

# 國立交通大學

電子工程系

電子研究所碩士班

## 碩士論文

以乾式蝕刻鏡面製作

砷化銦量子點之邊射型雷射

Fabrication of

InAs quantum dot edge emitting lasers  
with dry etched mirror

研究生：王曉微

指導教授：林國瑞 教授

中華民國九十九年二月

以乾式蝕刻鏡面製作  
砷化銾量子點之邊射型雷射

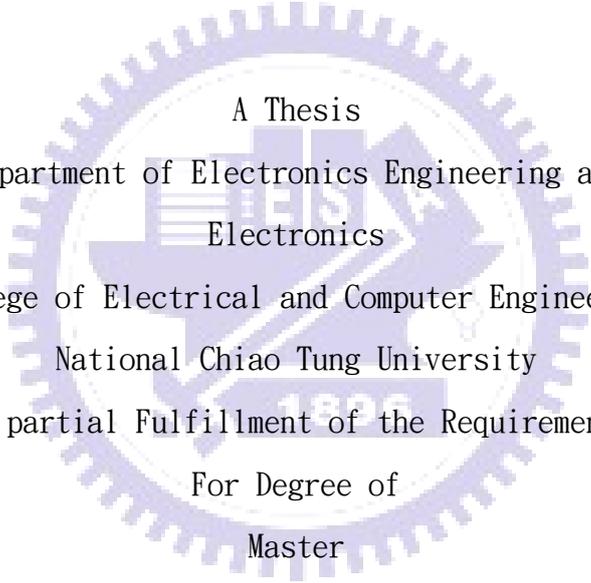
研究生：王曉微

Student : Hsiao-Wei Wang

指導教授：林國瑞

Advisor : Gray Lin

國立交通大學  
電子工程系電子研究所  
碩士論文



A Thesis  
Submitted to Department of Electronics Engineering and Institute of  
Electronics  
College of Electrical and Computer Engineering  
National Chiao Tung University  
In partial Fulfillment of the Requirements  
For Degree of  
Master  
in  
Electronics Engineering  
October 2010  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年二月

以乾式蝕刻鏡面製作  
砷化銦量子點之邊射型雷射

學生：王曉微

指導教授：林國瑞

國立交通大學  
電子工程學系 電子研究所碩士班

摘 要

本論文以乾式蝕刻鏡面製作砷化銦量子點之邊射型雷射進行研究。首先在製程方面，我們設計一套製程方式，透過電感耦合電漿蝕刻機蝕刻出垂直鏡面。在製作量子點雷射前，先以量子井雷射做為測試，證實此製程之可行性，接下來以 InAs/GaAs 材料的量子點取代量子井，成功地做出乾式蝕刻鏡面之量子點邊射型雷射。

接著在量測分析方面，針對乾式蝕刻鏡面邊射型雷射與傳統鏡面（自然劈裂）邊射型雷射做特性上的分析與比較。透過此雷射特性分析，且利用起始電流的比較可知此鏡面的平整程度，進而可在製程上做改善。最後透過加深蝕刻深度以及製程上的最佳化來改善鏡面，對於雷射特性有顯著改善。

Fabrication of  
InAs quantum dot edge emitting lasers  
with dry etched mirror

Student: Hsiao-Wei Wang

Advisors: Dr. Gray Lin

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

## Abstract

This thesis focus on fabrication of InAs quantum dot edge emitting lasers with dry etched mirror. First, we demonstrated a new process flow of edge emitting lasers with dry etched mirror formed by inductivity coupled plasma. Before fabrication of quantum dot edge emitting lasers, we used the laser structure of InGaAs quantum well to prove that the process is practical. Eventually, we make a success of quantum dot lasers with dry etched mirrors.

Then in measurement, we estimate the mirror loss of the dry etched mirror laser by comparing the characteristic curves of the etched mirror laser with those of a cleaved mirror laser. Finally, we improve the characteristics of dry etched mirror laser by increasing the etching depth with skilled process.

# 致 謝

首先要感謝我的指導教授林國瑞老師，謝謝您給我機會成為 MBE LAB 的一份子，我知道我一直表現的不如您預期，造成老師很多麻煩，但是真的很感激老師一直非常用心的指導，讓我可以有一個充實而完整的碩士生涯，接下來我也會謹記您的話，不斷努力。還要感謝一直給我許多鼓勵和關心的李建平老師以及林聖迪老師，讓我在沮喪的時候，重新拾起對研究的熱忱。也感謝在我迷失方向的時候，給我建議的鄭晃忠老師，更要謝謝啟發我對物理興趣的劉宗平老師以及管傑雄老師，多虧您們的教導，我才能順利進入交大電子所。

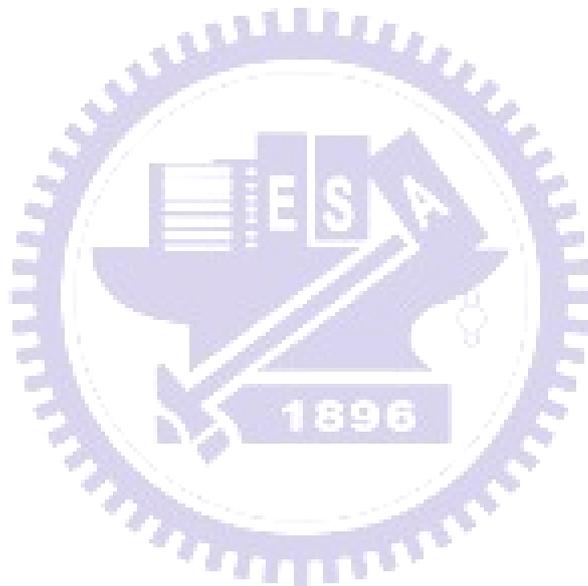
再來就是陪伴我度過許多日子的實驗室成員們，感謝實驗室的學長們，凌鴻緒、大鈞、潘建宏、林岳民、巫俠、游宏凱，你們總是給我很多鼓勵，你們的關心我都記在心裡；旭傑學長，謝謝你總是很有耐心的給我很多研究上的建議；小傅學長，我不會忘記你跟小豪很講義氣的和我一起徹夜做製程；浩天學長，感謝你雖然已經畢業，但還是常常關心我的研究情形；KB 學長，你總是帶給我很多歡樂，不要忘記我們的共通點喔！還要感謝和我一起打拚的同學們，陪伴我度過許多低潮的 Peace；總是很有耐心回答我一堆問題的皓皓，在我迷惘的時候，給我很多建議的宜靜；善解人意的 Queena；一天到晚被我電話騷擾的 ICP 管理者小豪，第一名寶座非你莫屬！以及在我失去方向的時候，陪我聊很多的俊仁；總是一起鍍  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ，無話不談的歪哥；真的很懷念跟你們一起做實驗、一起出遊的日子。還有讓我做實驗一點都不孤單的學弟們，很搞笑但卻能一眼就看穿我心事的柏存；給我很多協助的庭聿；非常會做筆記的柏仰；每次邀約都要拒絕我，可是口試當天幫了我大忙的嘉邑，有了你們，真的多了很多歡笑聲。

在新竹這原本陌生的地方，也多虧了我大學同學們，讓我在陌生的地方找到熟悉的身影，永遠都是好姊妹的阿姿；可以一起分享喜怒哀樂的勇叡；超級麻吉的阿祐；有你們的陪伴，我真的很開心，謝謝你們。以及陪我走過入學考試的小華，多虧你，我才有機會進入交大。

最後要特別感謝一直陪在我身邊鼓勵我的敬堯，有了你，讓我在沮喪時，有了依靠的肩膀；低潮時，也能夠馬上重拾笑容。而最重要的，就是給我最大支持與鼓

勵的父母親，您們的辛苦，女兒都看在眼裡，也許過去我還沒有足夠能力得以回報，但現在起我會為您們努力，就像您們為了給我最好的學習環境而努力一樣，最後僅以本論文表達我最深的感謝。

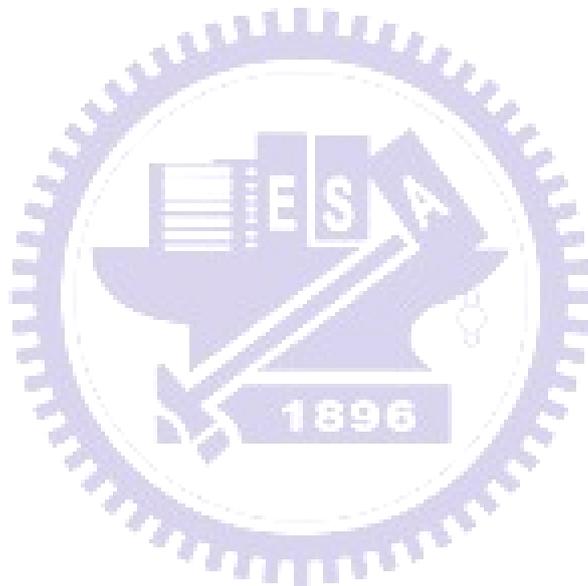
回首碩士兩年半的生活，經歷許多起伏，讓我明白許多道理，我想這會成為我心中一段難以忘懷的美麗回憶，由衷感謝一直以來陪伴我渡過這段時光的每一個人。



# Contents

摘要.....	i
Abstract.....	ii
致謝.....	iii
Contents.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	ix
Chapter 1 緒論.....	1
Chapter 2 基礎原理.....	2
2.1 理想量子系統.....	2
2.2 半導體雷射.....	4
2.2.1 雷射臨界條件.....	4
2.2.2 臨界電流與光增益.....	5
2.2.3 乾式蝕刻鏡面損耗.....	7
2.2.4 量子點雷射.....	8
2.3 蝕刻基礎.....	9
Chapter 3 元件製程與量測系統.....	11
3.1 ICP 蝕刻機制.....	11
3.2 ICP 參數測定.....	12
3.3 製程流程.....	16
3.4 製程步驟.....	19
3.5 元件量測系統.....	24
Chapter 4 實驗結果與討論.....	27
4.1 晶片結構分析.....	27
4.2 實驗結果.....	30
4.2.1 量子井雷射.....	30
4.2.2 量子點雷射.....	32
4.2.3 Far-field pattern.....	42

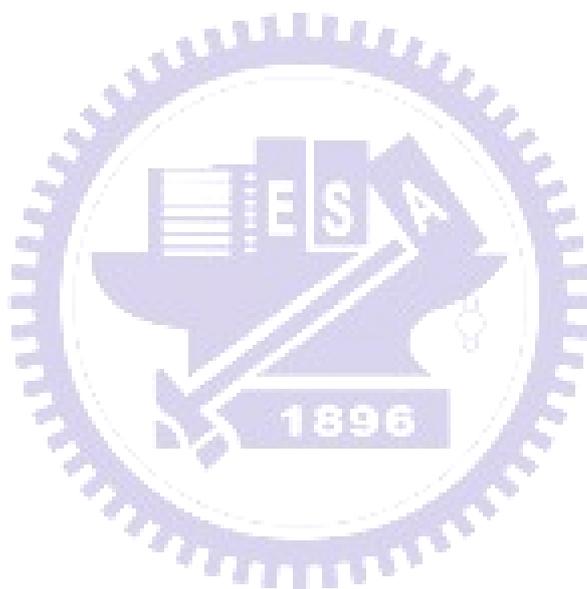
Chapter 5 結論與未來展望..... 44  
Reference..... 45  
簡歷(Vita)..... 47



## 圖目錄

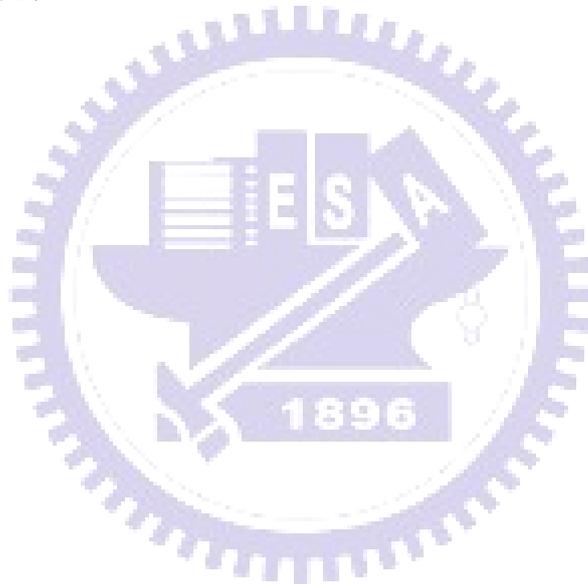
圖 2-1 各種理想量子系統所對應的能態分佈 .....	3
圖 2-2 二能階原子模型中光和原子三種交互作用 .....	4
圖 2-3 Fabry-Perot Cavity .....	6
圖 3-1 ICP RIE 結構示意圖 .....	12
圖 3-2 鏡面的垂直度示意圖 .....	13
圖 3-3 測試結果 .....	14
圖 3-4 測試結果 .....	15
圖 3-5 Dry etched mirror 量測示意圖 .....	24
圖 3-6 L-I-V 量測系統 .....	25
圖 3-7 光譜量測系統 .....	25
圖 3-8 FFP 量測系統 .....	26
圖 4-1 QW LM 4803 量子井結構 .....	27
圖 4-2 QW LM 4903 量子點結構 .....	28
圖 4-3 QD LM 4917 量子點結構 .....	29
圖 4-4 QW SEM 剖面圖 .....	30
圖 4-5 L-I-V 特性曲線 .....	31
圖 4-6 LM4803 光頻譜圖 .....	31
圖 4-7 LM4903 SEM 圖 .....	32
圖 4-8 LM4903 L-I-V 特性曲線 .....	33
圖 4-9 LM4903 光頻譜圖 .....	34
圖 4-10 LM4903 L-I-V 特性曲線比較 .....	34
圖 4-11 LM4917 L2000_10 $\mu\text{m}$ SEM 圖 .....	35
圖 4-12 LM4917 L2000_10 $\mu\text{m}$ L-I-V 特性曲線 .....	36
圖 4-13 LM4917 L2000_10 $\mu\text{m}$ 光頻譜圖 .....	37
圖 4-14 LM4917 L2000_20 $\mu\text{m}$ SEM 圖 .....	37
圖 4-15 LM4917 L2000_20 $\mu\text{m}$ L-I-V 特性曲線 .....	38
圖 4-16 LM4917 L2000_20 $\mu\text{m}$ 光頻譜圖 .....	39

圖 4-17 LM4917 L2000_50 $\mu\text{m}$ SEM 圖 .....	39
圖 4-18 LM4917 L2000_50 $\mu\text{m}$ L-I-V 特性曲線 .....	40
圖 4-19 LM4917 L2000_50 $\mu\text{m}$ 光頻譜圖 .....	40
圖 4-20 LM4917 L-I-V 特性曲線比較 .....	41
圖 4-21 LM4917 L2000_20 $\mu\text{m}$ cleaved far-field pattern .....	42
圖 4-22 LM4917 L2000_20 $\mu\text{m}$ cleaved far-field pattern 角度分析 .....	42
圖 4-23 LM4917 L2000_20 $\mu\text{m}$ dry etched far-field pattern .....	43



# 表目錄

表 2-1 製程方式特性比較.....	10
表 3-1 ICP 蝕刻使用條件.....	23
表 4-1 LM4803 自然劈裂面與乾式蝕刻鏡面特性之比較.....	31
表 4-2 LM4803 自然劈裂面與乾式蝕刻鏡面特性之比較.....	35
表 4-3 LM4917 L2000_10 $\mu\text{m}$ 基本雷射特性.....	36
表 4-4 LM4917 L2000_20 $\mu\text{m}$ 基本雷射特性.....	38
表 4-5 LM4917 基本雷射特性.....	41
表 5-1 雷射特性比較表.....	44



# Chapter 1 緒論

隨著科技快速發展，光電整合元件也趨向輕小化，而乾式蝕刻技術運用於光電元件上正符合此需求。在半導體雷射的製作上，通常是以自然劈裂面的方式，劈列出雷射共振腔反射鏡面，而結合乾式蝕刻的技術，將半導體雷射運用乾式蝕刻技術蝕刻出垂直平整雷射鏡面，進而取代傳統之自然劈裂面，即可成功創造出光電整合元件。首先在 1997 年，馬里蘭大學利用電感耦合電漿式蝕刻機，製作出乾式蝕刻鏡面量子井結構邊射型雷射 [1]；接著在 2001 年，Crete 大學製作出乾式射刻鏡面雷射光電整合元件 [2]。

選定以量子點當作主動層的半導體雷射，稱之量子點雷射，則是因為在此 (Quantum Dot, QD) 結構中，因為電子電洞離散的能態分佈的影響，使得應用在半導體雷射的主動層則有以下特性如：低起始電流密度、高特徵溫度(低溫度敏感性)等特性，而又以砷化鎵(GaAs)為基板成長砷化銦(InAs)或砷化鎵銦(InGaAs)量子點雷射可操作適合光纖通訊的  $1.3\ \mu\text{m}$  波長範圍，使得可以用較便宜的方式取代以磷化銦(InP)為基底的半導體雷射。本論文主要焦點為砷化銦量子點結構邊射型雷射製程以及元件特性量測，接下來將詳細論述此雷射之原理及製程流程。

## Chapter 2 基礎原理

### 2.1 理想量子系統

半導體中，由於電子電洞的等效質量變小以及較大的介電常數影響，電子電洞的費米波長較長，使得我們可以在與原子相對較大的尺度中(nm, 奈米)觀察到量子效應。

不同的量子化結構，對於能態密度(DOS)亦有顯著影響，如圖 2-1 指出不同結構所對應之能態分佈。在理想系統中，當電子電洞被較高的位能障所限制，材料被無窮高的位能障所包圍，能態密度(density of states, DOS)分佈則是根據特定能量具有的能態數目，定義為：

$$\rho(E) = (1/V)(dN/dE) \quad (2.1)$$

以下列出各種理想量子系統中對應的能量與能態密度函數：

塊材(Bulk)

$$E(\vec{k}) = E(k_x, k_y, k_z) = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) + E_0 \quad (2.2)$$

$$\rho^{3D}(E) = \frac{(2m^*/\hbar^2)^{3/2}}{2\pi^2} (E - E_0)^{1/2} \quad (2.3)$$

量子井(Quantum Well)

$$E(\vec{k}) = E_n(k_x, k_y) = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[ k_x^2 + k_y^2 + \left( \frac{n\pi}{L_z} \right)^2 \right] + E_0 \quad (2.4)$$

$$\rho^{2D}(E) = \frac{m^*}{\pi \hbar^2 L_z} \sum_n H(E - E_n) \quad (2.5)$$

量子線(Quantum Wire)

$$E(\vec{k}) = E_{m,n}(k_x) = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[ k_x^2 + \left( \frac{m\pi}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{L_z} \right)^2 \right] + E_0 \quad (2.6)$$

$$\rho^{1D}(E) = \frac{n_{QWire} \sqrt{2m^*}}{\pi \hbar} \sum_n \sum_m (E - E_{m,n})^{-1/2} \quad (2.7)$$

量子點(Quantum Dot)

$$E(\vec{k}) = E_{l,m,n} = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left[ \left( \frac{l\pi}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{m\pi}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{L_z} \right)^2 \right] + E_0 \quad (2.8)$$

$$\rho^{0D}(E) = 2n_{QD} \sum_n \sum_m \sum_l \delta(E - E_{l,m,n}) \quad (2.9)$$

$E_0$  為所屬能帶邊緣的能量， $H(x)$  為步階函數 ( $H(x)=1, x \geq 0$  and  $H(x)=0, x < 0$ )，

$n_{QWire}$  為量子線的面密度， $n_{QD}$  為量子點的體密度， $m^*$  為有效質量， $\hbar$  為蒲朗克常數，

$L_x, L_y, L_z$  為 X Y Z 方向之長度， $k_x, k_y, k_z$  為 X Y Z 方向之波數。

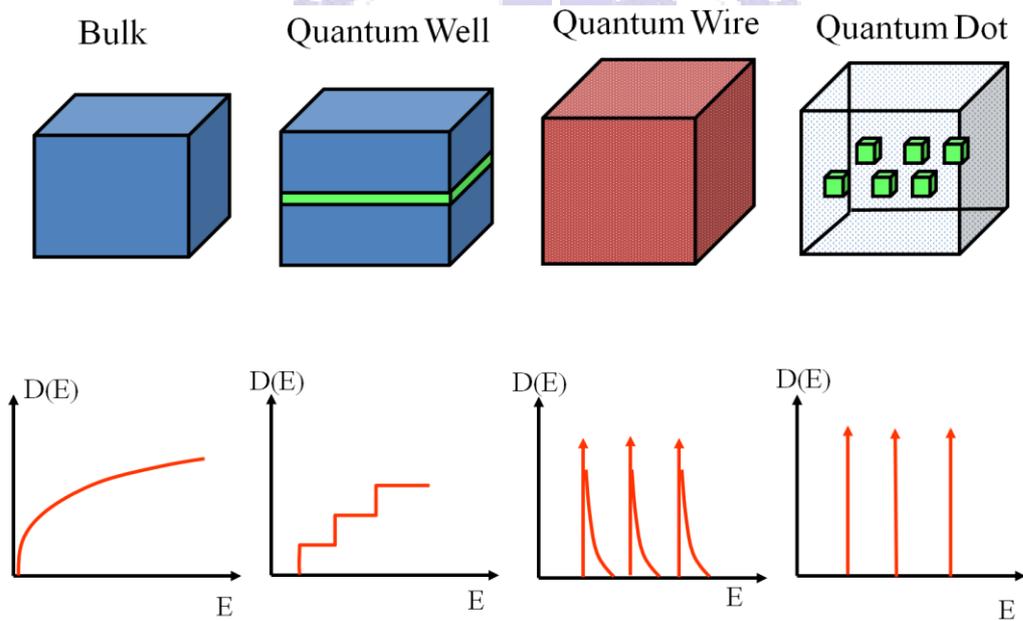


圖 2-1 各種理想量子系統所對應的能態分佈

## 2.2 半導體雷射

半導體雷射為一種藉由輻射的激發放射的光放大(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)，接下來將詳述此雷射之機制與原理。

### 2.2.1 雷射臨界條件

首先根據 Einstein 模型，有三種光與電子相互作用的形式，分別是自發放射(spontaneous emission)，受激放射(stimulated emission)，與受激吸收(stimulated absorption) [1]。如圖 2-2 所示

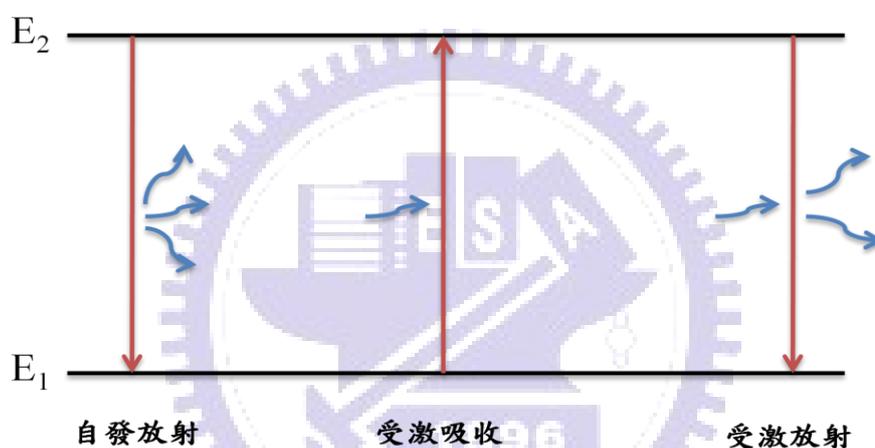


圖 2-2 二能階原子模型中光和原子三種交互作用

其中自發放射只要有電子位於激發態能階( $E_2$ )，這些電子就會放出光子回到基態能階( $E_1$ )；而位於  $E_1$  之電子若受到入射光的激發而向上躍遷至  $E_2$ ，此過程則為受激吸收；最後一種則是受激放射，此過程為位於  $E_2$  的電子受到入射光的激發而躍遷回  $E_1$ ，並放出光，即為光子放射，是電子從導帶中佔據的態到價帶中的空態(電洞)能量傳輸的結果(電子電洞復合)。而所對應到受激放射的載子應符合在導電帶中具有電子存在，同時在價電帶中須有一個空隙(電洞)讓電子向下躍遷填入，所以其復合速率(recombination rate)及可提供的光增益(optical gain)與電子電洞態佔據的機率和態數目有關。則其激發放射速率可表示成

$$R_{st}(E_{12}) \propto f_2 - f_1 \quad (2.10)$$

$f_2$  為能態  $E_2$  被電子佔據的機率， $f_1$  為能態  $E_1$  被電子佔據的機率。定義如下：

$$f_2 = \left[ 1 + \exp\left(\frac{E_2 - E_{fc}}{k_B T}\right) \right]^{-1} \quad (2.11)$$

$$f_1 = \left[ 1 + \exp\left(\frac{E_1 - E_{fv}}{k_B T}\right) \right]^{-1} \quad (2.12)$$

由(2.10)可知，淨受激放射速率受  $f_2 - f_1$  影響，其值可分別討論如下：

- (1)  $R_{st} > 0$ ，放射激發速率為正值，表現出增益現象。
- (2)  $R_{st} = 0$ ，此時光不會放大，也不會被吸收，呈現透明狀態，可視增益為零，及所對應的光子由吸收轉為增益，故稱  $E_{fc} - E_{fv} = E_1 - E_2$  時為達到透明條件 (transparency condition)，對應此時所注入的電流密度稱為透明電流密度  $J_{tr}$  (transparency current density)。
- (3)  $R_{st} < 0$ ，單純表現出光吸收的現象。

由以上可知，半導體的增益大小是注入載子濃度的函數，或與輸入電流有關，所以我們亦可藉由輸入半導體的電流大小來控制其光放大的能力。

## 2.2.2 臨界電流與光增益

首先由一簡單的 FP(Fabry-Perot) 共振腔模型，如圖 2-3 所示，假設雷射光在共振腔主動層來回傳遞，共振腔與主動層的長度為  $L$ ，共振腔的兩個反射鏡之反射率皆為  $R$ ，雷射光在行進時主動層的增益為  $\gamma$ ，內部損耗為  $\alpha_i$ ，假設起始點 A 之光強  $I_0$ ，而當光由 A 點行進至 B 點時經過  $L$  長度之後，B 點光強度可表為  $I_1 = I_0 \cdot e^{(g-\alpha_i)L}$ ，接著遇到反射率為  $r_2$  鏡面，則 C 點光強度可表示為  $I_2 = r_2 \cdot I_0 \cdot e^{(g-\alpha_i)L}$ ，光繼續由 C 點行進至 D 點，則再經過了  $L$  長度之後，D 點光強度可表示為  $I_3 = r_2 \cdot I_0 \cdot e^{(g-\alpha_i)2L}$ ，接著在 D 點的光遇到反射率  $r_2$  鏡面，光再度反射回 A 點，此時光強度為  $I = r_1 \cdot r_2 \cdot I_0 \cdot e^{(g-\alpha_i)2L}$ ，則當  $I = I_0$  時，才會達到起振條件，即  $r_1 \cdot r_2 \cdot e^{(g-\alpha_i)2L} = 1$

，不考慮光侷限因子(optical confinement factor,  $\Gamma$ )可得臨界增益(threshold gain)  $g_{th}$  為：

$$g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) = \alpha_i + \alpha_m \quad (2.13)$$

$\alpha_m$  = mirror loss  $\alpha_i$  為 internal loss

mirror loss 即光通過鏡面時，鏡面對光所造成的損失，鏡面損失與雷射共振腔長度、GaAs 鏡面反射率有關，關係如下

$$\alpha_m = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad (2.14)$$

Internal loss 則是由於在光在內部傳遞時，傳遞過程中所造成之損耗，而此時所注入的電流密度稱為臨界電流密度  $J_{th}$  (threshold current density)。

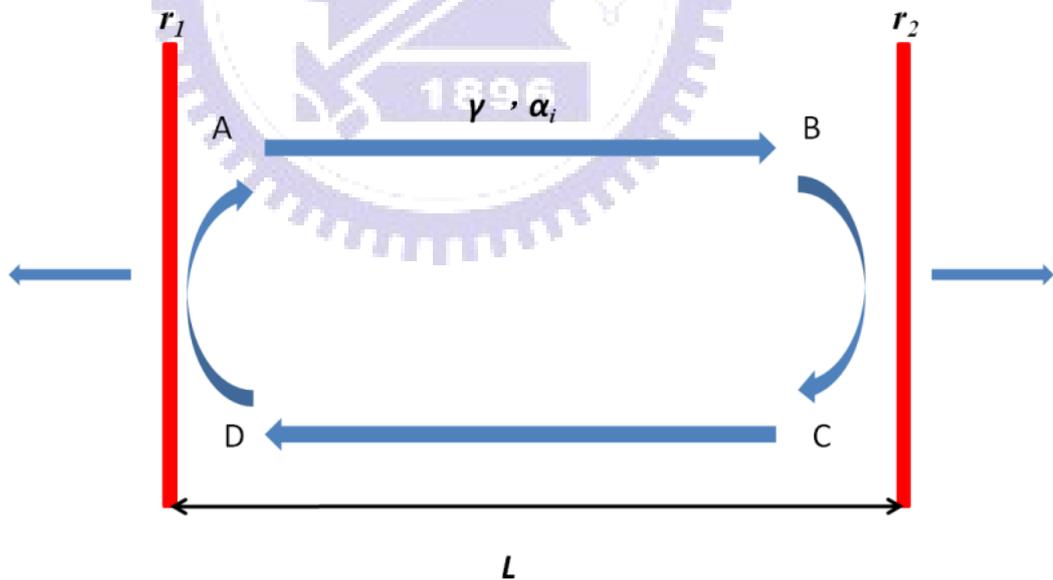


圖 2-3 Fabry-Perot Cavity

### 2.2.3 乾式蝕刻鏡面損耗

半導體的增益頻譜隨著注入的載子濃度增加而逐漸變大，而當增益開始要大於零時稱為透明狀態，此時的載子濃度被稱為透明載子濃度  $n_{tr}$ ，而當注入的濃度大於  $n_{tr}$ ，且在半導體雷射的操作之下，此時的增益值  $G$  與載子濃度  $n$  的關係可近似成  $G=a(n-n_{tr})$ ； $a$  為一常數，而由此式可推知增益值與通入電流密度  $J$  的關係如下  $G \propto (J-J_{tr})$ ；而同樣的在起始電流密度  $J_{th}$  與增益值  $G$  也有以下關係

$$G_{th} \propto (J_{th}-J_{tr})$$

(2.15)

接下來假設相同條件下，自然劈裂面之雷射起始電流為  $J_{th(c)}$ ；乾式蝕刻鏡面雷射起始電流為  $J_{th(d)}$ ，鏡面損耗為  $\alpha_{m(d)}$ ，此時  $J_{tr}$  與  $J_{th(c)}$ 、 $J_{th(d)}$  有(2.4)式、(2.5)式之關係

$$J_{tr} = \beta J_{th(c)} \quad (2.16)$$

$$J_{th(d)} = \gamma J_{th(c)} \quad (2.17)$$

將(2.16)(2.17)帶入式(2.15)可得(2.18)(2.19)，

$$G_{th(c)} \propto (1-\beta) J_{th(c)} \quad (2.18)$$

$$G_{th(d)} \propto (\gamma - \beta) J_{th(c)} \quad (2.19)$$

將(2.18)(2.19)兩式相除，可得式(2.20)

$$G_{th(d)} \doteq \frac{(\gamma - \beta)}{(1 - \beta)} G_{th(c)} \quad (2.20)$$

最後由(2.8)之結果可推知乾式蝕刻鏡面之鏡面損耗  $\alpha_{m(d)}$

$$\alpha_{m(d)} \doteq \frac{(\gamma - \beta)}{(1 - \beta)} G_{th(c)} - \alpha_I \quad (2.21)$$

## 2.2.4 量子點雷射

目前量子點雷射多採 SK(Stranski-Krastanov)模式自聚性(self-assembled)量子點成長，此成長是發生晶格數有很高的不匹配的兩材料間，晶格的不匹配會使磊晶受到張力，剛開始會以層狀方式長晶，若磊晶厚度高於張力所能承受的臨界厚度，薄膜就會破裂而生缺陷。而 SK 模式自聚性量子點成長，其特點就是在薄膜破裂前，島狀物剛形成時，即停止成長磊晶，這樣可以得到無缺陷的量子點，亦又較佳光電特性。本實驗是使用分子束磊晶方式，長成 InAs/GaAs 自聚性量子點。

由於量子點能階呈現不連續分佈，即能態密度成 delta function 分佈[1]，所以在特定能態時可以有很大的復合機率，所以使量子點雷射有較低的起始電流[3]與較高的特徵溫度 [4、5]，但也因為飽和增益較低的特性，所以較不易在基態發光，而通常為了使量子點可在基態產生雷射，所以量子點雷射的共振腔通常都比量子井雷射來得長，減少鏡面的損失。

由式(2.13)可知，當增益可克服內部損耗與鏡面損耗時，則雷射可發生，在量子點雷射中，基態的飽和增益  $g_{sat}^{GS}$  較低，當  $g_{sat}^{GS} < g_{th}$  時，則基態無法達到雷射。相較於激發態，由於激發態飽和增益值  $g_{sat}^{ES}$  較高，約為基態的 2~3 倍，在大部分的情況下，隨著注入載子增多，激發態仍可克服損耗達到雷射臨界條件。

理想上量子點雷射在穩態的情況下，隨著注入電流增大，有三種情況：

1.  $g_{sat}^{GS} \gg g_{th}$ ，GS 先 lasing，ES 在很高的電流下才會出現
2.  $g_{sat}^{GS} > g_{th}$ ，GS 先 lasing，接著 GS 很快飽和而 ES 也開始 lasing
3.  $g_{sat}^{GS} < g_{th}$ ，GS 增益無法克服損耗，ES lasing

## 2.3 蝕刻基礎

蝕刻是一種移除晶圓表面的材料以達 IC 設計製程需求的製程。蝕刻製程可分兩種；分別為圖案化蝕刻以及全區蝕刻，在此我們主要探討圖案化蝕刻。蝕刻方式又可分為化學蝕刻、物理蝕刻以及反應式離子蝕刻[6]。

在蝕刻基礎方面首先介紹蝕刻速率

(1)蝕刻速率(Etch Rate)是指在蝕刻製程中物質被移除的速率，定義如下

$$\text{Etch Rate(ER)} = \frac{\text{Etch Depth}}{\text{Etch Time}}$$

(2)選擇性(Selectivity)，圖案性蝕刻通常會涉及三種材料：光阻、欲蝕刻之薄膜以及基板。而這三種材料受到蝕刻的影響所造成不同材料間之蝕刻速率，就是我們所說之選擇性。選擇性指的是不同材料間蝕刻的比率，定義如下

$$\text{Selectivity(S)} = \frac{\text{ER}_1}{\text{ER}_2}$$

(3)輪廓(Profile)，在此最重要的特徵就是蝕刻輪廓，將會影響接下來的蝕刻製程，以此論文所用之光阻以及  $\text{Si}_3\text{N}_4$  而言，光阻及  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的蝕刻輪廓將會嚴重影響接下來 GaAs 鏡面蝕刻的良率，若在此製程時蝕刻輪廓有過蝕刻及不平整情形，在接下來的 GaAs 便無法有最佳蝕刻鏡面，而蝕刻輪廓最主要是由掃描式電子顯微鏡(SEM)來檢視。在第三章將有詳細 SEM 圖來檢視實際蝕刻輪廓。

接下來將分別介紹化學蝕刻、物理蝕刻、反應式離子蝕刻基本機制。

(1)化學蝕刻，純化學蝕刻包括濕式蝕刻和遙控電漿光阻剝落。純化學蝕刻中沒有物理轟擊，只借由化學反應來移除物質。純化學蝕刻速率通常較高，而具有等向性蝕刻輪廓(Isotropic Etch Profile)因此當圖形尺寸較小(通常約為 3 微米以下)時，就使用純化學蝕刻效果較差，但具有較好的選擇性，所以常用於剝除製程上。如剝除光阻、氧化層等。

(2)物理蝕刻，純物理蝕刻為一種轟擊蝕刻，例如氬轟擊，材料受到氬離子轟擊之後從表面脫離，但純物理蝕刻通常速率較低，且選擇性較低，但由於具有非等向性

蝕刻(Anisotropic Etch Profile)的特性，所以可朝垂直方向蝕刻。

(3)反應性離子蝕刻(Reactive Ion Etch, RIE)，在此製程中離子不一定有反應性，離子多半用來輔助蝕刻，以使用  $XeF_2$  氣流以及氫離子的組合為例，氫離子來增加蝕刻轟擊，因惰性原子的氫離子在化學上不會起反應，但是氫離子的轟擊可打斷表面戲園子的化學鍵結而形成懸浮鍵。在表面上帶有懸浮鍵的矽原子比鍵結沒有斷裂的矽原子更易於與氟自由基形成四氟化矽。又由於離子轟擊以垂直方向為主，因此具有等向性蝕刻特性，且在化學鍵結被打斷的情況下，亦可有較高的蝕刻速率以及較高選擇性。表 2-1 為以上三種製程主要比較。

	化學性蝕刻	反應性離子蝕刻	物理性蝕刻
蝕刻率	較高	高，可控制	較低
選擇比	較佳	尚可，可控制	較差
蝕刻輪廓	等向性	非等向性，可控制	非等向性

表 2-1 製程方式特性比較

## Chapter 3 元件製程與量測系統

### 3.1 ICP 蝕刻機制

首先介紹在電漿蝕刻的機制。第一步將蝕刻氣體注入真空反應室當中。當壓力趨於穩定後再利用射頻功率(RF)產生輝光放電的電漿。部分蝕刻氣體在受到高速電子的撞擊後會分解而產生自由基，而在離子轟擊的幫助下，自由基會與表面的原子或分子產生反應，並形成氣態的副產品，進而被帶離晶圓表面從反應室排出。

在感應耦合電漿反應室離子蝕刻ICP(Inductively coupled plasma)RIE[7][8]機制下主要運用化學性蝕刻加上物理性蝕刻，以達高蝕刻速率以及高選擇性，且具有非等向性蝕刻的特型。反應室有兩個RF功率來源，一個為電漿源RF，主要是使其在低壓時產生高密度電漿，另一個稱為偏壓RF(Bias RF)，主要用以控制直流偏壓以及離子轟擊的能量。再利用電磁感應產生之電場，加熱電漿電子，以應游離反應所需，可增加電漿解離能力。如圖3-1所示，ICP power即為電漿源RF，可產生交流電流，提供電磁感應所需之時變(交流)磁場，其中線圈置於真空介電窗(dielectric window)外，流經線圈之RF電流，產生環繞電流方向的時變磁場，此磁場穿透介電窗，於電漿腔中感應產生一與RF電流反向之電場，此電場加速電子並感應形成電漿電流。使電漿增加其在反應室內部碰撞的機率，進而可增加解離率，而下方所通入之He氣體，則是為防止載盤過熱，用以降低載盤溫度，在此機制下，通入所需氣體，點燃電漿即可進行蝕刻。而本論文所使用之機台為三五族化合物半導體元件之電感耦合電漿蝕刻機(ICP/RIE System for III-V Compound Semiconductor Device Fabrication)，蝕刻GaAs之氣體為SiCl<sub>4</sub>以及Ar，詳細蝕刻過程將在下一張節作介紹。

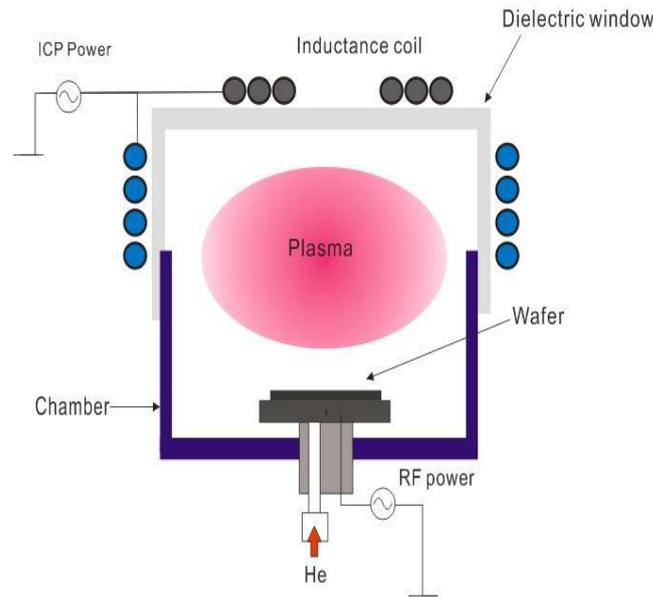
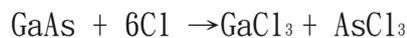


圖 3-1 ICP RIE 結構示意圖

## 3.2 ICP 參數測定

由上節可知 ICP 基本蝕刻方式，接下來在本節中主要以改變不同的 ICP 參數以達到最佳乾式蝕刻鏡面[7-13]。在參數測定方面，影響蝕刻結果的因素有很多；而在鏡面要求方面，最重要的部分即為鏡面之平整度與垂直度。首先，在此我們所蝕刻之晶片成分為 GaAs/InGaAs，蝕刻氣體為  $\text{SiCl}_4/\text{Ar}$ 。

GaAs 蝕刻化學式如下



此過程中會產生  $\text{GaCl}_3$  與  $\text{AsCl}_3$  之氯化沉積物，通常為了移除  $\text{GaCl}_3$  等氯化沈積物，會將晶片表面的溫度通常加熱至此蝕刻活化能，但操作溫度會影響蝕刻表面的粗糙度，除了溫度的提升對  $\text{GaCl}_3$  移除有幫助外，搭配離子強化反應蝕刻 ( $\text{Ar}^+$ )，加強非等向性蝕刻，具稀釋作用，可增加電漿穩定性，亦可有效移除  $\text{GaCl}_3$ ，而所需考慮的是，離子轟擊所引起晶片表面損傷的問題。但  $\text{SiCl}_4$  所提供之 Cl 原子，亦會生成  $\text{SiCl}_x$  原子團而形成聚合物以保護側壁的蝕刻，以上綜合之結果即可得較佳之鏡

面蝕刻。然而，除了調整各氣體之比率外，光罩之成分亦可能影響製程過程中之微影過程或是影響蝕刻氣體間之平衡關係。

首先介紹，測定參數時，鏡面判別的依據。鏡面的優劣，最主要在於鏡面的垂直度。而判定標準如圖 3-2 所示，依照  $\theta$  角度來判定，當  $\theta=90^\circ$  時，此時為垂直鏡面，而在確定蝕刻角度  $\theta=90^\circ$  後，便以此標準來進行雷射之鏡面蝕刻。

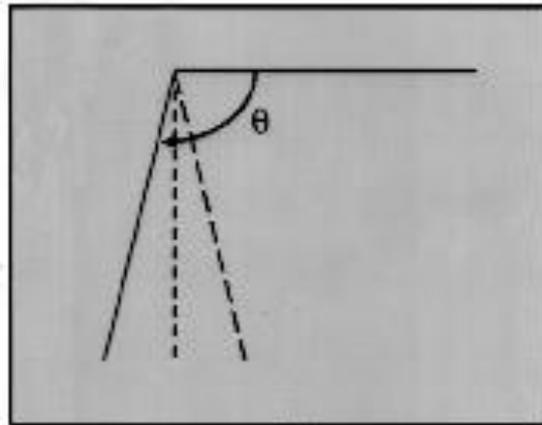


圖 3-2 鏡面的垂直度示意圖

接下來以 SEM 圖方式展示測定結果

(a) 蝕刻方向&氣體流量(總流量固定為 32sccm)

此時平邊方向為晶格(1, 1, 0)方向

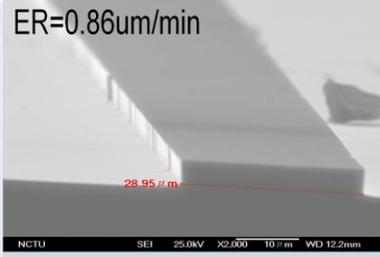
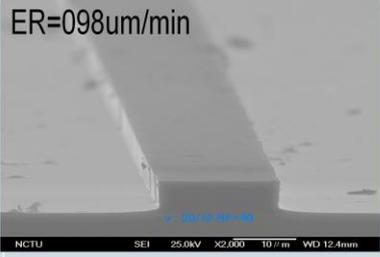
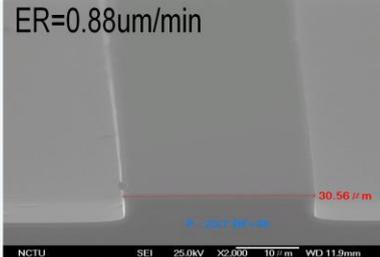
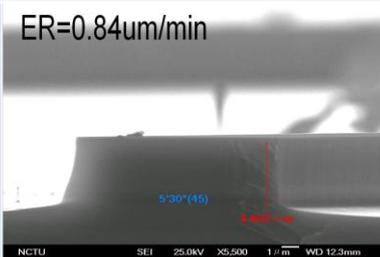
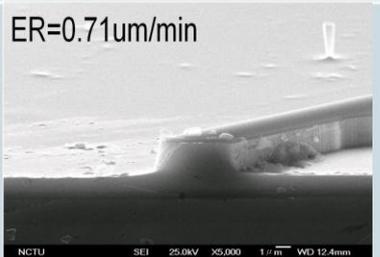
氣體流量/蝕刻方向	SiCl <sub>4</sub> /Ar=25/7	SiCl <sub>4</sub> /Ar=20/12
垂直平邊	ER=0.86um/min 	ER=0.98um/min 
平行平邊	ER=0.88um/min 	ER=1.36um/min 
平邊45°	ER=0.84um/min 	ER=0.71um/min 

圖 3-3 測試結果

由圖 3-3 可知,在氣體流量固定為 25/7 時,以垂直平邊的鏡面蝕刻效果為最佳,而平行平邊雖有較高之蝕刻速率,但鏡面之平整度較差;另外當 Ar 氣體比率流量加大時,平行平邊之鏡面有較顯著之不平整現象,是因為在此情形下,蝕刻速率大於其沈積物沈積在晶片表面的速率,容易造成鏡面不平整。

(b) RF Power & 氣體流量(平行平邊)

此時平邊方向為晶格(1, 1, 0)方向

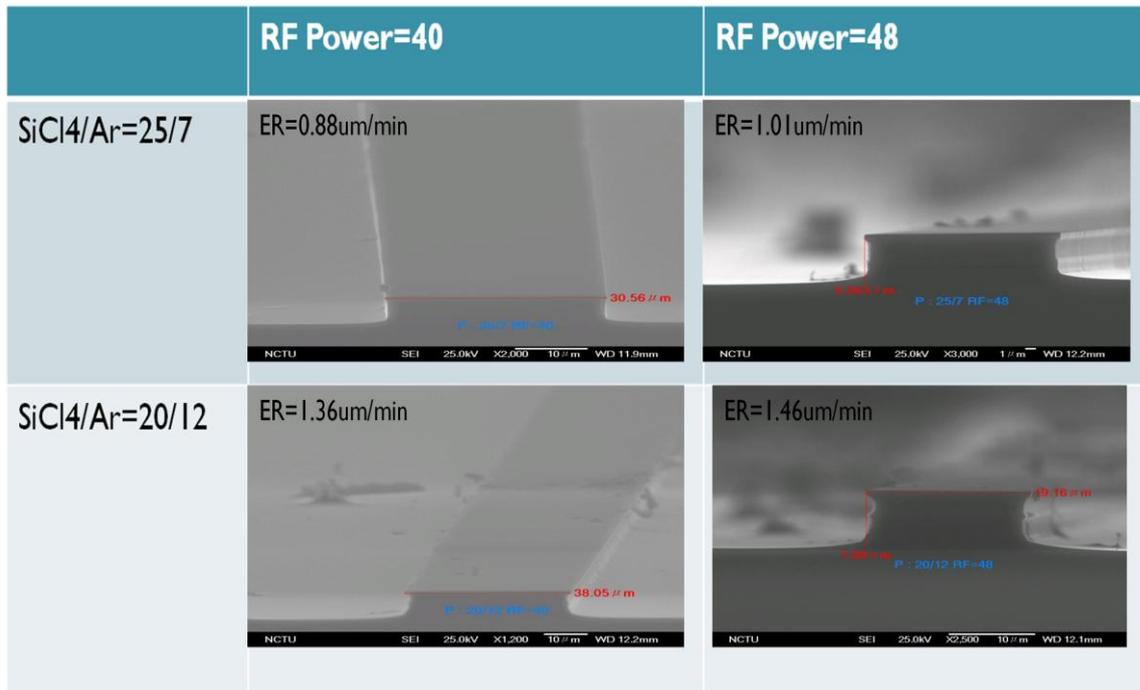
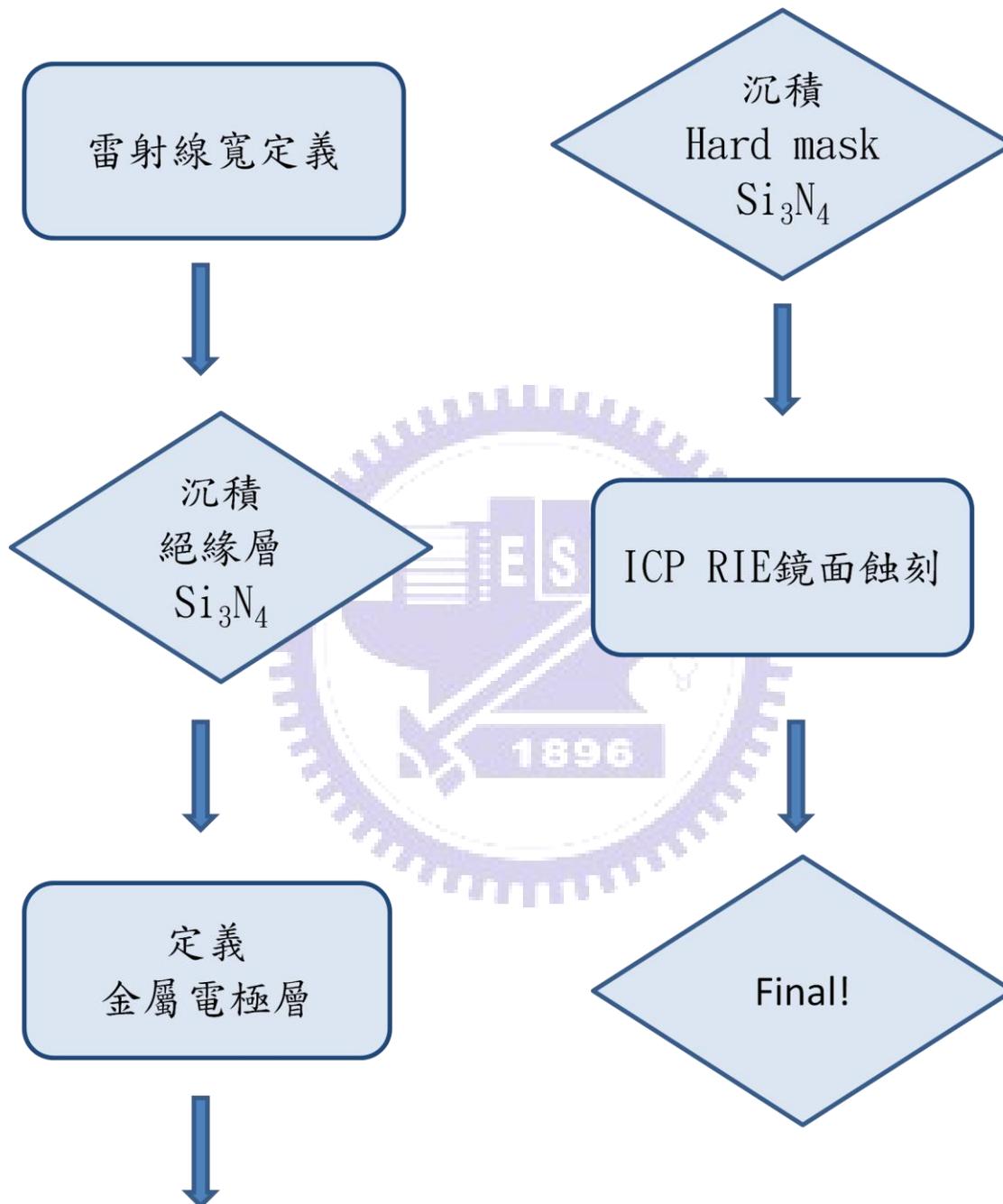


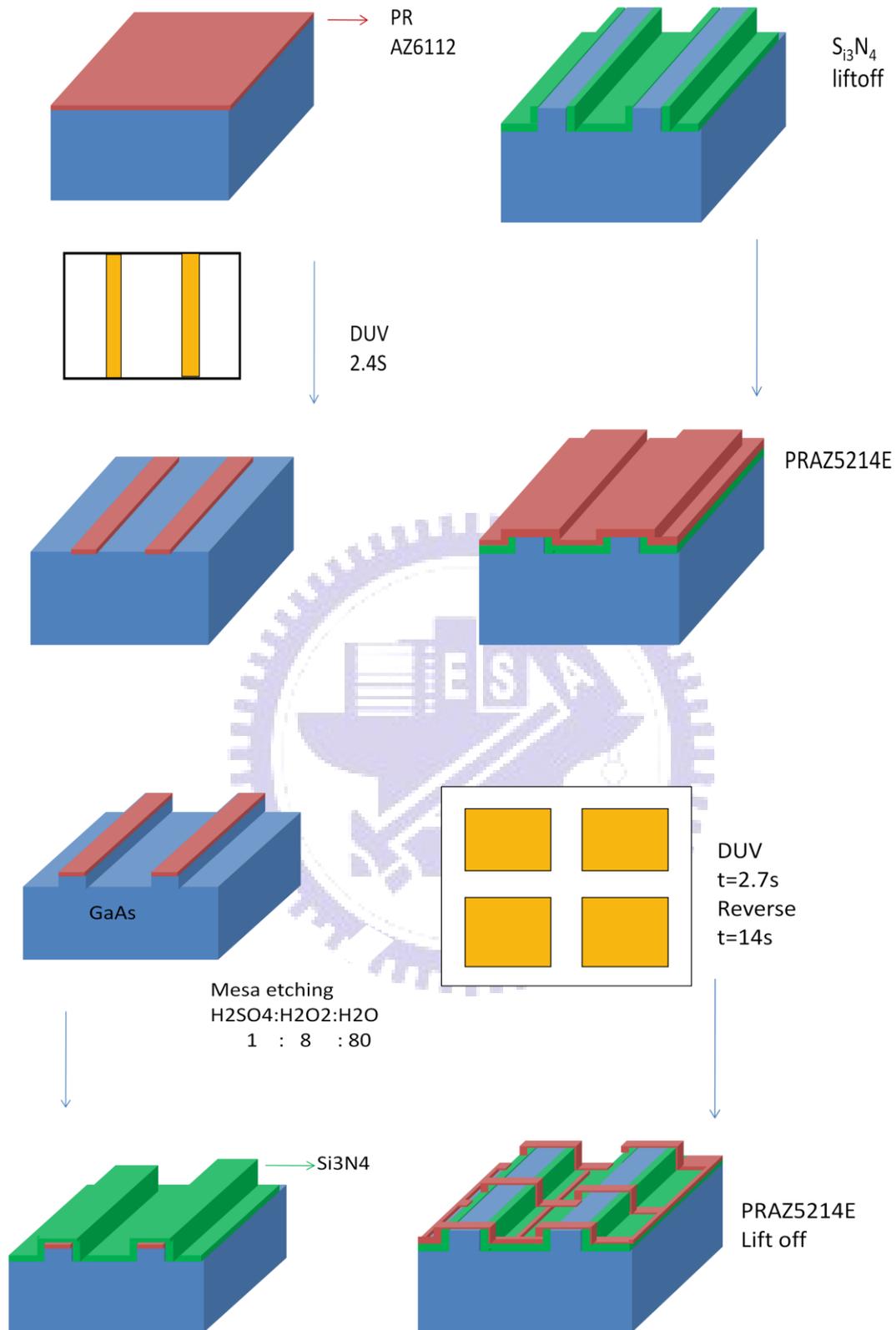
圖 3-4 測試結果

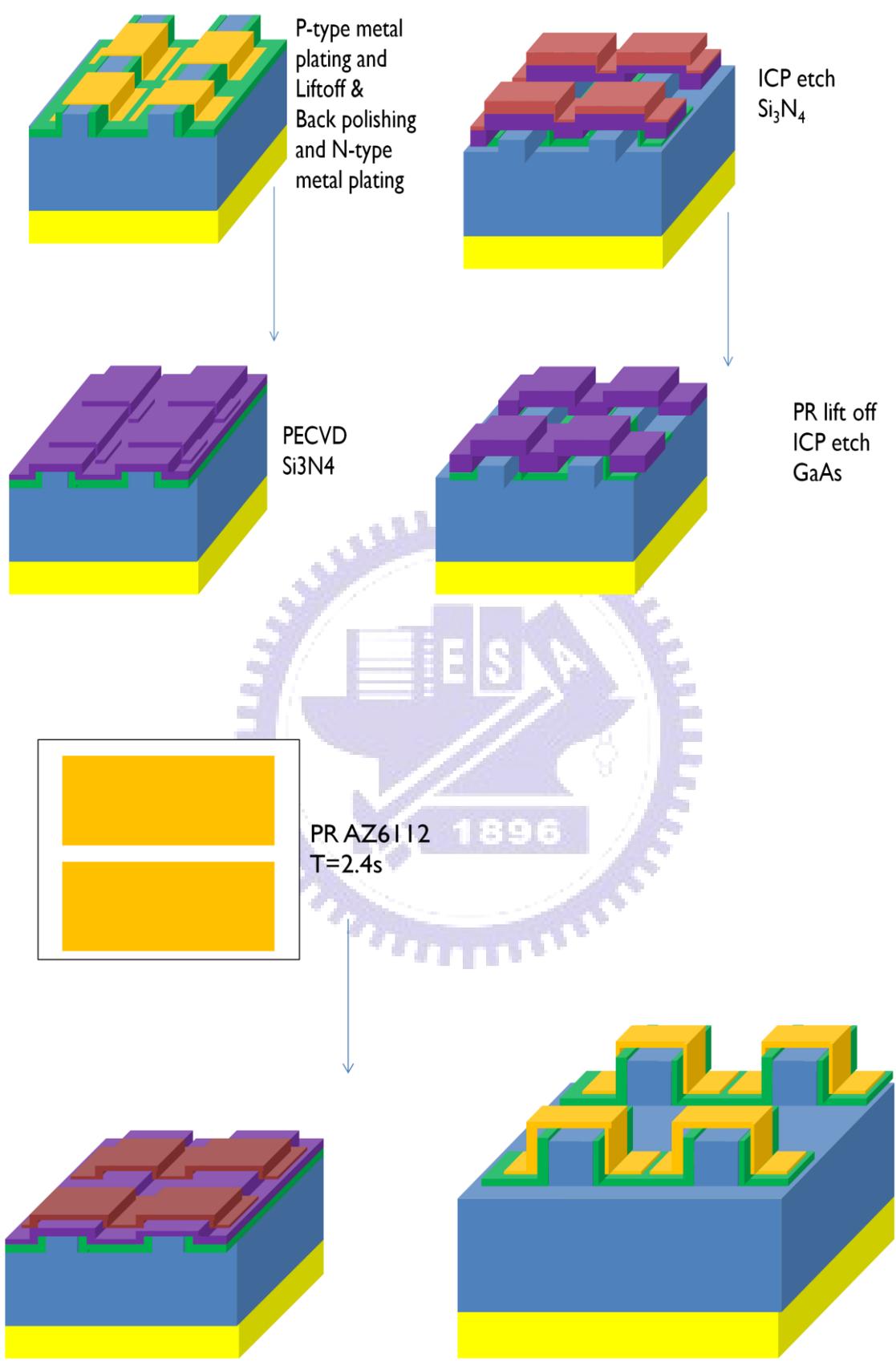
由圖 3-4 可知，在氣體流量固定為 SiCl<sub>4</sub>/Ar=25/7 時，當增加 RF power 時，會造鏡面不連續面將更為顯著，而當氣體流量比率增加為 SiCl<sub>4</sub>/Ar=20/12 時，在較小的 RF power 即出現不連續面，當增加 RF Power 時，不連續面亦更明顯。可知增加 RF power 與 Ar 比率時，雖可使蝕刻速率增加，不連續面亦將更顯著。

最終測定結果，使用氣體流量為 SiCl<sub>4</sub>/Ar=25/7; RF power=40W; ICP power=350W; 蝕刻方向為垂直平邊做為乾式蝕刻雷射鏡面參數。

### 3.3 製程流程







## 3.4 製程步驟

### 一. 雷射線寬定義

#### (1) 清洗晶圓

在進行微影製程之前必須先清洗晶圓以去除這些污染物。就算晶圓上表面看起來沒有污染物，進一步清洗仍可使光阻在表面上有較佳的附著力。首先使晶圓浸泡於丙酮溶液數分鐘，接下來再以去離子水(DI water)沖洗五分鐘，以氮氣吹乾，並做烘水烤乾。

#### (2) HMDS

在這個製程當中，底漆層在光阻塗佈之前就先塗佈於晶圓表面上，這層薄膜層可以增進有機光阻與晶圓表面之間的附著力。在這裡所使用的底漆層為六甲基二戊烷(Hexamaethyldisilazane, HMDS,  $(\text{CH}_3)_3\text{SiNH}\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ )。製程過程中會將晶圓放入預備室中，達到真空度後，即以溫度  $150^\circ\text{C}$ ，操作時間 30 分鐘，使 HMDS 沉積在晶圓上。

#### (3) 第一道光阻塗佈

光阻塗佈為一個沉積過程，液態光阻被鋪在晶圓表面上，而晶圓旋轉的離心力會將液體散佈到整個表面。在第一道光阻選用的是 AZ6112 正光阻，旋轉速度則為第一轉旋轉 10 秒 1000 轉/秒；第二轉 40 秒 5000 轉/秒。在轉速的方面，自旋轉速越高，光阻層則越薄，而光阻的均勻性也就越好。而第一道光阻厚度約為  $1.5\ \mu\text{m}$ 。在塗佈上光阻之後，由於晶圓邊緣會有光阻堆積現象，造成不均勻現象，則需再以棉花棒去除邊緣光阻，以達均勻性。

#### (4) 軟烘烤

光阻塗佈後，晶圓再一次地被放進加熱製程中以驅除光阻內部大部分溶劑，並且將光阻由液態轉變成固態。同時亦可增進光阻在表面的附著力。在此我所使用的為加熱平板，溫度為  $90^\circ\text{C}/90$  秒。

### (5) 第一道光阻雷射線寬定義

接下來則進行對準與曝光，將光罩圖案轉移到晶圓表面光阻上，在光罩設計上雷射波導線寬有  $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 。波導則必須平行於晶圓大平邊，在對準了之後便將晶圓與光罩作接觸式曝光，在此使用深紫外線(DUV)曝光機曝光 2.2 秒。在曝光之後則將晶圓進行顯影，在此使用 AZ300 之顯影液顯影時間約為 25 秒，在用去離子水進行定影並用氮氣槍吹乾。接下來將晶圓置於臭氧清洗機(UV ozone) 去除殘餘光阻。最後使用加熱平板  $120^\circ\text{C}/120$  秒進行硬烤，以達晶圓去水分子及增加光阻強度。接下來便將定義好的雷射條紋的晶圓進行 mesa etching 蝕刻掉 p+ 的 contact layer 與大部分的 p-cladding，依照不同結構有不同蝕刻時間，mesa etching 使用的溶液為  $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 8 : 80$ ，蝕刻速率大約為  $90\text{\AA}/\text{s}$ 。

## 二. 沉積絕緣層 $\text{Si}_3\text{N}_4$

接下來用  $80^\circ\text{C}$  操作溫度 PECVD 沈積  $\text{Si}_3\text{N}_4$   $1500\text{\AA}$  做為絕緣層，較低溫的操作溫度可使光阻在沉積過程當中不會燒焦，之後才可順利將其餘光阻去除。在沈積完  $\text{Si}_3\text{N}_4$  之後，便將晶圓浸泡在丙酮(ACE)溶液約 2 分鐘作 Liftoff，在過程當中可用水彩筆刷在晶圓邊緣，讓 Liftoff 過程更順利，也不會有殘餘光阻及  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的問題。Liftoff 之後便將晶圓放置 DI water 下沖洗並吹乾，即完成此步驟。

## 三. 定義金屬電極層

### (1) 第二道電極層光阻定義

在上第二道光阻前，同樣必須先上 HMDS 增進有機光阻與晶圓表面之間的附著力，而在此步驟中所使用之光阻為 5214E 負光阻，旋轉速度為第一轉旋轉 10 秒 1000 轉/秒；第二轉 40 秒 4500 轉/秒。

接下來進行去除邊緣光阻以及軟烘烤。之後將晶圓與光罩作接觸式曝光，在此使用深紫外線(DUV)曝光機曝光 2.8 秒。再進行反轉硬烤，加熱平板  $120^\circ\text{C}/120\text{s}$ ，

以及反轉曝光 DUV 曝光 12 秒。曝光之後則將晶圓進行顯影，在此使用 AZ300 之顯影液顯影時間約為 25 秒，再用去離子水進行定影並用氮氣槍吹乾。接下來將晶圓置於臭氧清洗機(UV ozone)去除殘餘光阻。最後使用加熱平板 120°C/120 秒進行硬烤，以達晶圓去水分子及增加光阻強度。

#### (2) 電子束 P-type 電極沉積

蒸鍍前利用 HCl:H<sub>2</sub>O=1:1 浸泡數十秒以去除 GaAs 表面氧化物，蒸鍍 Ti/Pt/Au 厚度為 300/300/2000Å，在沈積完 P-type 電極之後，變將晶圓浸泡在丙酮(ACE)溶液當約 2 分鐘作 Liftoff，在過程當中可用水彩筆刷在晶圓邊緣，讓 Liftoff 過程更順利，也不會有殘餘光阻及金屬的問題。Liftoff 之後便將晶圓放置 DI water 下沖洗並吹乾即完成此步驟。

#### (3) 晶圓背面磨薄

在此步驟中目的為降低半導體雷射之電阻值。在此使用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:NH<sub>4</sub>OH = 3:1 之溶液，浸泡約 21 分鐘，將晶片被面磨薄約至 200μm，去除 GaAs 表面氧化物，浸泡過程以棉花棒刷在晶圓背面，以隨時去除氧化物，磨薄完成之後同樣以去離子水進行沖拭並用氮氣槍吹乾。

#### (4) 電子束 N-type 電極沉積

蒸鍍前利用 HCl:H<sub>2</sub>O=1:1 浸泡數十秒以去除 GaAs 表面氧化物，蒸鍍 N-type 背電極 Ni/Ge/Au，厚度為 350/700/2000Å。

#### (5) 快速熱退火(RTA)

此為一高速加熱過程，此加熱過程可使沉積在晶圓表面之金屬，由於高速加熱過程中晶圓晶格的破壞，而滲透至晶圓內部，以達蒸鍍電極的最佳效果。在此所使用條件為加熱至高速加熱至 420°C 維持 30s。

#### 四. 沈積 hard mask $\text{Si}_3\text{N}_4$

##### (1) PECVD 沉積 $\text{Si}_3\text{N}_4$

此步驟中所沉積之  $\text{Si}_3\text{N}_4$  是用以作為雷射鏡面蝕刻之 hard mask，由於  $\text{Si}_3\text{N}_4$  與 GaAs 在乾式蝕刻時可達較高的選擇比，所以選定  $\text{Si}_3\text{N}_4$  作為 hard mask，在此使用高溫沉積，沉積條件為  $300^\circ\text{C}$  沉積 30 分鐘，沉積厚度為  $3000\text{\AA}$ 。

##### (2) 第三道光阻 ICP 蝕刻鏡面定義

在上第三道光阻前同樣必須先上 HMDS 增進有機光阻與晶圓表面之間的附著力，而在此步驟中所使用之光阻為 AZ6112 正光阻，旋轉速度為第一轉旋轉 10 秒 1000 轉/秒；第二轉 40 秒 5000 轉/秒。接下來進行去除邊緣光阻以及軟烘烤。之後如同 3-3-5 將晶圓與光罩作接觸式曝光。之後將晶圓與光罩作接觸式曝光，在此使用深紫外線(DUV)曝光機曝光 2.2 秒。並使用 AZ300 之顯影液顯影約為 25 秒，再用去離子水進行定影並用氮氣槍吹乾。接下來將晶圓致於臭氧清洗機(UV ozone)去除殘餘光阻。最後使用加熱平板  $120^\circ\text{C}/120$  秒進行硬烤，以達晶圓去水分子及增加光阻強度。

#### 五. ICP RIE 鏡面蝕刻

在此步驟中須以 ICP 先蝕刻 hard mask  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ；首先以正光阻 AZ6112 作為 mask 蝕刻  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ，此時 ICP 使用條件如表 3-1 所示。接下來先以 ACE 去除作為 mask 之光阻，再進行 GaAs 鏡面之蝕刻，而最後使用之蝕刻條件如表 3-1 所示。接下來則進行量測前之 GaAs substrate 劈裂，即完成此製程。

	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	GaAs
O <sub>2</sub> (sccm)	5	
CHF <sub>3</sub> (sccm)	50	
Ar(sccm)		7
SiCl <sub>4</sub> (sccm)		25
ICP power(W)		350
RF power(W)	150	40
Pressure(mT)	55	3
Temperature(° C)	20	20
He pressure(mT)		7

表 3-1 ICP 蝕刻使用條件



### 3.5 元件量測系統

元件量測方面，如同一般自然劈裂面量測系統，而在量測之前相較於一般自然劈裂面不同點在於，由於在進行乾式蝕刻鏡面製程結束時，下方基底(substrate)部分人須經由切割機再進行去除，如圖 3-5 所示。中間凹陷部分即為乾式蝕刻之鏡面。

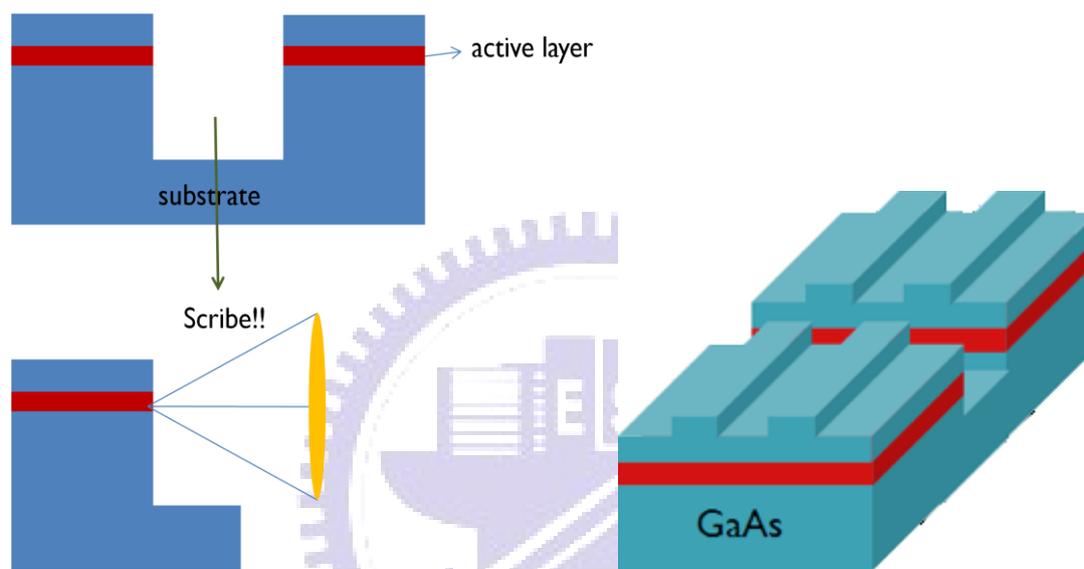


圖 3-5 Dry etched mirror 量測示意圖

#### (a) L-I-V 量測

L-I-V 特性為雷射元件的基本特性，起始電流( $I_{th}$ )，微分量子效率( $\eta_d$ )，電阻( $R_s$ )，內部損耗( $\alpha_i$ )，皆可由 L-I-V 特性中得知。在此所使用之 L-I-V 量測系統如圖 3-6 所示，雷射元件放置在接上 TE-Cooler 的銅製載座上，用以控制載座溫度；透過探針且以 KEITHLEY 2520 Pulsed Laser Diode Test System 用以通入電流，通入電流之後，Detector 將會接收產生之雷射光，並將此電性傳回至 KEITHLEY 2520 Pulsed Laser Diode Test System，並傳至電腦做分析。

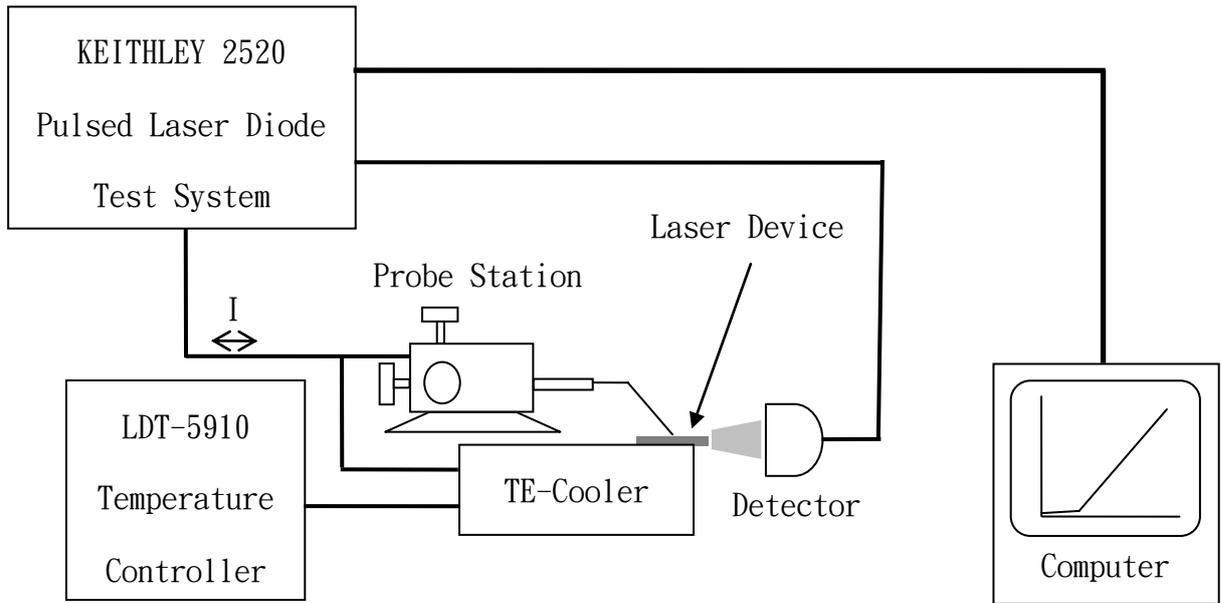


圖 3-6 L-I-V 量測系統

(b) Spectrum 量測

在了解 L-I-V 特性之後，接下來便進一步了解雷射元件之與光譜量測系統如圖 3-7 所示。在此使用與 L-I-V 相同之載座、探針與溫度控制，在此雷射光傳遞至一單模(Single Mode)fiber，接下來傳至光頻譜分析儀 ANDO AQ-6315，且傳至電腦做分析。

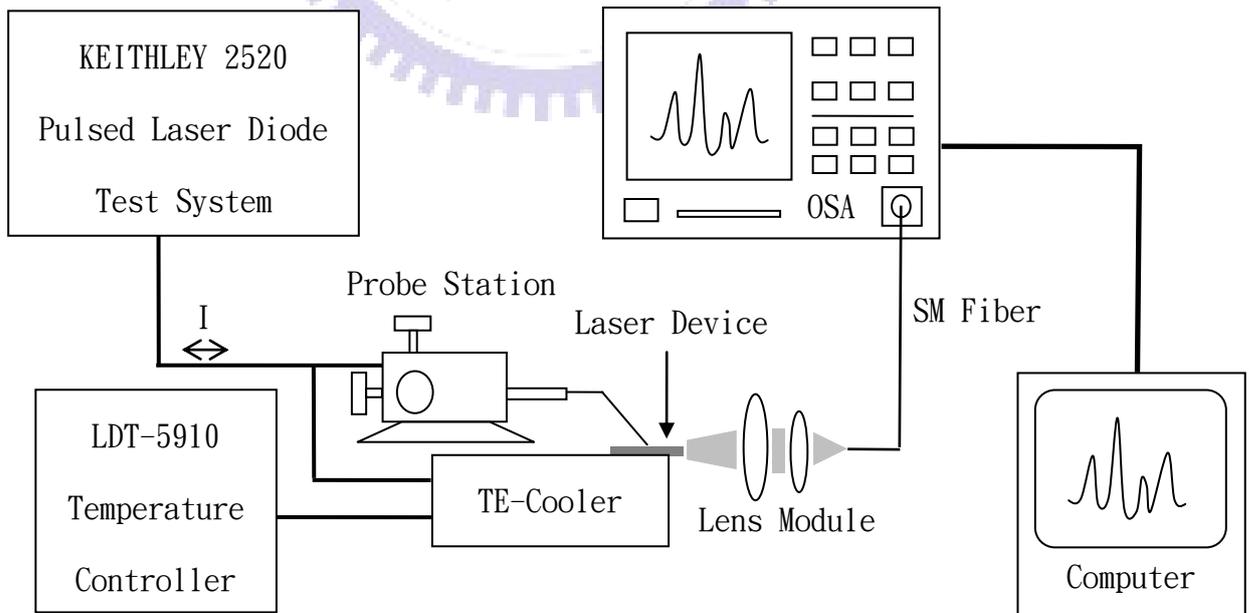


圖 3-7 光譜量測系統

(c) Far-Field 量測

為了解乾式蝕刻鏡面雷射被基板吸收反射情形，接下來則需進行 Far-Field 量測。雷射光通過 Hamamatsu FFP lens module (A3267-12) 聚焦在 Hamamatsu IR CCD camera (C5840)，接下來此訊號透過轉接器將傳遞至電腦進行分析。

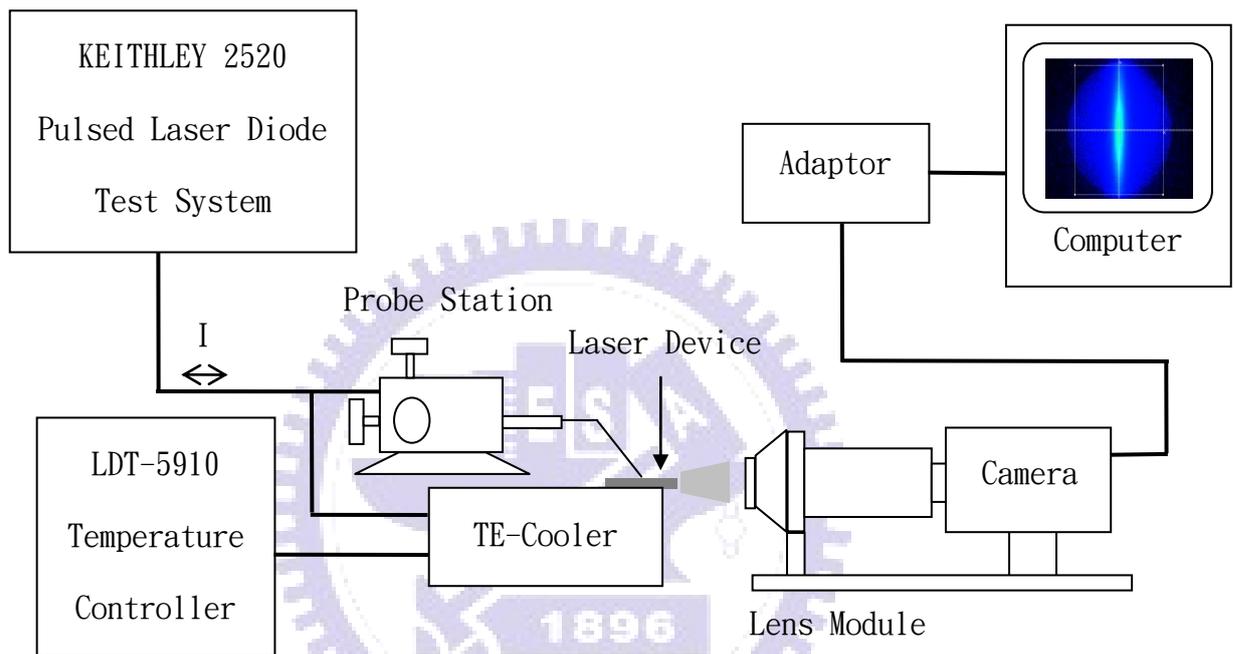


圖 3-8 FFP 量測系統

# Chapter 4 實驗結果與討論

## 4.1 晶片結構分析

在經過不同晶片實驗測試之後，最終使用以下三種不同長晶結構，來做分析探討。首先在量子井結構使用 LM4803；量子點結構則使用 LM4903, LM4917。結構圖分別如圖 4-1，圖 4-2，圖 4-3 所示。

### LM4803

晶片為利用分子束磊晶成長，主動層(active layer)由 1 層量子井所組成，主動層上層被 1.2 $\mu\text{m}$  厚的  $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$  cladding 及 140nm 的 GRINSCH(graded index separate confinement heterostructure)所包覆以侷限光

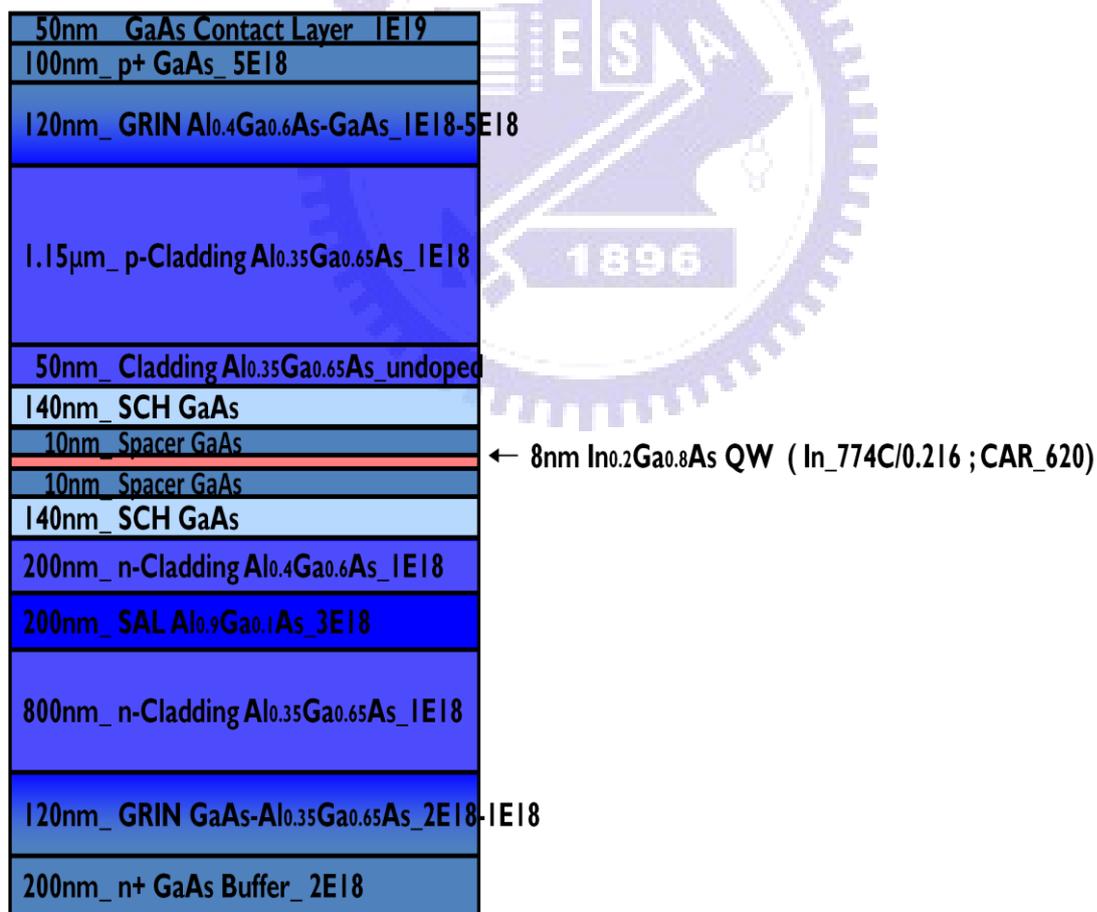


圖 4-1 QW LM 4803 量子井結構

## LM4903

利用分子束磊晶成長，主動層(active layer)由 7 層量子點所組成，每層量子點密度在  $4E10/cm^2$  左右，並覆蓋 5nm 的  $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ ，層與層之間以 50nm 的 GaAs 間隔，主動層上下各被 1.5 $\mu m$  厚的  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$  cladding 及 100nm 的 GRINSCH 所包覆以侷限光。

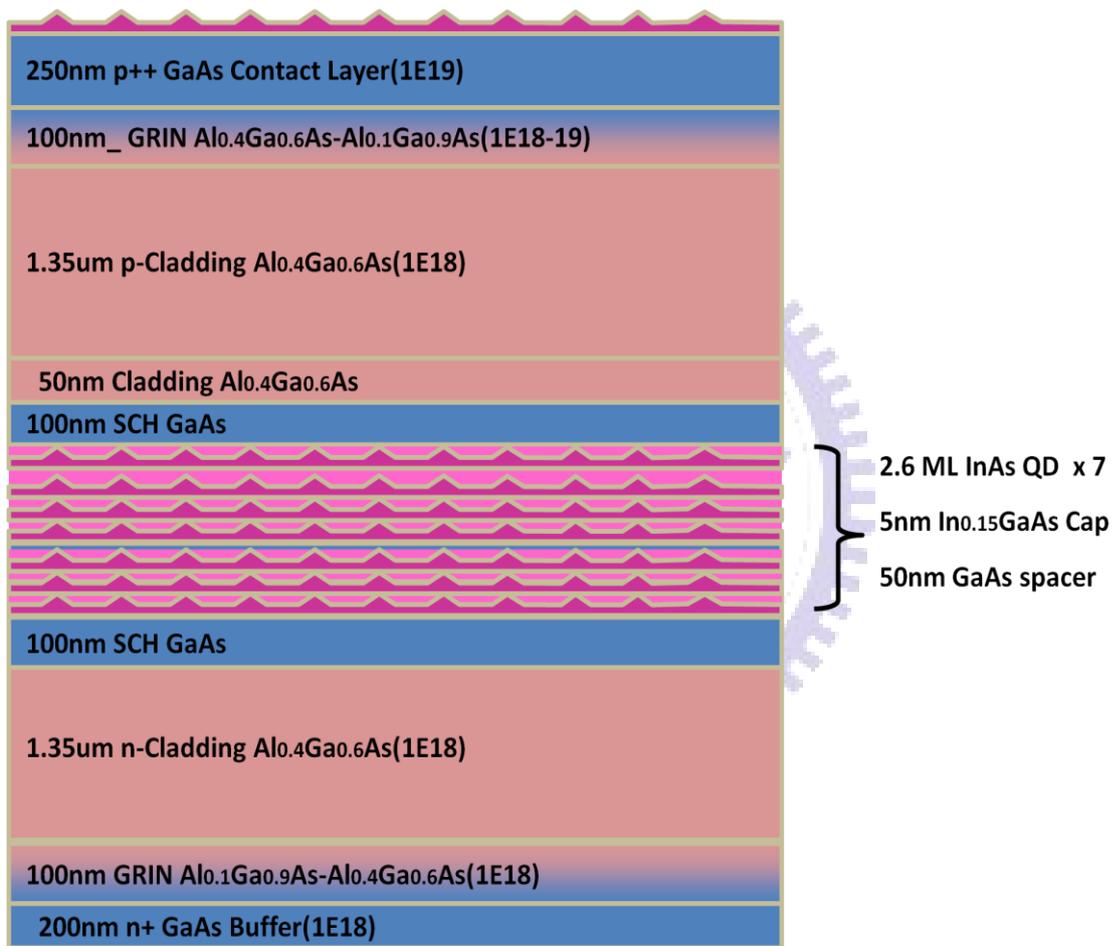


圖 4-2 QW LM 4903 量子點結構

## LM4917

利用分子束磊晶成長，主動層(active layer)由 5 層量子點所組成，每層量子點密度在  $4 \times 10^{10}/\text{cm}^2$  左右，並覆蓋 4nm 的  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ，層與層之間以 45nm 的 GaAs 間隔，主動層上下各被  $1.5\mu\text{m}$  厚的  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  cladding 及 150nm 的 GRINSCH 所包覆以侷限光。

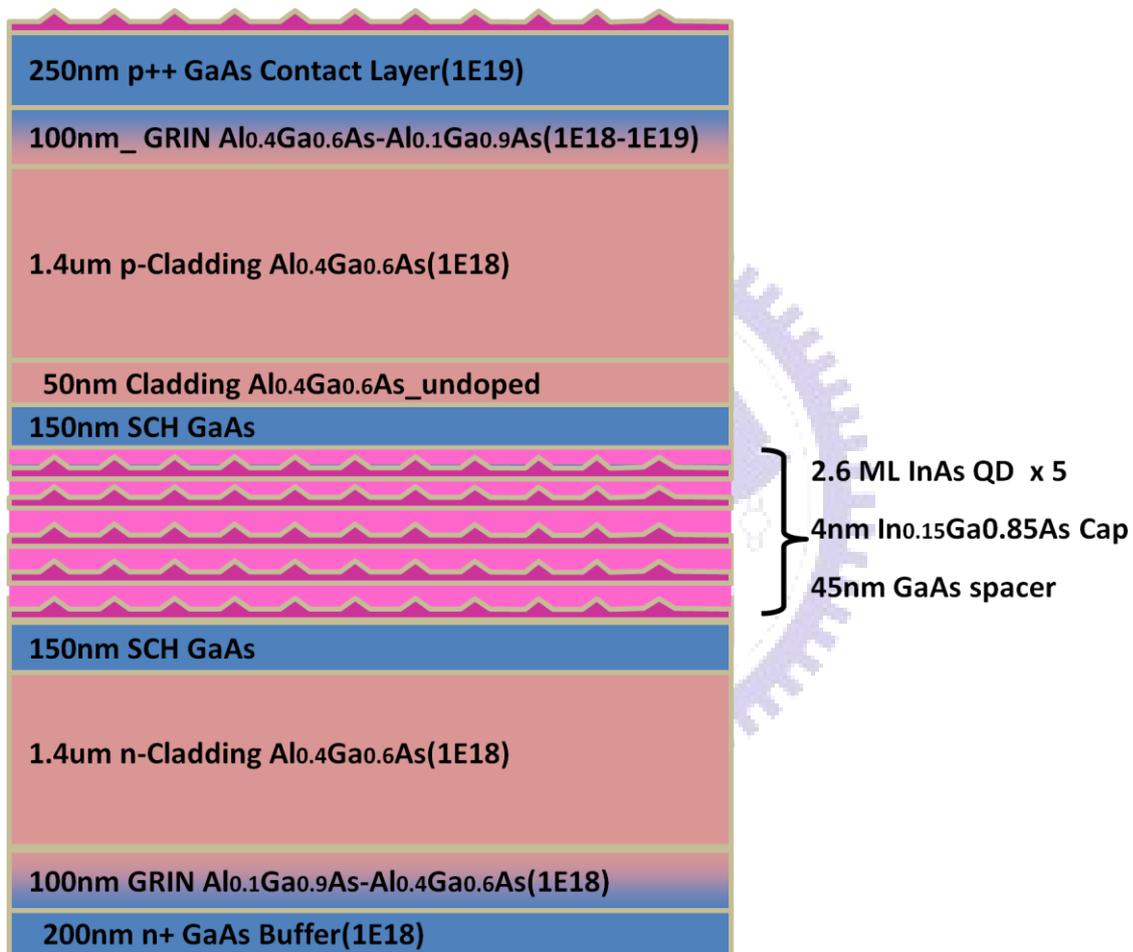


圖 4-3 QD LM 4917 量子點結構

## 4.2 實驗結果

### 4.2.1 量子井雷射

Lm4803

首先針對量子井雷射進行研究，使用之晶圓為 LM4803 QW980，結構如圖 4-1，蝕刻時間為 4 分 10 秒，SEM 下結果如圖 4-4，蝕刻鏡面深度約為  $3.71\ \mu\text{m}$ ，如圖所示 mirror 部分，前方所示 substrate 部分約為  $3\ \mu\text{m}$ ，雷射線寬為  $20\ \mu\text{m}$ ，共振腔長度為  $1000\ \mu\text{m}$ 。

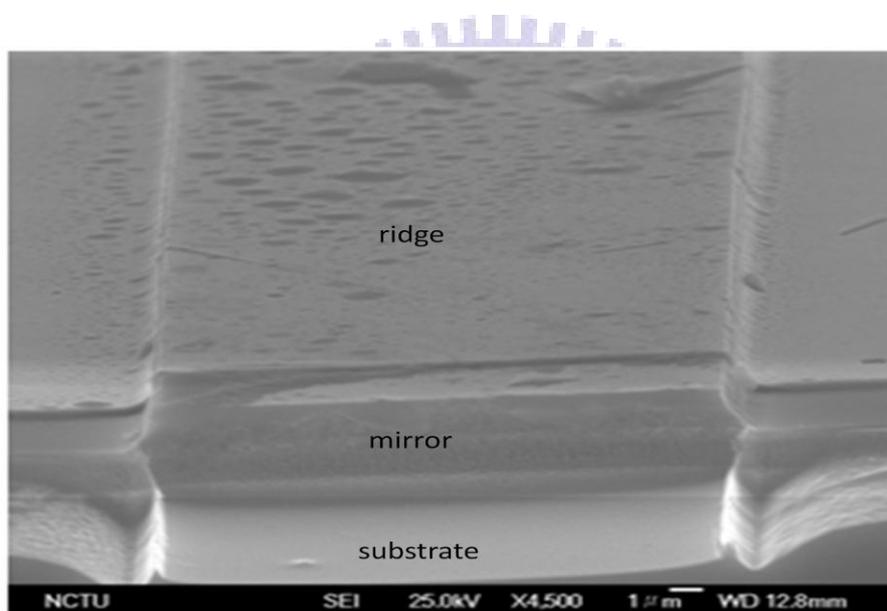


圖 4-4 QW SEM 剖面圖

在此條件下，所得之 L-I-V 特性曲線與光頻譜圖如圖 4-5、圖 4-6，由圖 4-6 可知，此雷射之中心波段為  $1007\text{nm}$ 。由圖 4-5 L-I-V 特性曲線可得此雷射基本特性，代入式(2.5)可得此雷射之鏡面損失為 42.96。詳細整理如表 4-1 所示。

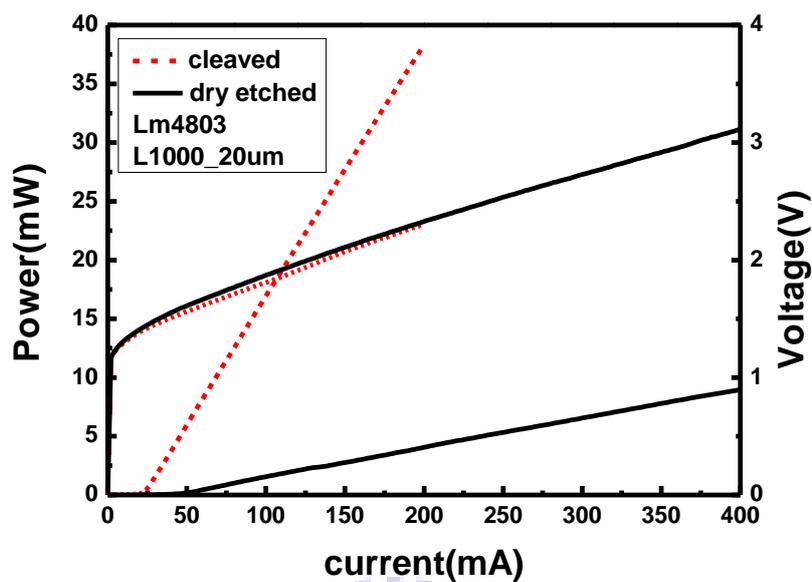


圖 4-5 L-I-V 特性曲線

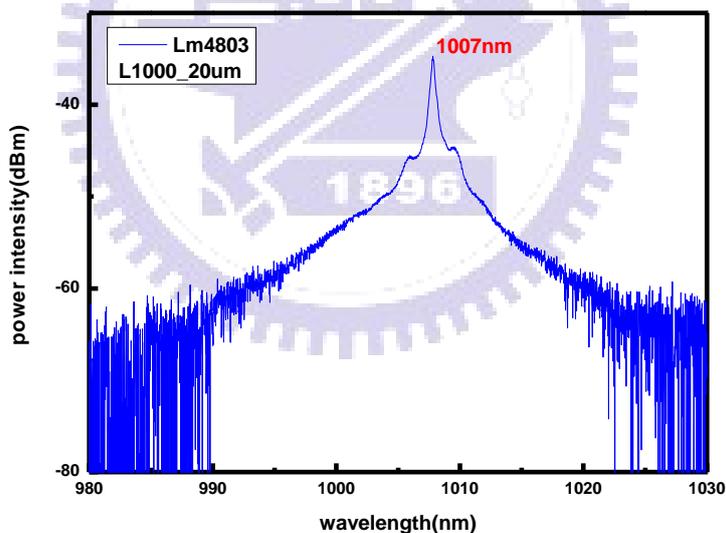


圖 4-6 LM4803 光頻譜圖

L1000 20um	$\eta_d$	$G(\text{cm}^{-1})$	$J_{th} (\text{A}/\text{cm}^2)$	$\alpha_m + \alpha_{\text{scattering}}(\text{cm}^{-1})$	$J_{tr}(\text{A}/\text{cm}^2)$
Dry etched mirror	0.0307	65.78	220	62.78	78.86
Cleaved mirror	0.26	14.39	110	11.39(= $\alpha_m$ )	78.86

表 4-1 LM4803 自然劈裂面與乾式蝕刻鏡面特性之比較

## 4.2.2 量子點雷射

### A. LM4903

LM4903 蝕刻時間為 4 分 10 秒，結構圖如圖所示 SEM 下結果如圖 4-7，蝕刻鏡面深度約為  $3.79\ \mu\text{m}$ ，雷射線寬為  $20\ \mu\text{m}$ ，共振腔長度為  $2000\ \mu\text{m}$ 。在此條件下，所得之 L-I-V 特性曲線如圖 4-8。

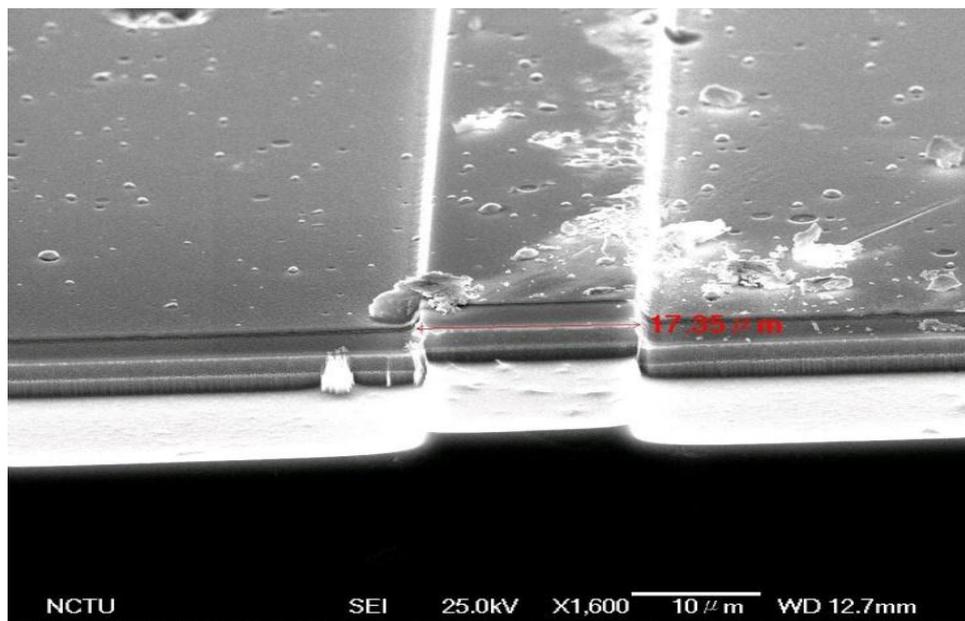


圖 4-7 LM4903 SEM 圖

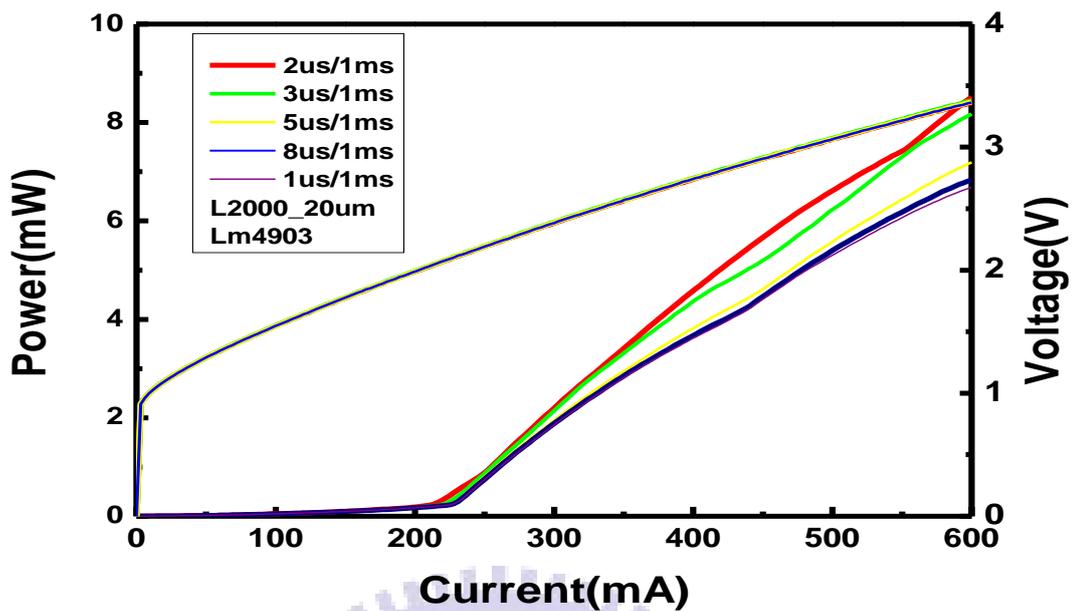


圖 4-8 LM4903 L-I-V 特性曲線

圖 4-8 所示 L-I 特性曲線有五種不同量測情形，分別代表不同 duty cycle，由於 dry etched mirror 損耗較大，易有過熱情形，所以運用不同 duty cycle，以找出最佳化 L-I 特性曲線。針對共振腔長度  $2000\ \mu\text{m}$  / 雷射寬度  $20\ \mu\text{m}$ ，發現在 duty cycle 為  $2\ \mu\text{s}/1\text{ms}$  時為最佳化。

接下來對此雷射光頻譜做分析探討，如圖所示，dry etched mirror 在起始電流左右之雷射光波長如圖 4-9 所示為  $1290\text{nm}$  與 cleaved mirror 同為基態雷射。在確定兩者皆為基態雷射之後，比較兩者 L-I 曲線特性，如圖 4-10。

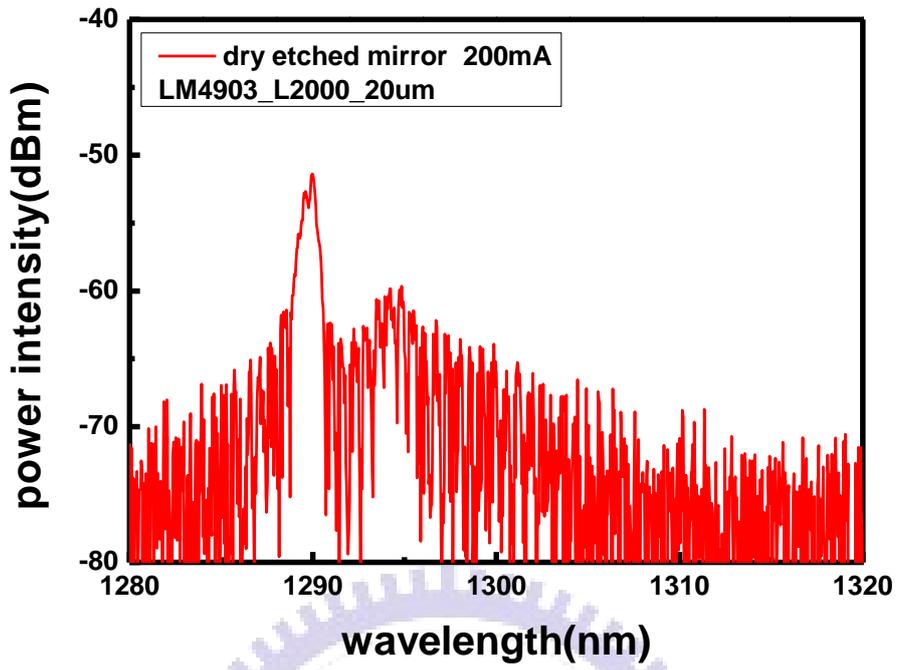


圖 4-9 LM4903 光頻譜圖

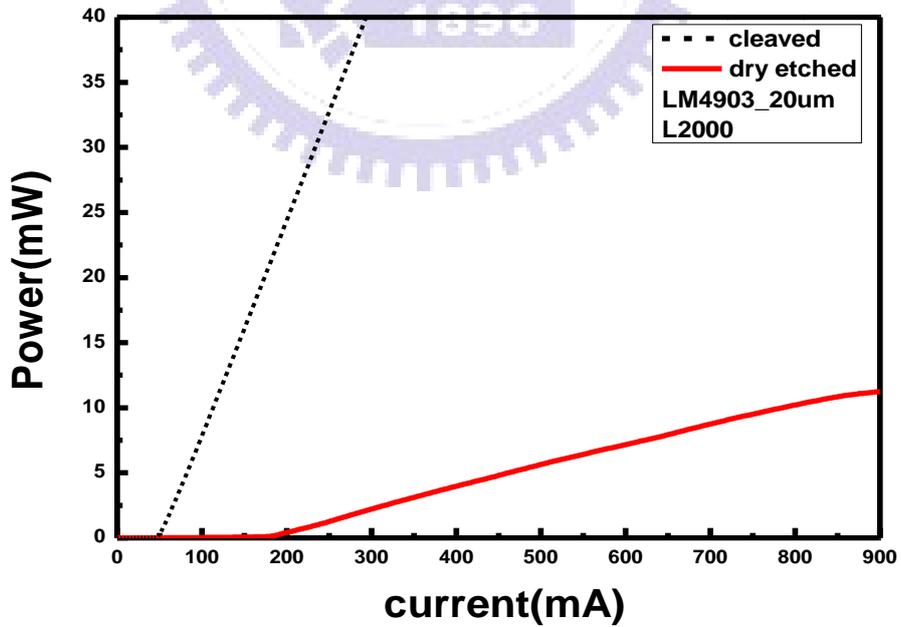


圖 4-10 LM4903 L-I-V 特性曲線比較

代入式(2.21)可得此雷射之鏡面損失為  $38.77\text{cm}^{-1}$ 。詳細雷射特性整理如表 4-2 所示。

L2000 $20\mu\text{m}$	$\eta_d$	$G(\text{cm}^{-1})$	$J_{th} (\text{A}/\text{cm}^2)$	$\alpha_m + \alpha_{scattering} (\text{cm}^{-1})$	$J_{tr}(\text{A}/\text{cm}^2)$
Dry etched mirror	0.016	44.74	425	41.74	56.8
Cleaved mirror	0.156	8.7	128	5.7(= $\alpha_m$ )	56.8

表 4-2 LM4803 自然劈裂面與乾式蝕刻鏡面特性之比較

#### B. LM4917

為使雷射特性更好，在此增加蝕刻時間，LM4903 蝕刻時間為 5 分 10 秒，蝕刻鏡面深度約為  $5.18\sim 5.98\mu\text{m}$ ，雷射線寬分別為  $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ ，共振腔長度為  $2000\mu\text{m}$ 。

(a)雷射線寬  $10\mu\text{m}$  之雷射，圖 4-11，圖 4-12 分別為 SEM 圖與 L-I-V 特性曲線

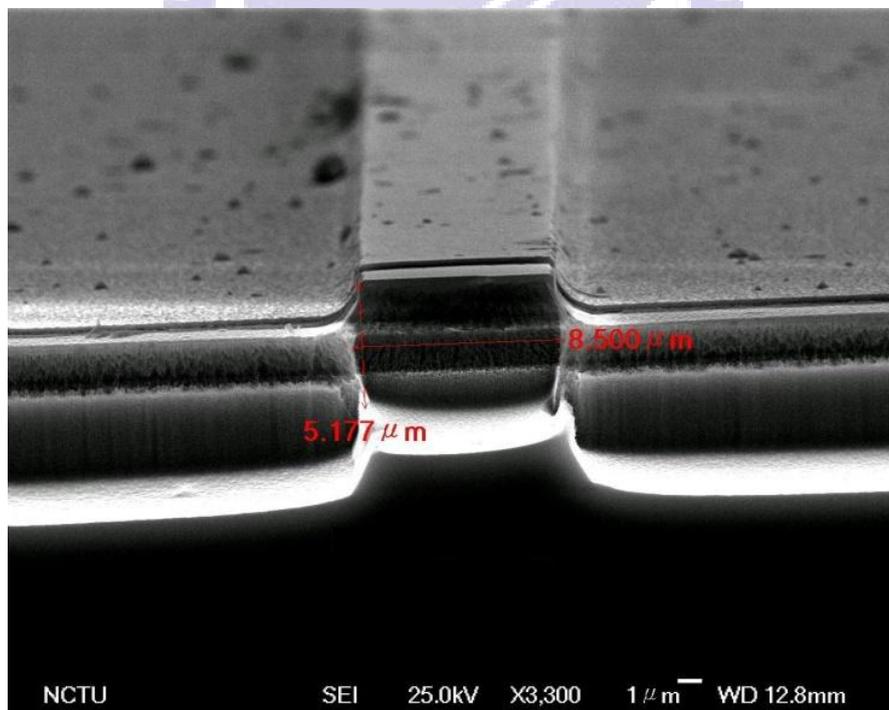


圖 4-11 LM4917 L2000\_10  $\mu\text{m}$  SEM 圖

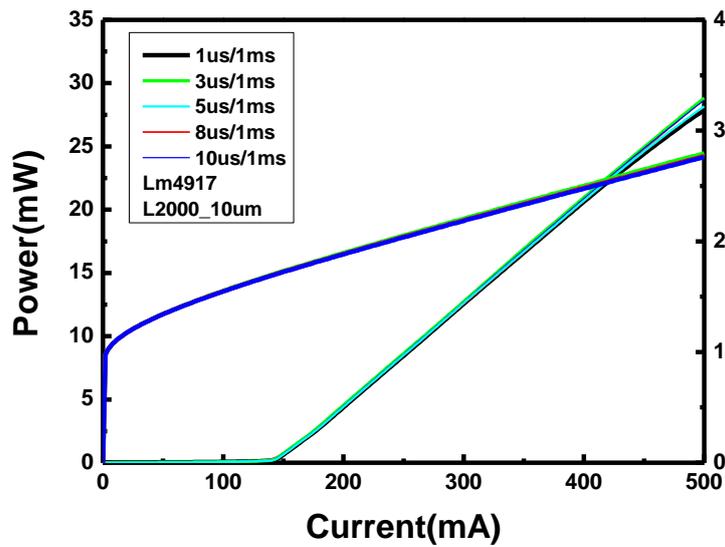


圖 4-12 LM4917 L2000\_10  $\mu\text{m}$  L-I-V 特性曲線

圖 4-12 中，L-I 特性曲線有五種不同量測情形，分別代表不同 duty cycle，針對 L2000 20  $\mu\text{m}$ ，發現在 duty cycle 為 2  $\mu\text{s}/1\text{ms}$  時為最佳化。此時基本雷射特性如表 4-3。

L2000 10um	$\eta_d$	$J_{th}$ (A/cm <sup>2</sup> )
Dry etched mirror	<b>0.084</b>	<b>746.45</b>

表 4-3 LM4917 L2000\_10  $\mu\text{m}$  基本雷射特性

接下來針對此雷射光頻譜做分析探討，如圖 4-13 表示。此時為第一激發態雷射，中心波長為 1178nm。在此製程下，並未出現基態雷射，是由於 dry etched mirror 之損耗所造成。由於基態的飽和增益較低，在此情況下，基態的飽和增益並沒有克服內部損耗與鏡面損耗，以至於在基態並沒有雷射，而激發態飽和增益較高，所以在此 dry etched mirror 下激發態飽和增益可輕易克服損耗，達到雷射條件。

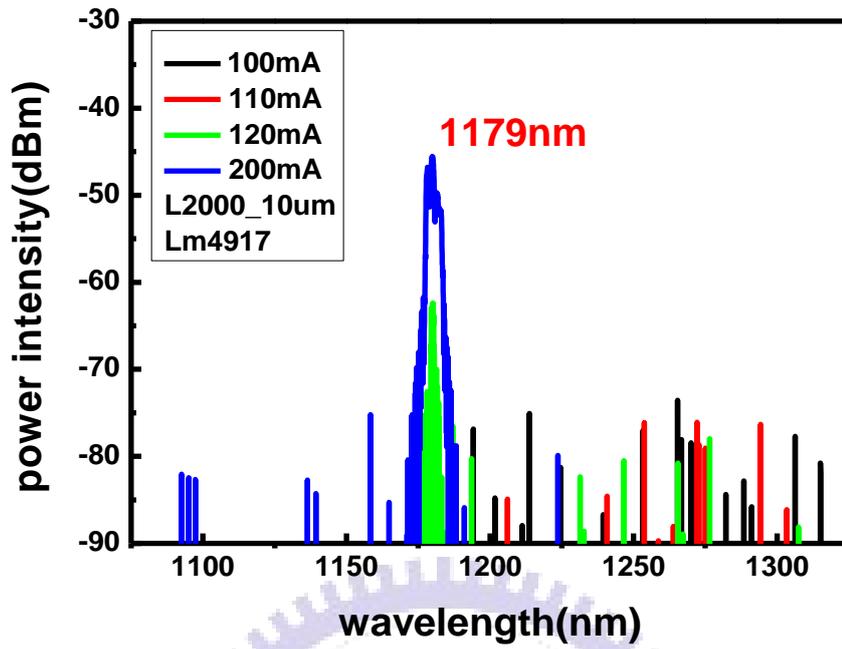


圖 4-13 LM4917 L2000\_10  $\mu\text{m}$  光頻譜圖

(b)雷射寬度 20  $\mu\text{m}$ ，圖 4-14，圖 4-15 分別為 SEM 圖與 L-I-V 特性曲線

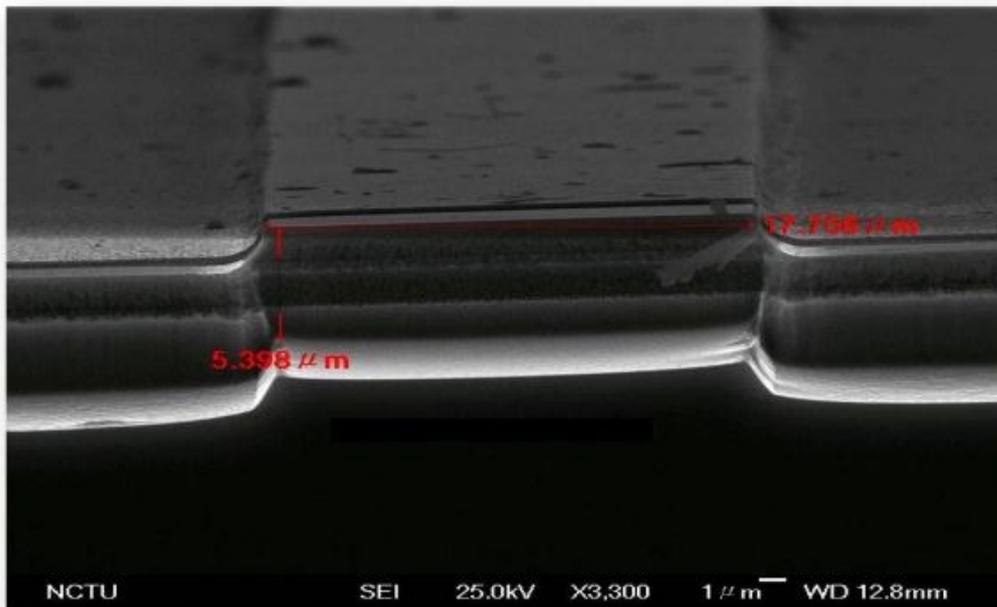


圖 4-14 LM4917 L2000\_20  $\mu\text{m}$  SEM 圖

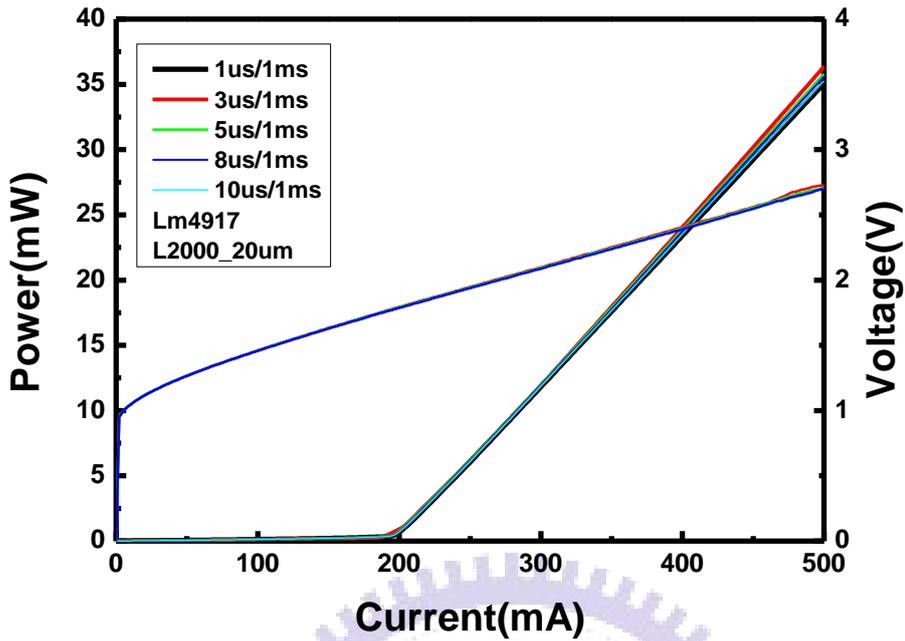


圖 4-15 LM4917 L2000\_20  $\mu\text{m}$  L-I-V 特性曲線

同上例，在 duty cycle 為  $2\ \mu\text{s}/1\text{ms}$  時有最佳化雷射特性。此時基本雷射特性如下表 4-4。

L2000 20um	$\eta_d$	$J_{th}$ ( $\text{A}/\text{cm}^2$ )
Dry etched mirror	0.126	507.7

表 4-4 LM4917 L2000\_20  $\mu\text{m}$  基本雷射特性

接下來針對此雷射光頻譜做分析探討，如圖 4-16 所示。此時如上例亦為第一激發態雷射，中心波長為 1184nm。同樣是由於 dry etched mirror 之損耗所造成。

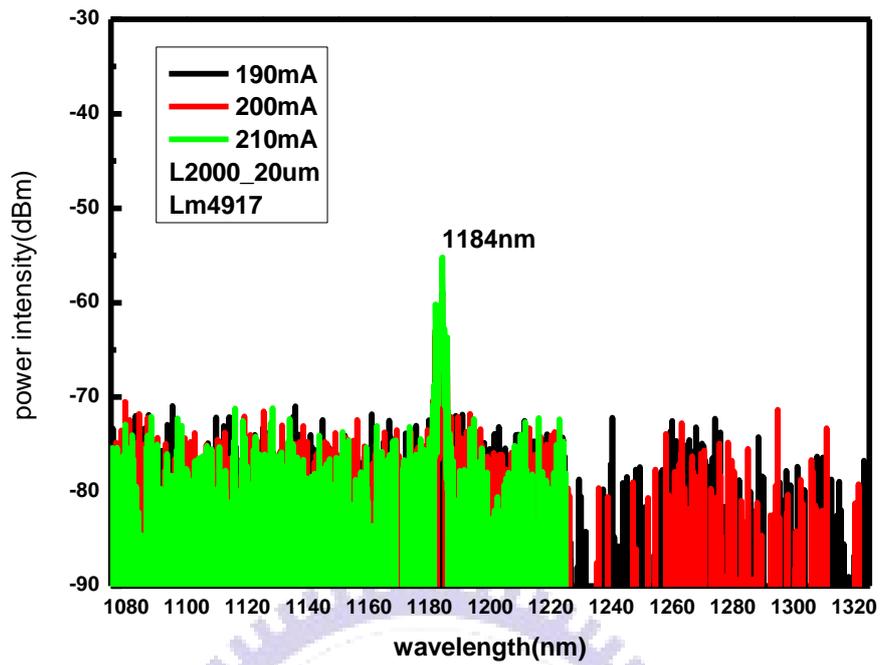


圖 4-16 LM4917 L2000\_20  $\mu\text{m}$  光頻譜圖

(c) 雷射寬度  $50\ \mu\text{m}$ ，圖 4-17，圖 4-18 分別為 SEM 圖與 L-I-V 特性曲線

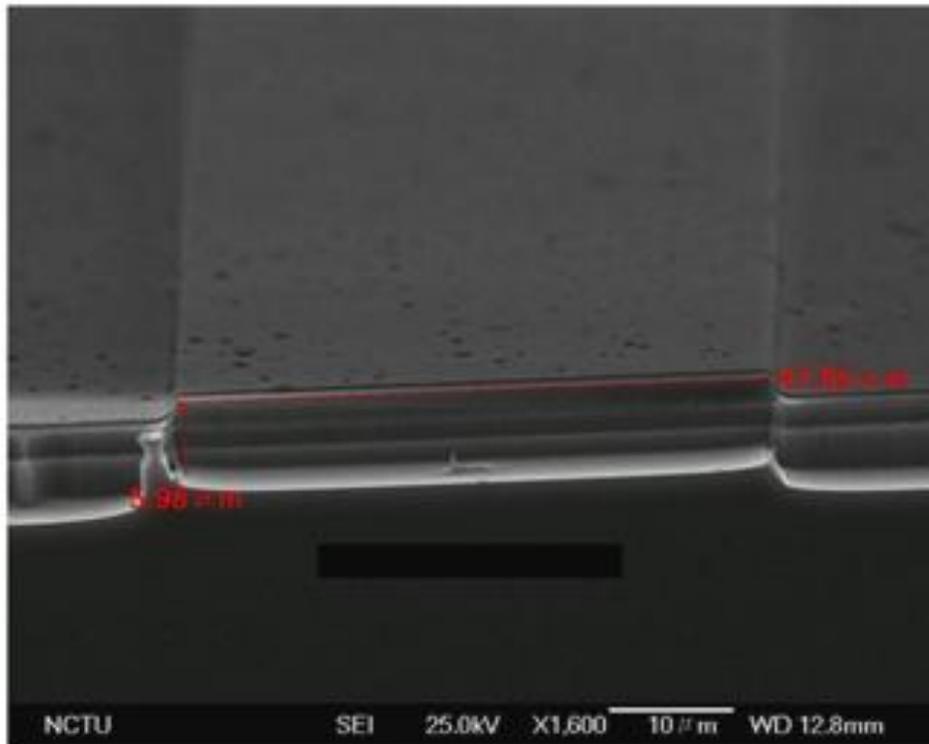


圖 4-17 LM4917 L2000\_50  $\mu\text{m}$  SEM 圖

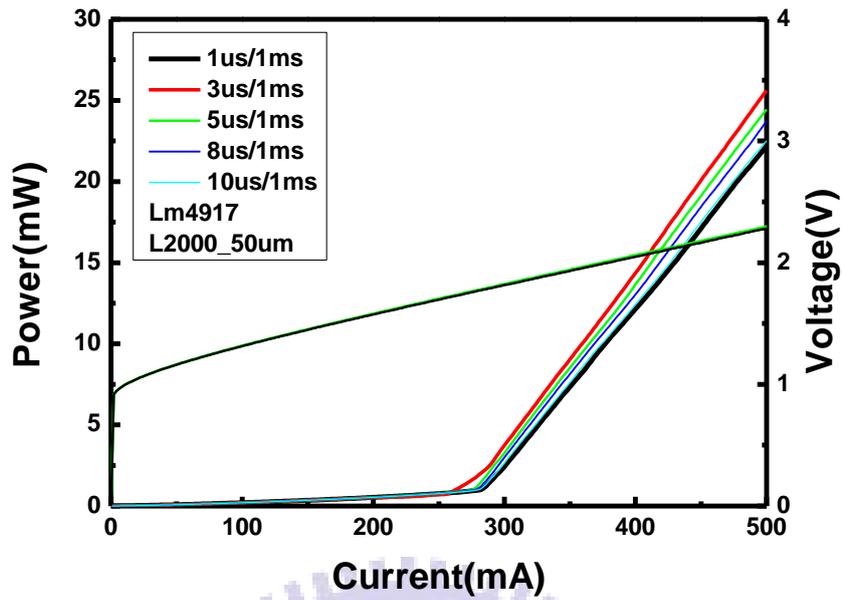


圖 4-18 LM4917 L2000\_50  $\mu\text{m}$  L-I-V 特性曲線

同上例，由圖 4-18 可知在 duty cycle 為  $2\mu\text{s}/1\text{ms}$  時有最佳化雷射特性。而接下來由頻譜圖，如圖 4-19 可知，此時雷射中心波長為  $1265\text{nm}$ ，為基態雷射。而同樣在確定兩者皆為基態雷射之後，比較兩者 L-I 曲線特性，如圖 4-20。

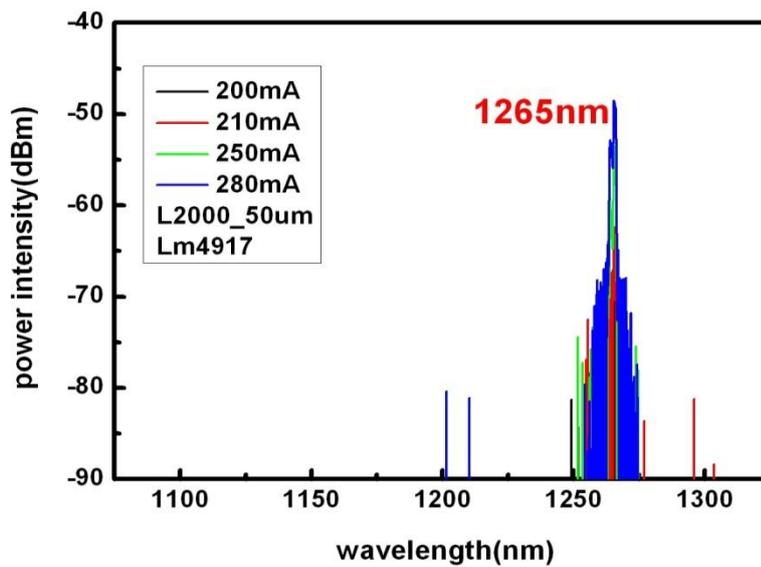


圖 4-19 LM4917 L2000\_50  $\mu\text{m}$  光頻譜圖

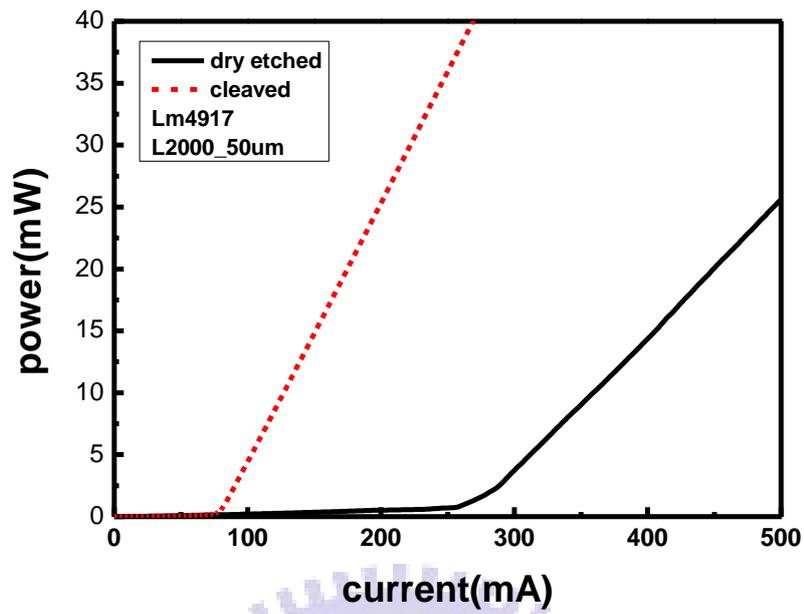


圖 4-20 LM4917 L-I-V 特性曲線比較

代入式(2.21)可得此雷射之鏡面損失為  $31.8\text{cm}^{-1}$ 。詳細雷射特性整理如表 4-5 所示。

L2000 50um	$\eta_d$	$G(\text{cm}^{-1})$	$J_{th} (\text{A}/\text{cm}^2)$	$\alpha_m + \alpha_{scattering}(\text{cm}^{-1})$
Dry etched mirror	0.11	34.8	245.33	31.8
Cleaved mirror	0.21	10.70	79.14	5.7(= $\alpha_m$ )

表 4-5 LM4917 基本雷射特性

### 4.2.3 Far-field pattern

在此我們以量子點結構 LM4917，共振腔長度  $2000\ \mu\text{m}$ ，雷射寬度為  $20\ \mu\text{m}$  為例。此時自然劈裂面之 far-field pattern，如圖 4-21 所示，接下來由圖 4-22 分析可得知此結構之水平發散角度  $\theta_{\parallel} = 4.6^{\circ}$ ，而垂直發散角  $\theta_{\perp} = 53.2^{\circ}$ 。相較於乾式蝕刻之 far-field pattern，如圖 4-23 所示，雷射光強較微弱，應是基板反射及吸收所致，而圖 4-23 中也可發現，雷射光分成上下兩部分，下方為原始雷射光，而上方面較不明顯之雷射光為基板反射所致。

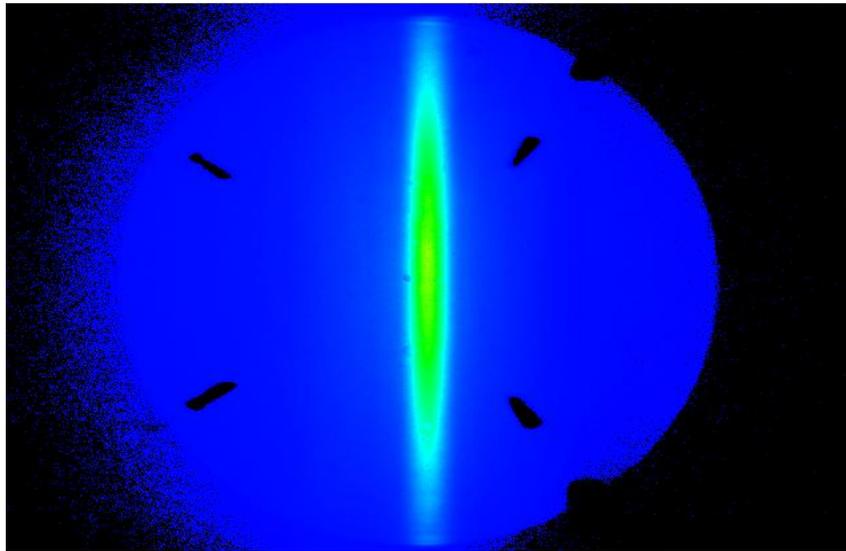


圖 4-21 LM4917 L2000\_20  $\mu\text{m}$  cleaved far-field pattern

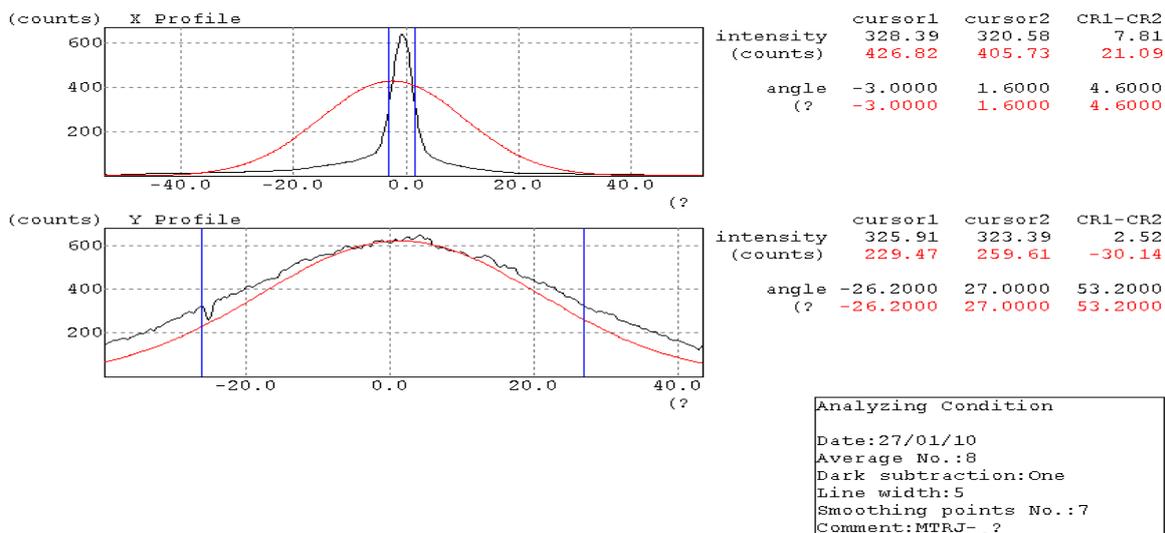


圖 4-22 LM4917 L2000\_20  $\mu\text{m}$  cleaved far-field pattern 角度分析

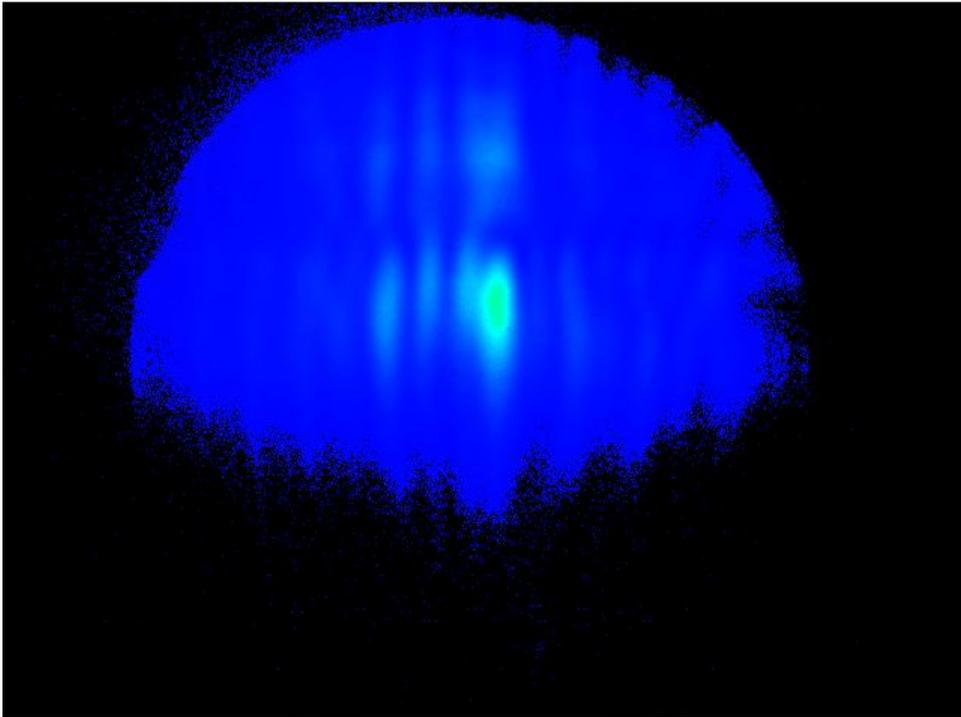


圖 4-23 LM4917 L2000\_20  $\mu\text{m}$  dry etched far-field pattern



## Chapter 5 結論與未來展望

本研究經過蝕刻條件最佳化的測定之後，利用電感耦合電漿蝕刻反應室離子蝕刻機搭配  $\text{Si}_3\text{N}_4$  作為 GaAs 蝕刻之 hard mask，採用新的製程方式，首先運用量子井雷射做測試，可成功製作出乾式蝕刻鏡面量子井邊射型雷射。接下來利用相同的製程模式以量子點結構取代量子井，亦可成功製作出乾式蝕刻鏡面量子點邊射型雷射。三種不同雷射特性比較表如表 5-1 所示。

	Lm4803 QW	Lm4903 QD(7layers)	Lm4917 QD(5layers)		
L( $\mu\text{m}$ )	1000	2000	2000		
W( $\mu\text{m}$ )	20	20	10	20	50
$\lambda(\text{nm})$	1007 (GS)	1306 (GS)	1179 (ES)	1184 (ES)	1265 (GS)
$J_{\text{th}}(\text{A}/\text{cm}^2)$	220	425.00	746.45	507.7	266.91
E.Q.E	0.031	0.016	0.084	0.126	0.115
$\alpha_{\text{m}}(\text{cm}^{-1})$	62.78	41.74			31.80

表 5-1 雷射特性比較表

由表 5-1 可得知，在經過製程熟練度的改善與蝕刻深度加深時鏡面的改善，對於量子點雷射特性如量子微分效率與鏡面損耗皆有顯著改善。

未來對乾式蝕刻鏡面量子點雷射進一步的探討，可針對蝕刻條件上的最佳化，並改善基板吸收及反射等問題，以期達到乾式蝕刻鏡面量子點雷射之最佳化。

## Reference

- [1] S. C. Horst, S. Agarwala, O. King, J. L. Fitz, and S. D. Smith, "GaAs/AlGaAs ridge lasers with etched mirrors formed by an inductively coupled plasma reactor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, p. 1444, 1997.
- [2] E. Aperathitis, D. Cengher, M. Kayambaki, M. Androulidaki, G. Deligeorgis, K. Tsagaraki, Z. Hatzopoulos, A. Georgakilas, "Evaluation of reactive ion etching processes for fabrication of integrated GaAs/AlGaAs optoelectronic devices," *Mat. Sci. Eng., B*, vol. 80, p77, 2001.
- [3] G. Park, O. B. Shchekin, D. L. Huffaker, and D. G. Deppe, "Low-threshold oxide-confined 1.3- $\mu\text{m}$  quantum-dot laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, p. 230, 2000.
- [4] O. B. Shchekin, and D. G. Deppe, "1.3 $\mu\text{m}$  InAs quantum dot laser with  $T_0 = 161$  K from 0 to 80 $^\circ\text{C}$ ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, p. 3277, 2002.
- [5] P. Buchmann, and H. Kaufmann, "GaAs Single-Mode Rib Waveguides with Reactive Ion-Etched Totally Reflecting Corner Mirrors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 3, p. 785, 1985.
- [6] 羅正忠 張鼎張, "半導體製程技術導論" 台灣培生教育出版有限公司, 2007
- [7] Sambhu Agarwala, Oliver King, Scott Horst, Rick Wilson, and Dennis Stone. "Response surface study of inductively coupled plasma etching of GaAs/AlGaAs in  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2$ ," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 17, p. 52, 1999.
- [8] Sambhu Agarwala, Scott C. Horst, Oliver King, Rick Wilson, and Dennis Stone, "High-density inductively coupled plasma etching of GaAs/AlGaAs in  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$ : A study using a mixture design experiment," *J. Vac. Sci. Technol.*, B, vol. 16, p. 511, 1998.
- [9] L. Zhang, L. F. Lester, R. J. Shul, C. G. Willison, and R. P. Leavitt, "Inductively

coupled plasma etching of III–V antimonides in  $\text{BCl}_3/\text{Ar}$  and  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ ,”

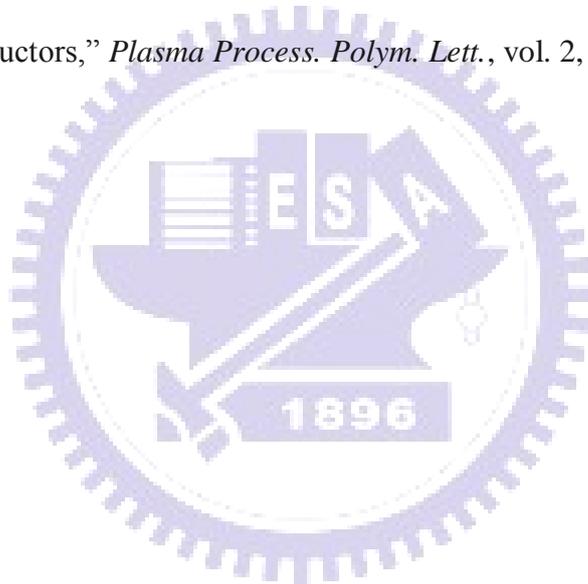
*J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 17, p. 965, 1999.

[10] 李鴻志, “高密度電漿蝕刻 III-V 族半導體材料化學技術分析,” 半導體科技, 2000

[11] 盧廷昌 王興宗, “半導體雷射導論” 五南出版社, 2008

[12] J. W. Lee, M. W. Devre, B. H. Reelfs, D. Johnson, and J. N. Sasserath, F. Clayton, D. Hays, and S. J. Pearton, “Advanced selective dry etching of GaAs/AlGaAs in high density inductively coupled plasmas,” *J. Vac. Sci. Technol.*, A, vol. 18, p. 220, 2000.

[13] Stephen J. Pearton, David P. Norton, “Dry Etching of Electronic Oxides, Polymers, and Semiconductors,” *Plasma Process. Polym. Lett.*, vol. 2, p. 16, 2004.



## 簡歷(Vita)

姓名：王曉微 (Hsiao-Wei Wang)

性別：女

出生年月日：民國 72 年 7 月 15 日

學歷：

元智大學電機工程系學士 (92.9~96.6)

國立交通大學電子研究所碩士班 (96.9~99.2)

碩士論文題目：

以乾式蝕刻鏡面製作砷化銦量子點之邊射型雷射

Fabrication of InAs quantum dot edge emitting lasers with dry etched mirror.

