型雷射當光源，打入光子晶體微共振腔，利用微共振腔的特性，製作出單模面射型雷射。並且比較不同的微共振腔結構 D1 與 D2，得知 D2 有較佳的 Q 值、較佳的輸出強度與較大的耦合效率。

藉由改變微共振腔的周圍的光子晶體孔洞半徑，可以選擇想要輸出的雷射波長，本研究也利用此特性，在光子晶體上同時製作出兩種不同空洞半徑所構成的微共振腔，製作出可以同時雙波長輸出的面射型雷射。



参考文献

- [1] E. Yablonovitch., Phys. Rev. Lett. 58, 2059(1987)
- [2] S. John, Phys. Rev. Lett. 58, 2486(1987)
- [3] E. Yablonovitch. Scientific American December, 7 (2001)
- [4] S. G. Johnson, S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos, Phys. Rev. B, vol. 60, 5751(1999)
- [5] John. D. Joannopoulos, Robert D. Meade, Joshua N. Winn, “Photonic crystals : molding the flow light”
- [6] O. Painter, J. Vučkovic´, and A. Scherer , J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 16, No. 2, 275–285 (1999)
- [7] Mitsuo Fukuda, “Optical Semiconductor Devices” ISBN: 0471149594 (1998)
- [8] Numai, Takahiro. “Fundamentals of semiconductor lasersTakahiro” ISBN: 0387217975 (2004)
- [9] Han-Youl Ryu, Se-Heon Kim, Hong-Gyu Park, and Yong-Hee Lee, J. A. Phys. Vol. 93, number 2 (2003)
- [10] T D Happ, M Kamp, F Klopff, J P Reithmaier and A Forchel, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, Semicond. Sci. Technol. 16 (2001) 227 – 232
- [11] Hong-Gyu Park, Jeong-Ki Hwang, Joon Huh, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 38, NO. 10, OCTOBER (2002)
- [12] Joon Huh, Jeong-Ki Hwang, Han-Youl Ryu, and Yong-Hee Lee, J. Appl. Phys., Vol. 92, No. 2, 654–659 (2002)
- [13] Yoshihiro Akahane, Takashi Asano, Bong-Shik Song & Susumu Noda, NATURE , VOL 425, 944–947 (2003)

[14] Han-Youl Ryu, Masaya Notomi, Yong-Hee Lee, Appl. Phys. Lett.,
Vol. 83, No. 21 (2003)



簡歷 (Vita)

姓名：楊宗樺(Yang, Tsung-Hua)

性別：男

出身年月日：民國 70 年 11 月 05 日

籍貫：台灣省高雄縣

學歷：

國立清華大學工程與系統科學系學士(89.9-93.6)

國立交通大學電子研究所碩士班(93.9-95-6)

碩士論文題目：

利用光子晶體微共振腔製作單模面射型雷射

Single Mode and Surface Emitting Laser

by PhC Micro-cavity