

光子晶體雷射之研究

學生：張至揚

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

我們成功地利用電子束微影系統與活性離子乾式蝕刻的技術在砷化鎵基板上製作出二維光子晶體，並且將二維光子晶體波導與邊射型雷射整合在一起，這樣的雷射結構具有單一縱模的特性，邊模抑制比可以達到14dB，並且在大範圍的電流驅動下都可以維持一定程度的邊模抑制比。

本論文提出共振腔耦合的模型來解釋雷射特性，我們將光子晶體雷射視為兩個共振腔的組合，一為光子晶體波導所形成的共振腔，一為Fabry-Perot共振腔，雷射的輸出頻譜是兩個共振腔耦合所產生的結果；除此之外，為了改善大面積雷射的橫向模態，我們利用光子晶體來降低雷射輸出端的反射率，藉由提高雷射的臨界增益來抑制高階橫向模態的產生。

文中將從光子晶體雷射的L-I曲線、輸出頻譜、近場發光圖形以及雷射的變溫特性等對光子晶體雷射做詳細的探討，並且與傳統大面積雷射做比較。

Studies of Photonic Crystal Lasers

Student: Chih-Yang Chang

Advisor: Dr. Chien-Ping Lee

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

Abstract

We have successfully fabricated 2-D photonic crystals on GaAs wafer with e-beam lithography and reactive ion etching(RIE). With this technique, 2-D photonic crystal waveguides were integrated with edge emitting lasers, which demonstrated single longitudinal mode with side mode suppression ratios (SMSR) of 14dB and could maintain such SMSR value over a broad injection current range.

In the thesis, we adopted coupled-cavity theory to explain experimental results of the photonic crystal laser. In this theory, the laser was treated as two cavities. One was the Fabry-Perot cavity and the other was the photonic crystal waveguide. The coupling of the two cavities results in the photonic crystal laser's spectrum. Moreover, with the proper design of the photonic crystals, the threshold gain of high order lateral modes was enhanced. Thus, high order lateral modes of the laser were inhibited and the near field pattern of the laser was improved.

We discussed experimental results of the photonic crystal laser through L-I curve, output spectrum, near field pattern, and the temperature dependence, and compared these properties with broad area lasers in this thesis.

誌謝

時光荏苒，短暫的碩士班生涯轉眼間已經告一個段落。兩年前甄試上電子研究所時，mbe 實驗室就是我的不二選擇，兩年後的今天，我慶幸自己能夠在這麼好的研境環境下完成碩士論文。與大家一起奮鬥的日子真的給了我很多全新的體驗與快樂的回憶。

論文的順利完成，首要感謝的就是李建平老師，老師豐富的學識與謙和的態度，總是讓我敬佩不已。在老師身上，我學習到身為一個領域的專家所應具備的基本涵養與求知熱忱。記得老師曾經跟我說過：我幫你們找到一片肥沃的大草原，能夠吃多少的草就是你們自己的造化。老師為實驗室爭取到最好的研究資源，並且給予我們最自由的研究空間，雖然研究過程難免碰到許多瓶頸與低潮，不過我著實地體會到其中的樂趣，也希望自己一直是老師心目中的”好羊”。於此致上最大之謝忱！

由衷感謝林國瑞學長這兩年來不吝惜的指導與支援，學長敏銳的思考與豐富的實作經驗屢屢帶領我突破實驗的難題，沒有您的幫助，我的論文不可能完成；感謝黃世傑學長在電子束微影與光子晶體理論上的協助；感謝李秉奇與林志昌學長在試片提供與實驗技巧上的幫忙；感謝工研院葉文勇博士、吳易座博士、顏璽軒學長在實驗儀器上的支援，謝謝你們！

小黑、小搏、小羅：你們是我碩士班生涯的好戰友，我們一起經歷研究生活的酸甜苦辣，雖然每個人專研的領域不盡相同，但一路上我們總是互相提攜與幫助，很榮幸能與你們這群能力優秀的同學一同學習。

大雄、楊小弟、阿福、卡緒：你們都是自動自發，認真做研究的好學弟。你們的活力為實驗室帶來許多歡樂的氣氛，祝福你們研究順利！

瑋儀：謝謝妳兩年來的相知相伴，每當我研究碰到低潮時，你的體貼與鼓勵總是給我繼續勇往直前的力量，謝謝妳！

最後一段留給我最敬愛的父母親，沒有你們就沒有今天的我，你們的諄諄教誨一直是我待人處世的圭臬。求學生涯暫告一段落，這一路走來我始終樂觀進取，認真不苟且，就是不想辜負你們對我的期望，我愛你們，也以你們為榮！

謹以此論文獻給所有關心我的師長朋友。

目錄

第一章 簡介.....	1
第二章 原理.....	3
2-1 光子晶體的概念.....	3
2-2 光子晶體的理論分析.....	4
2-3 二維光子晶體.....	7
2-4 二維光子晶體之相關應用.....	8
2-4-1 2-D photonic band-gap defect mode laser.....	8
2-4-2 Photonic crystal waveguide.....	9
2-4-3 Photonic crystal fiber.....	9
2-4-4 積體光學.....	10
2-5 半導體雷射基本概念.....	11
2-5-1 半導體雷射基本原理.....	11
2-5-2 臨界條件與縱向光模.....	11
2-5-3 光偱限因素.....	13
2-5-4 起始電流密度.....	13
2-5-5 差額量子效率.....	14
第三章 製程與量測.....	23
3-1 光子晶體製程.....	23
3-2 光子晶體雷射製程.....	24
3-2-1 量子井雷射磊晶結構.....	24
3-2-2 雷射製程.....	24
3-3 雷射特性量測系統.....	26

第四章 結果與討論.....	35
4-1 大面積雷射.....	35
4-2 光子晶體雷射.....	36
4-2-1 光子晶體圖形設計.....	36
4-2-2 雷射輸出特性.....	37
4-3 不同光子晶體結構之雷射特性分析.....	44
4-3-1 無大孔洞結構之光子晶體雷射.....	44
4-3-2 無線性缺陷之光子晶體雷射.....	46
4-3-3 無線性缺陷且無大孔洞結構之光子晶體雷射.....	46
第五章 結論與未來展望.....	74
參考文獻.....	76



圖 目 錄

- 圖 1-1 (a)電子色散關係 (b)光子色散關係
- 圖 2-1 Yablonovitch 及 Gmitter 發現的第一個光子能帶結構^[1]
- 圖 2-2 Yablonovitch等人改用非球形的”原子”來打破對稱性，獲得真正的絕對光能隙。^[3]
- 圖 2-3 一維、二維、三維光子晶體
- 圖 2-4 (a)二維 Square 光子晶體與其倒晶格
(b)二維Hexagonal光子晶體與其倒晶格^[4]
- 圖 2-5 二維光子晶體平板的各項參數^[4]
- 圖 2-6 TE 波示意圖
- 圖 2-7 TM 波示意圖
- 圖 2-8 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^[5]
- 圖 2-9 在介電常數 $\epsilon=12$ 的材料中，挖出hexagonal排列的無限深空氣孔洞之光子晶體能帶圖^[5]
- 圖 2-10 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^[5]
- 圖 2-11 在介電常數 $\epsilon=12$ 的材料中，挖出hexagonal排列的有限深空氣孔洞之光子晶體能帶圖^[5]
- 圖 2-12 Defect mode laser俯視圖^[6]
- 圖 2-13 Defect mode laser側視圖^[7]
- 圖 2-14 光子晶體波導俯視圖^[8]
- 圖 2-15 光子晶體光纖側視圖^[9]
- 圖 2-16 (a)傳統光纖導波原理(全反射)^[9]
圖 2-16 (b)光子晶體光纖導波原理(布拉格繞射)^[9]
- 圖 2-17 半導體雷射基本操作原理
- 圖 2-18 FP (Fabry-Perot) 共振腔示意圖
- 圖 3-1 PMMA 俯視圖
- 圖 3-2 PMMA 側視圖
- 圖 3-3 SiN 俯視圖
- 圖 3-4 SiN 側視圖
- 圖 3-5 GaAs 俯視圖
- 圖 3-6 GaAs 側視圖

- 圖 3-7 元件示意圖
- 圖 3-8 量子井雷射磊晶結構圖
- 圖 3-9 實際元件完成圖(一)
- 圖 3-10 實際元件完成圖(二)
- 圖 3-11 光子晶體雷射製程流程
- 圖 3-12 L-I 曲線量測系統圖
- 圖 3-13 近場光學量測系統圖
- 圖 3-14 (a)雷射輸出光譜量測系統圖
- 圖 3-14 (b)I-V 曲線量測系統圖
- 圖 4-1 大面積雷射 L-I 曲線圖
- 圖 4-2 大面積雷射輸出頻譜
- 圖 4-3 (a)大面積雷射近場發光圖形 @ $I=10\text{mA}$ 光強度 500 倍衰減
- 圖 4-3 (b)大面積雷射近場發光圖形 @ $I=60\text{mA}$ 光強度 500 倍衰減
- 圖 4-4 (a) L-I 曲線 v. s. 不同溫度
- 圖 4-4 (b) 臨界電流對不同溫度做圖
- 圖 4-5 元件簡圖
- 圖 4-6 實際元件俯視圖
- 圖 4-7 二維光子晶體能帶圖
- 圖 4-8 光子晶體雷射 L-I 曲線圖
- 圖 4-9 於自然劈裂面量得之光子晶體雷射輸出頻譜
- 圖 4-10 於光子晶體波導量得之光子晶體雷射輸出頻譜
- 圖 4-11 光子晶體雷射共振腔示意圖
- 圖 4-12 光子晶體雷射共振模態耦合示意圖
- 圖 4-13 共振模態之半高寬 Γ 與品質因素 Q 之關係
- 圖 4-14 無光子晶體之雷射示意圖
- 圖 4-15 無光子晶體之雷射輸出頻譜
- 圖 4-16 波長間距對不同共腔長度做圖
- 圖 4-17 利用光子晶體提高雷射臨界增益
- 圖 4-18 於光子晶體波導量得之光子晶體雷射近場發光圖形
@ $I=30\text{mA}$ 光強度 80 倍衰減
- 圖 4-19 (a)於光子晶體波導量得之光子晶體雷射近場發光圖形

@ $I=100\text{mA}$ 光強度 400 倍衰減

圖 4-19 (b)於光子晶體波導量得之光子晶體雷射近場發光圖形

 @ $I=130\text{mA}$ 光強度 400 倍衰減

圖 4-19 (c)於光子晶體波導量得之光子晶體雷射近場發光圖形

 @ $I=200\text{mA}$ 光強度 400 倍衰減

圖 4-20 (a)於自然劈裂面量得之光子晶體雷射近場發光圖形

 @ $I=50\text{mA}$ 光強度 400 倍衰減

圖 4-20 (b)於自然劈裂面量得之光子晶體雷射近場發光圖形

 @ $I=200\text{mA}$ 光強度 400 倍衰減

圖 4-21 光子晶體波導 FullWave/FTDT 模擬

圖 4-22 光子晶體雷射變溫 L-I 曲線圖

圖 4-23 臨界電流對不同溫度做圖

圖 4-24 光子晶體雷射變溫頻譜

圖 4-25 主峰波長對不同溫度做圖

圖 4-26 光子晶體雷射俯視圖



圖 4-27 光子晶體雷射 L-I 曲線圖

圖 4-28 光子晶體雷射脊狀波導深度

圖 4-29 光子晶體孔洞深度

圖 4-30 無大孔洞結構之光子晶體孔洞深度

圖 4-31 於自然劈裂面量到之光子晶體雷射輸出頻譜

圖 4-32 (a)於光子晶體波導量得之光子晶體雷射近場發光圖形

 @ $I=30\text{mA}$ 光強度 400 倍衰減

圖 4-32 (b)於光子晶體波導量得之光子晶體雷射近場發光圖形

 @ $I=80\text{mA}$ 光強度 400 倍衰減

圖 4-33 光子晶體雷射俯視圖 & 雷射 L-I 曲線圖

圖 4-34 無線性缺陷之光子晶體雷射輸出頻譜

圖 4-35 光子晶體雷射俯視圖 & 雷射 L-I 曲線圖

圖 4-36 無線性缺陷且無大孔洞結構之光子晶體雷射輸出頻譜