

國立交通大學

電子工程學系電子研究所

碩士論文

半導體量子點雷射之研究

Studies of Semiconductor Quantum Dot lasers



研究生：楊仁盛

指導教授：李建平 教授

中華民國九十四年六月

半導體量子點雷射之研究
Studies of Semiconductor Quantum Dot lasers

研究生：楊仁盛 Student：Jen-Sheng Yang

指導教授：李建平 博士 Advisor：Dr. Chien-Ping Lee



Submitted to Department of Electronics Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in
Electronics Engineering
June 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年六月

半導體量子點雷射之研究

學生：楊仁盛

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

本實驗以InAs/GaAs材料做成自聚性的量子點，形成量子點雷射的主動層。在雷射製程方面我們利用氧化的方式，將高Al含量的上覆蓋層(cladding layer)氧化，形成脊狀結構(ridge structure)雷射，其同時具有電流侷限與光侷限的功能，而在製程上其自我對準的特性(self-align)，具有簡化製程步驟的優點。

實驗中，我們對不同的雷射樣品做量測，均觀察到基態(ground state, GS)與激發態(excited state, ES)同時雷射的現象，並且觀察到基態與激發態的臨界電流比值 I_{th}^{ES}/I_{th}^{GS} 對共振腔長度(cavity length)與溫度的相依性，另外我們也估算得樣品lm4354與lm4378的intrinsic relaxation time分別為 $\tau_0 \sim 40ps$ 與 $4ps$ ，其中lm4354雷射樣品具有極低的透明電流密度 $J_{tr} \sim 6A/cm^2$ (per layer)，追平目前已知文獻上所記載的紀錄^[1]。

另外我們也觀察到ES波峰先出現，電流持續增加，GS波峰隨後才出現的情形，這與一般觀察到的波峰出現順序有所不同，我們也針對此現象作定性的解釋。

Studies of Semiconductor Quantum Dot lasers

Student: Ren -Sheng Yang

Advisor: Dr. Chien-Ping Lee

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

Abstract

The laser structures under investigation are grown by molecular beam epitaxy(MBE) in a separate confinement heterostructure (SCH) geometry with the active region based on three layers of self-assembled InAs quantum dots. For laser diodes, the stripes are used to mask etching of shallow mesas and expose the top surface of the $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ upper confining layer for thermal oxidation. The thermal oxidation of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ layers with high Al content in water vapor forms a stable oxide which is suitable for current and optical confinement in laser structures.

We also demonstrate simultaneous lasing at two well-separated wavelength in self-assembled InAs quantum-dot lasers, via the ground-state(GS) and excited-state (ES) transitions. The effect strongly depends on the cavity length and temperature. The intrinsic relaxation time of samples lm4354 and lm4378 are 40ps and 4ps, respectively. lm4354 lasers show very low transparency current densities of 6 A/cm^2 per dot layer, and it is almost the best record presently.

Finally, we discuss the phenomena in which ES and GS peak appears. This is very different with the generous cases that GS peak appears first. We explain this behavior qualitatively.

致謝

時光回遡到兩年前，張至揚學長引領我去面見老師，當時的我因為生性膽怯並沒有太多的提問，不過老師以爽朗的笑容和風趣的談話讓我為感覺到老師果然具有一代宗師的風範。時光轉眼流逝，兩年已經過去，這些日子以來，老師不只拓展我在知識上的視野，更讓我明白要成為好的研究者所應該具備的熱情及做事態度。論文的完成，我最感謝老師的身教以及言教。

感謝王興燁學長長試片給我，並且與我討論雷射方面的問題，帶我一起解決多項難題。學長對研究的衝勁與幹勁諸多受到學弟的景仰。

感謝李秉奇與林志昌學長時常與我們討論研究上所遇到的問題，並且對學弟們的生活與感情也上多有關心和照顧，也祝福你們早日覓得良緣；感謝林國瑞學長給予學弟多方面的指導與幫助，並且幫助我克服許多研究上的瓶頸；感謝 MBE 超強團隊、李秉其、林志昌、王興燁、羅明成、凌鴻緒、林大均、對我們實驗室付出的心血與努力，使我們實驗室日漸蓬勃壯大、欣欣向榮。

卡緒、大雄、阿福，我們是同梯的的伙伴，在這兩年裡面，我們每個人都非常努力，並且相互幫助與扶持，終於等到開花結果的一天。在人生的這個階段，我們相互鼓勵，也希望在未來能互相提攜。感謝宗樺學弟，願意分擔我的工作，幫助我順利完成論文。感謝清揚學弟熱情的與我討論，助我良多。

依玲，感謝你在我落寞或是失意的時候逗我開心，有了你的支持，相信在我未來我會走的更穩健踏實。

感謝我的父母與家人，你們的支持讓我無後顧之憂，有了你們的支持我的所作所為才具有意義。

目錄

第一章	簡介.....	01
第二章	基本概念.....	03
2.1	雷射特性.....	03
2.2	量子點與量子點雷射的基本特性.....	05
2.3	速率方程式(rate equations).....	07
2.4	III-V 族半導體的氧化成長.....	09
第三章	半導體雷射製程與量測.....	14
3.1	雷射之磊晶結構.....	14
3.2	量子點雷射二極體製程.....	14
3.3	雷射特性量測系統.....	17
第四章	量測結果與討論.....	24
4.1	1m4378 寬面積雷射資料與參數.....	24
4.2	1m4354 寬面積雷射資料與參數.....	27
4.3	氧化製程脊狀結構雷射.....	29
4.4	激發態波峰先出現，接著基態波峰才出現.....	30
第五章	結論.....	53
參考資料	54

圖目錄

圖 1-1 量子結構雷射起始電流的發展。

圖 2-1(a)各種量子侷限結構之能態密度函數。

(b)理想情況下之量子點電子濃度分佈。

(c)考慮 inhomogeneous broaden 下的電子濃度分佈。

圖 2-2 增益隨電流變化之關係圖。

圖 2-3 (a) $J_{th}=GS$ component + ES component ,

(b)作 J_{th} 對 q 做圖利用eqn(2a)做擬合。

圖 2-4 η_D^{-1} 對 L 做圖，利用方程式 2.7(a)(b)做擬合。

圖 3-1 1m4354 能帶結構圖。

圖 3-2 1m4378 能帶結構圖。

圖 3-3 氧化之脊狀雷射結構 SEM 圖。

圖 3-4 氧化之脊狀雷射結構示意圖。

圖 3-5 脊狀結構製程流。

圖 3-6 氧化製程的爐管配製圖。

圖 3-7 氧化速率量測。

圖 3-8 氧化 SEM 圖。

圖 3-9 LI 曲線量測系統圖。

圖 3-10 (a)雷射輸出光譜量測系統圖。

(b)I-V 曲線量測系統圖。

圖 4-1(a)1m4378 LI-curve , $W=20\mu m$, $L=1.4mm$ 。

(b)1m4378 之頻譜量測，對應 4-1(a)的 LI-curve。

圖 4-2 所示為 1m4378 的 LI-curve。

L=(a)1.1mm(b)1.2mm(c)1.3mm(d)1.4mm(e)1.5mm。針對不同的 L，做變溫量測。

圖 4-3 定性解釋 I_{th}^{ES}/I_{th}^{GS} 比值隨共振腔長度增加而增加。

圖 4-4(a) 對 η_D^{-1} -L 圖，作線性分析。

圖 4-4(b) 利用方程式 2.7(a) 對 η_D^{-1} -L 圖做擬合。

圖 4-4(c)，利用方程式 2.6(a) 對 Jth-q 圖做擬和。

圖 4-5，1m4354 LI-curve(a)L=1.7mm，

圖 4-5，1m4354 LI-curve(b)L=2.0mm，

圖 4-5(c)L=2.0mm，

圖 4-5(d)L=3.0mm。 $J_{th} < 10A/cm^2$ 。

圖 4-6 所示為 1m4354 的 LI-curve。

L = (a)1.7mm，(b)2.0mm，(c)2.5mm，(d)3.0mm，(e)3.5mm。針對不同的 L，做變溫量測。

圖 4-7(a)4354 頻譜，L=1.7mm，W=20um，T=20°C。

圖 4-7(b)4354 頻譜，I=200mA→340mA

圖 4-8(a)1m4354，對 η_D^{-1} -L 圖，作線性分析。

圖 4-8(b) 利用方程式 2.7(a) 對 η_D^{-1} -L 圖做擬合。

圖 4-9，利用方程式 2.6(a) 對 Jth-q 圖做擬合。

圖 4-10(a)氧化結構雷射截面圖，L=2.5mm，W=17um

圖 4-10(b)氧化結構雷射截面圖，L=2.5mm，W=7um

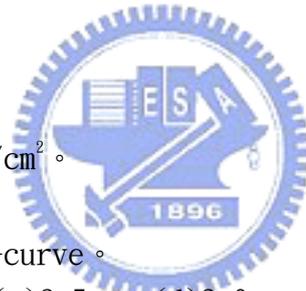


圖 4-11，對應圖 4-10 的 LI-curve，並且附上對應的發光波長。

圖 4-12， $L=5.0\text{mm}$ ， $W=7.5\mu\text{m}$ ，雷射維持在 GS-lasing。

圖 4-13(a)，4378 脊狀結構雷射頻譜，圖上分別為 20°C 與 25°C 的量測。

圖 4-13(b)電流在 $104\text{mA}\sim 190\text{mA}$ 區間，兩個波峰均維持穩定的存在。

圖 4-13(c)電流持續增加直到最後基態波峰逐漸消失。

圖 4-14，在電流增加的情況下，總損耗下降，於是在 ES-lasing 發生後，有機會讓 GS-lasing 接著發生。

圖 4-15 該元件 SEM 影像。

圖 4-16 (a) 溫度降到 12°C 與 16°C ，重新量測該元件之雷射頻譜。

圖 4-16(b)，承上圖電流加到 $97\sim 153\text{mA}$

圖 4-16(c)，基態波峰在高電流下逐漸消失。

圖 4-17，在溫度由 20°C 降到 16°C 的情況下， f_{GS} 值增加，因此有較高的 G_{GS} 值，於是在低溫的情況下 G_{GS} 大於總損耗，因此轉為 GS 先雷射。

第一章 簡介

量子點雷射是量子點結構中最重要的應用之一，量子點雷射原本稱作量子箱 (quantum-box laser) 雷射，是由Arakawa和Sakaki在1982年時首次做出，在量子點中，電子和點洞的三個維度都被侷限 (confinement)，這使我們相信可以有效的改進半導體雷射的特性。

以量子點當作主動層的半導體雷射，稱為量子點雷射，由於是三維方向都被侷限的情況，理論上會有分離 (discrete) 的態密度 (density of state)，高的差動增益 (differential gain)。量子點雷射相較於量子井元件有以下的優點：(1) 低透明電流密度 (low transparency current density) 與低起始電流密度 (low threshold current density)^[2]，(2) 高特徵溫度 (characteristic temperature)^{[3][4]}，(3) 窄的光譜，和 (4) 大調變頻寬 (modulation bandwidth)。綜合以上優點，可預期量子點雷射在未來會有很好的產品發展。

本實驗我們以InAs/GaAs材料拿來做成自聚性的量子點，主要是因為這種量子點所發出來的波長可以在1.3 μm 附近，對於玻璃光纖來說，會有最小的色散 (dispersion)，應用在光纖通訊的領域中，應該會有很好的發展潛力。

在雷射製程方面我們利用氧化的方式，將高Al含量的上覆蓋層 (cladding layer) 氧化，形成脊狀結構 (ridge structure) 雷射，其同時具有電流侷限與光侷限的功能，而在製程上其自我對準的特性 (self-align)，具有簡化製程步驟的優點。

實驗中，我們對不同的雷射樣品做量測，均觀察到基態 (ground state, GS) 與激發態 (excited state, ES) 同時雷射的現象，並且觀察到基態與激發態的臨界電流比值 $I_{\text{th}}^{\text{ES}}/I_{\text{th}}^{\text{GS}}$ 對共振腔長度 (cavity length) 與溫度的相依性，另外我們也估算得樣品 lm4318 與 lm4354 的 intrinsic relaxation time 分別為 $\tau_0 \sim 4\text{ps}$ 與

40ps，其中lm4354 雷射樣品具有極低的透明電流密度 $J_{tr} \sim 6A/cm^2$ (per layer)，追平目前已知文獻上所記載的紀錄^[1]。如圖 1-1 所示為量子結構雷射起使電流的發展，在本實驗中(2005 年)已達到起使電流密度小於 $10A/cm^2$ 。

另外我們也觀察到激態波峰先出現，電流持續增加，基態波峰隨後才出現的情形，這與一般觀察到的波峰出現的順序有所不同，我們也針對此現象作定性的解釋。

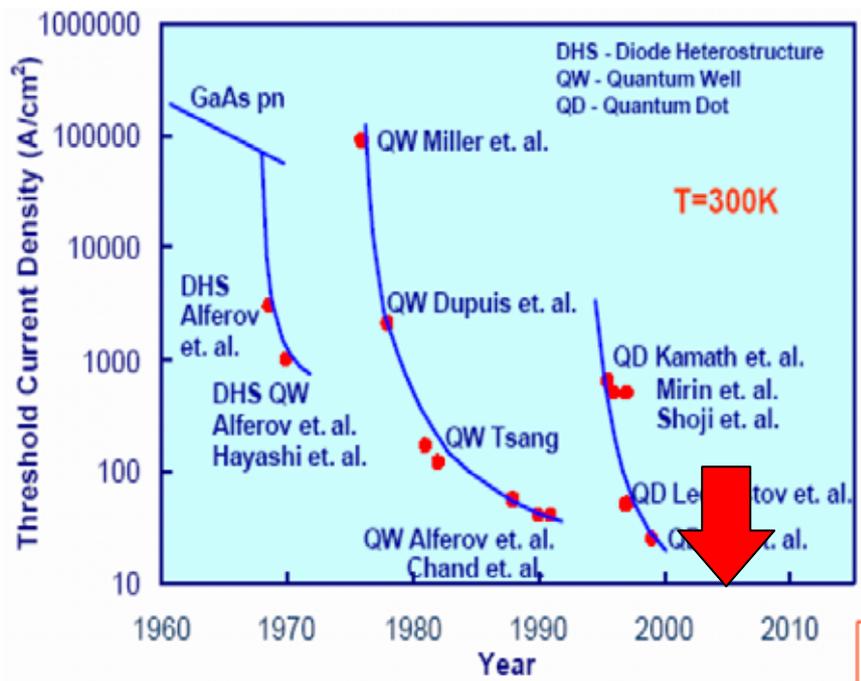


圖 1-1 量子結構雷射起始電流的發展。

基本概念

2.1 雷射特性

我們可以經由量測 LI 曲線萃取其參數來辨別雷射的好壞，首先我們對這些特性及參數做一些介紹。

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 $[(E_{FC} - E_{FV}) > h\nu]$ ，使受激輻射率大於吸收率而產生增益 (Gain, G)，當增益能夠克服總損耗 (total loss) 時，即達到雷射的共振條件。其發光的機制，由自發性的發光 (spontaneous emission)，轉變成為激發性發光 (stimulated emission) 為主時，外加電場對雷射所產生的電流 I_{th} ，就稱之為起始電流 (Threshold Current)，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)

當少數載子注入活性層後，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，載子在活性層內產生出光子的比例，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，一部份在鏡面中穿透

形成雷射光輸出，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)：

$$\begin{aligned} \eta_D &= \frac{\text{單位時間射出之總光子差額}}{\text{單位時間注入之總電子差額}} \\ &= \eta_i \cdot \frac{\Delta P_{ext}}{\Delta P_{ext} + \Delta P_{int}} = \eta_i \cdot \frac{\frac{1}{L} \ln R}{\alpha_i + \frac{1}{L} \ln R} \end{aligned}$$

將 P_{out} 對I做微分，並帶入上面的結果，可以得到

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

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

從上式可以得到，在我們量得的L-I曲線，大於起始電流後的曲線斜率，只和差額量子效率，相差了一個常數項，因此我們可以直接藉由測量L-I特性曲線，來觀察雷射的這項特性。並從 η_D 對 $1/L$ 的作圖可求 α_i 與 η_i 。 α_i 是光行進中在雷射內部的損失(internal loss)，包括了自由電子吸收(Free-carrier absorption)，介面及不規則結晶層(Nonplanar Heterstructure Interface and Imperfection in the Dielectric Layers)所造成的散射(Scattering)。

2.2 量子點與量子點雷射的基本特性

目前量子點的結構多採用 SK(Stranki-Krastanov)模式自聚性 (self-assembled)量子點成長，這種成長是發生在界面能低，但晶格常數有很高的不匹配(lattice mismatch)的兩材料間，通常兩種材料間的晶格不匹配會使磊晶受到張力，但因為有較低的界面能，剛開始會以層狀結構方式長晶，若磊晶厚度高於張力所能承受的臨界厚度，薄膜會破裂而產生缺陷，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，這樣可得到無缺陷的量子點，因此會有較佳的光電特性，目前常見的自聚性量子點有第四族的鍺(Ge)成長於矽(Si)，三五族的砷化銦(InAs)成長於砷化鎵(GaAs)及二六族的硒化鎘(CdSe)成長於硒化鋅(ZnSe)等。



量子點是將電子侷限在零維空間內，其最大的好處在於其能階成不連續分佈，和電子及電洞的波函數重疊在一起，能階不連續使其態密度(density of state)成 delta function 分佈，在固定的態時，有最大的效率。但實際在長量子點時，量子點的大小是不均勻的，所以做出的元件並不像理論值一般完美。而量子點所發出的光譜，主要由量子點的大小和形狀來控制。就大小尺寸來說，量子點的高度主要決定了基態發光的波長，橫向的尺寸主要決定基態及激發態之間的能量差，所以控制 strained layer 磊晶條件，就可以控制基態和激發態之間的能量差。

本實驗是用分子束磊晶(MBE)的方法，長成 InAs/GaAs 自聚性量子點，波長介於 0.98 到 1.8 μm 之間，在應用上可以製作光纖通訊所

需之 $1.3\mu\text{m}$ 。

量子點能階呈不連續分佈，其態密度成 delta function 分佈，如圖 2-1(a) 所示，這可以讓量子點雷射有很低的起使電流及很高的特性溫度。而圖 2-1(b) 所示，

$$n(E) = g(E)f(E)$$

電子濃度分佈主要由其態密度函數與 Fermi-Dirac distribution 所決定，在基態與激發態能階上均有電子濃度分佈。而電子濃度分佈則對應到我們所關心的增益函數 (gain function) 分佈。在實際的情況下，自聚性模式所長出來的量子點大小與形狀並不會完全一致，有一定程度的不均勻性，如圖 2-1(c) 所示，其造成態密度函數在能量軸上具有一定程度的分佈範圍，(一般 inhomogeneous line-width 約 $30\sim 50\text{meV}$)，對應地，基態與激發態具有各自的增益波峰，其大小與分佈除了與態密度函數有關之外，也和溫度與偏壓大小有關。

量子點雷射基態所供應的能階位置 (sites) 有限，因此其增益會達到飽和，

$$G_{GS} = G_{GS}^{\text{sat}} (2f_{GS} - 1)^{[5]}$$

G_{GS} 代表基態增益， G_{GS}^{sat} 為基態飽和增益， f_{GS} 是基態的能階位置填充率 (the occupancy of the QD ground state)，其中 G_{GS}^{sat} 與量子點的密度有直接的關係，一般的量子點密度落於 $10^{10}\sim 10^{11}$ 之間，其對應的基態飽和增益值則約為 $4\sim 5\text{ cm}^{-1}$ ，而本實驗的所使用的雷射均為三層的量子點結構，對應的 G_{GS}^{sat} 值約落在 $12\sim 15\text{ cm}^{-1}$ 。當 f_{GS} 值等於 1 時， $G_{GS} = G_{GS}^{\text{sat}}$ ，但

一般的情況下 f_{GS} 值會小於 1，其最大可達的填充率 f_{GS}^{max} 與溫度有關。如圖 2-2 所示，在基態增益達飽和的情況下，即使持續增加電流，益無法使之克服總損耗，因此對較短的共振腔來說，只有激發態增益能在較高電流的情況下能夠克服總損耗達到雷射共振條件。

2.3 速率方程式(rate equations)

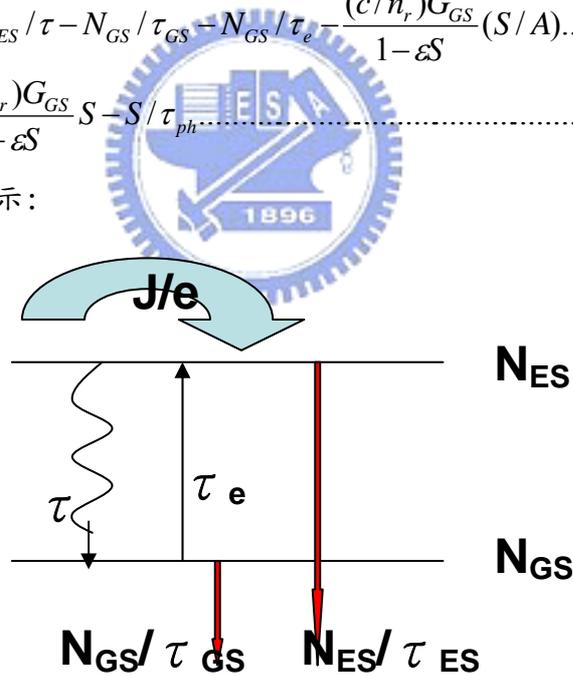
我們試圖去估算 intrinsic relaxation time，以下我們參考 Zhukov 等人在 [5] 中所提出的 Rate equations:

$$dN_{ES}/dt = J/e - N_{ES}/\tau + N_{GS}/\tau_e \dots\dots\dots(2.1a)$$

$$dN_{GS}/dt = N_{ES}/\tau - N_{GS}/\tau_{GS} - N_{GS}/\tau_e - \frac{(c/n_r)G_{GS}}{1-\epsilon S}(S/A) \dots\dots(2.1b)$$

$$dS/dt = \frac{(c/n_r)G_{GS}}{1+\epsilon S} S - S/\tau_{ph} \dots\dots\dots(2.1c)$$

對應之關係如下圖所示：



其中

J : injection current density

N_{ES} :the carrier density on ES level

N_{GS} : the carrier density on GS level

τ_{ES} : the recombination lifetime on ES
 τ_{GS} : the recombination lifetime on GS
 τ : the relaxation time
 τ_e : the thermoionic emission time from GS
 G_{GS} : the modal gain for the GS lasing
 ϵ : the nonlinear gain coefficient
 A : the area of active region
 S : the number of photon in the cavity
 τ_{ph} : the photon lifetime in the cavity
 配合下列之假設:

$$G_{GS} = G_{GS}^{sat} (2f_{GS} - 1) \quad (2.2)$$

其中基態增益 G_{GS} 為 f_{GS} 的函數，當 $f_{GS}=0.5$ 時， G_{GS} 為零，當 $f_{GS}=1$ 時， $G_{GS}=G_{GS}^{sat}$ 。

$$N_{GS} = 2n_{QD}f_{GS} \quad (2.3)$$

N_{GS} 益為 f_{GS} 的函數，其中 n_{QD} 是量子點的密度，乘 2 代表每各量子點的 GS 能階可填兩個電子。

$$(\tau)^{-1} = (1 - f_{GS})(\tau_0)^{-1} \quad (2.4)$$

其中 τ 稱為 relaxation time， f_{GS} 是 the occupancy of the QD ground state， τ_0 稱為 intrinsic relaxation time，當 f_{GS} 等於零， $\tau = \tau_0$ 。

由 rate equation(2.1c)可得

$$(\tau_{ph})^{-1} = (c/nr) \alpha \quad (2.5)$$

其中 $\alpha = \alpha_i + \alpha_m$ 稱為總損耗(total loss)。

考慮steady state的情況，配合上述的假設，可推導出GS的臨界電流密度 J_{th}^{GS}

$$J_{th}^{GS} = J_0(1+q) + J_1(1+q)/(1-q) \quad (2.6a)$$

其中 $J_0 = (en_0D)/\tau_{GS}$ (2.6b)

$$J_1 = J_0(2\tau_0/\tau_{ES})(1 + \tau_{GS}/\tau_e) \quad (2.6c)$$

$$q = \alpha/G_{GS}^{sat} \quad (2.6d)$$

q 稱為 the normalized optical loss

當 $q=0$, $J_{th}^{GS} = J_0 + J_1 = J_{tr}$ (transparency current)，因此，由實驗數據作 J_{th}^{GS} 對 q做圖利用eqn(2a)做擬合，可得到雷射參數 J_{tr} 、 τ_e (若 τ_0 、 τ_{ES} 、 τ_{GS} 已知，一般情況可假設 τ_{ES} 、 $\tau_{GS} \sim 1ns$)，如圖 2-3(a)(b)所示

考慮基態雷射所發出的光，由 $\eta_D = (2e/h\nu)(dP_{out}/dI)$ 可得到

$$\eta_D = \eta_i(q) (1 - q_{in}/q)$$

(2.7a)

$$\text{其中 } \eta_i(q) = [1 + (2\tau_0/\tau_{ES})/(1-q)]^{-1} \quad (2.7b)$$

其中internal quantum efficiency、 η_i 是loss q的函數。當我們設定 $\tau_{ES} = 1ns$ ，則 τ_0 是唯一需要擬合估算的參數。如圖 2-4 所示。

2.4 III-V 半導體的氧化成長

在雷射製程方面我們利用氧化的方式，將高Al含量的上覆蓋層(cladding layer)氧化，形成脊狀結構(ridge structure)雷射，其同時具有電流侷限與光侷限的功能，而在製程上其自我對準的特性(self-align)，具有簡化製程步驟的優點。^{[6]-[9]}

氧化速率與Al的含量有關，隨著Al含量增加，氧化速率也會指數式的增加，因此可利用調變Al含量，做選擇性的氧化(oxidation selectivity)。此外亦有研究指出氧化速率與異質結構介面(heterointerface structure)造成的應力(stress)有關。^{[10][11]}

由本實驗的量測結果所示氧化速率為線性成長定律(linear growth law)，在許多參考資料中均有討論氧化速率的動態機制，真對在不同的條件下，氧化速率可能遵循線性成長定律或拋物線成長定律(parabolic growth law)，在相對低溫氧化時間不長的情況下，氧化速率主要受限於反應速率(reaction rate)，此時遵循線性成長定律，然而，在時間較長或是相對高溫之下，通過氧化層的擴散速率則成為主宰的機制，此時遵循拋物線成長定律。^[12]

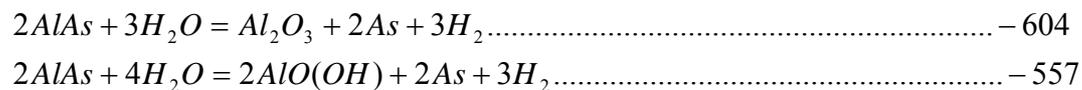
在本實驗中利用了AlGaAs中AlAs成分和水氣做氧化反應，氧化的反應式及其自由能(free energy)如下：^[13]

初反應式



自由能[kJ/mole]

最終反應式



自由能[kJ/mole]

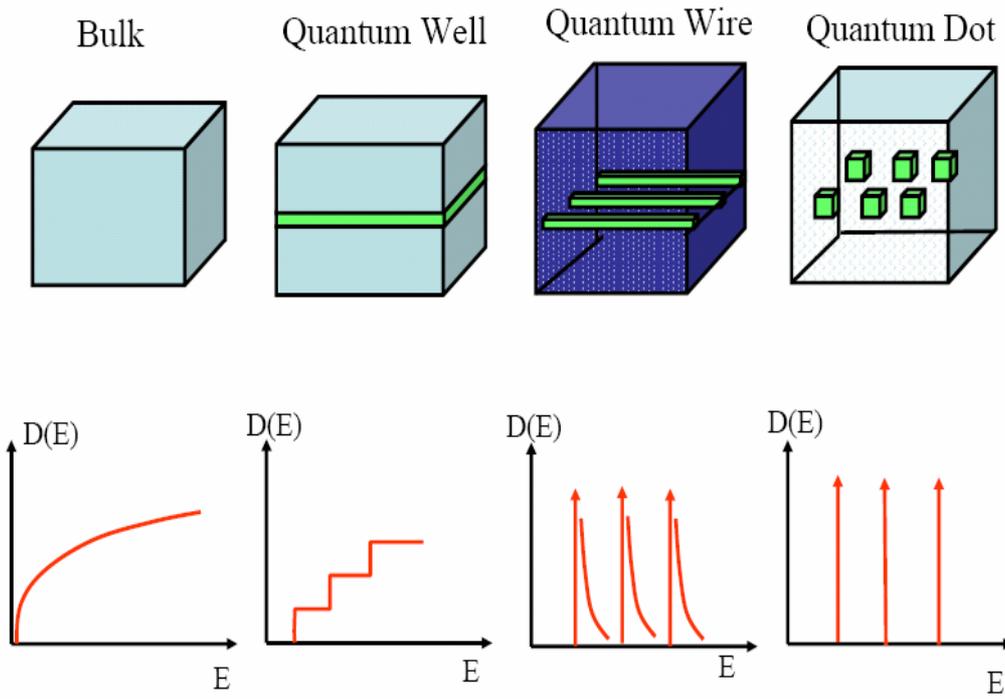


圖 2-1(a) 各種量子侷限結構之能態密度函數。

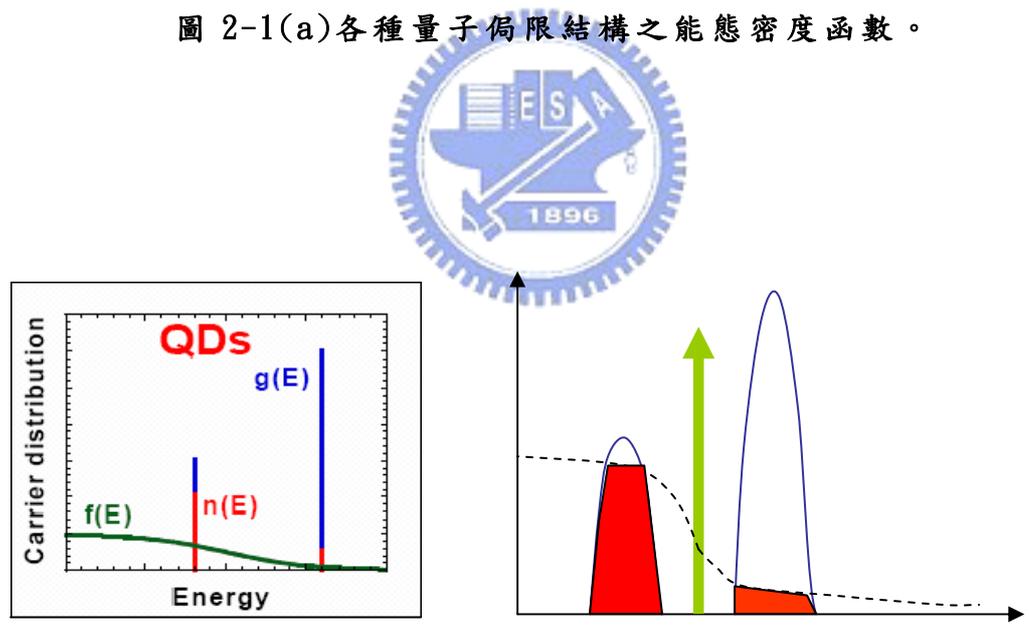


圖 2-1(b) 理想情況下之量子點電子濃度分佈。(c) 考慮 inhomogeneous broaden 下的電子濃度分佈。

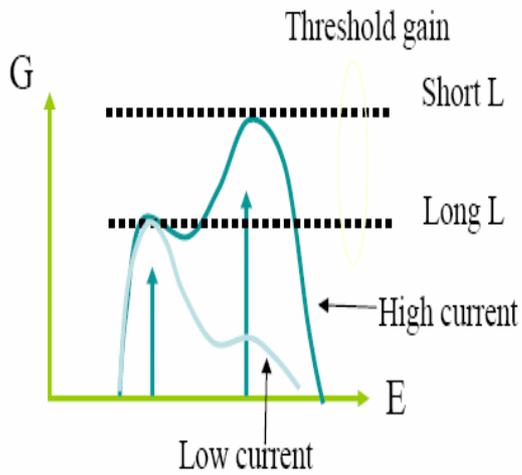


圖 2-2, 增益隨電流變化之關係圖。

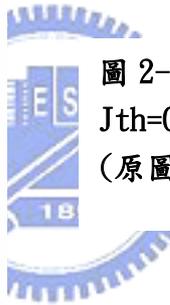
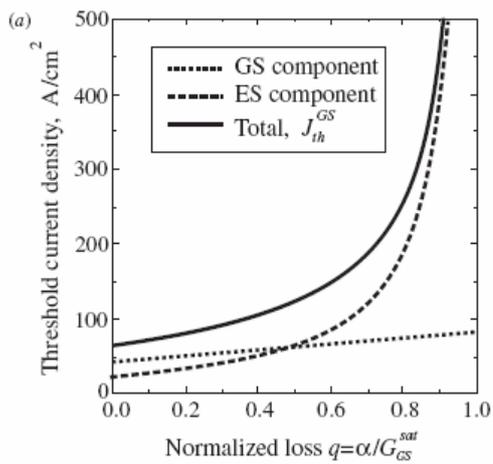


圖 2-3(a),
 $J_{th} = \text{GS component} + \text{ES component}$
 (原圖來自參考資料 5)

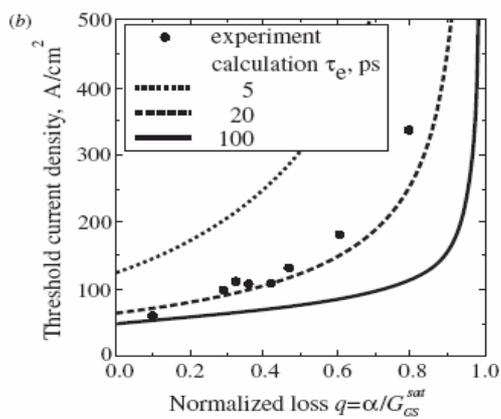


圖 2-3(b), 作 J_{th} 對 q 做圖利用
 eqn(2a) 做擬合。(原圖來自參
 考資料 5)

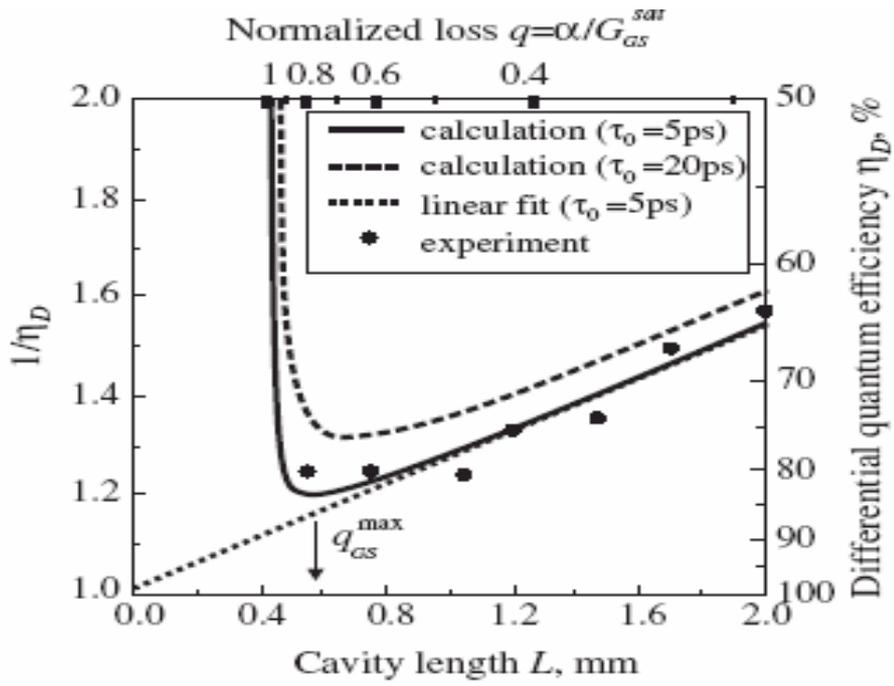


圖 2-4 ， η_D^{-1} 對 L 做圖，利用方程式 2.7(a)(b) 做擬合。
 (原圖來自 [參考資料 5](#))



第三章

半導體雷射製程與量測

3.1 雷射之磊晶結構

晶片的成長是使用分子束磊晶法(Molecular beam epitaxy ; MBE)，磊晶結構如圖 3-1、3-2 所示，試片編號分別為LM4378 與LM4354。LM4354 主動層結構為三層的量子點，每層的量子點密度約在 2×10^{10} 左右，整體結構包含了兩個 AlGaAs 覆蓋層(Cladding layer)以及一個夾在GaAs隔離層(Spacer layer)中的主動層。而高Al含量的覆蓋層，是為了提高氧化速率，Al的含量與氧化速率的關係呈指數式成長。試片LM4378 的主動層為dot-in-well結構。^[14]



3.2 量子點雷射二極體製程

本實驗分為兩種製程方式：一、寬面積(broad area)雷射二極體的製程，是沿用實驗室學長所傳下來的步驟，本實驗中所提及的寬面積雷射，共振腔寬度均為 20um；二、脊狀波導(Ridge-waveguide)結構，同時具有 index guiding 以及限制電流發散的功能。在此我們成功的利用氧化的製程方式，來製作脊狀結構的雷射二極體，如圖 3-3 與圖 3-4 所示。主要是利用高 Al 含量的上覆蓋層(upper cladding layer)在氧化之後，形成自然的絕緣阻擋層，其具有自發性對齊(self-align)與良好的光波導侷限等優點

圖 3-5 為製程流程圖，製程說明如下，

最初清潔

由於我們所使用的晶片，是由 MBE 所長的晶片，非常的乾淨，並

不需要繁雜的潔淨步驟，初步的潔淨步驟將晶片先泡在丙酮(ACE)中，再用去離子水(D. I. Water)沖洗，氮氣槍吹乾。

微影製程

首先去水烘烤，去除晶片上水氣。接著旋轉覆蓋上光阻，軟烤。曝完光後，使用的顯影液為 AZ6112，之後用去離子水定影。

蝕刻

在雷射條紋做出後，我們將未覆蓋光阻的地方蝕刻約 10 秒到 20 秒，目的在於蝕刻掉表面的歐姆接觸層(p+ contact layer)使得高 Al 含量的上覆蓋層能夠裸露出來以便下一步的氧化製程進行。我們用的蝕刻溶液是硫酸水溶液。在蝕刻完成之後，應該立即做氧化製程，確保表面潔淨且沒有原生氧化層形成。



氧化

爐管設置如圖 3-6 所示，首先將爐管升溫至 480°C，在升溫的過程中，通入氮氣目的在於潔淨爐管內部環境。為了避免水蒸氣在傳輸的過程中凝結，我們必須在管路上纏上加熱帶，爐管兩側的加熱帶溫度以不超過 200°C 為原則，水瓶(bubble)出口處的加熱帶以不超過 150°C 為原則，避免因溫度過高而融掉導氣管。而水溫則控制在 92°C (以不超過 95°C 為原則，以免水達到沸騰，而衝爆瓶塞。) 在溫度條件達到穩定時，關閉氮氣，開始引入水蒸氣 (流速控制在 1.5l/min)，由參考資料[10]可知只要氮氣流速超過 60 升/hr，氧化速率及與氮氣流速無關。接著緩慢的將 sample 送入爐管。我們已經測試出在 Al 含量 0.8，溫度達 480°C 的情況下，氧化速率約為 0.12nm/min，如圖 3-7

所示。由於在上覆蓋層之後，是 Al 含量較低的漸變層，其氧化速率驟減，可以當作氧化製程的停止層(stop layer)。氧化完成後將晶片放置在爐管中等待其自然降至室溫。

第二道微影製程

使用的光阻劑為 5214E，將來 Lift off 用。

鍍上 P 型金屬

在鍍上 P 型金屬前，必須先做 UV-O₃，目的在於氧化殘餘光阻，接著將晶片浸泡於鹽酸溶液，其目的是在去除歐姆接觸層上的自然氧化層 (native oxide) 並且帶走氧化後的殘餘光阻。

我們是使用電子蒸鍍 (E-gun) 系統來鍍金屬，P 型金屬的結構依序為 Ti/Pt/Au，蒸鍍溫度不可太高 (大於 55⁰C)，影響到光阻的特性，可能造成掀起的失敗。

掀光阻 (Lift off)

接下來將晶片泡在丙酮溶液中，輕輕搖晃，即可得到金屬條紋。

磨薄與鍍 n 型金屬

鍍完 P 型金屬後，接著要將晶片的背面磨薄，一方面可以降低雷射二極體的串聯電阻，但最主要的目的還是在於磨薄後的晶片，較容易劈裂出完美的自然斷裂面，也就是有較高反射率的 FB 共振腔反射鏡。

在加熱下，將晶片用黃膠黏在載玻片上，放入的溶液中進行蝕刻磨薄的動作，時刻速率約。

要鍍背面金屬前，一樣要先去掉背面的自然氧化層，故先浸泡在 HCl 水溶液中，再用單電子槍蒸鍍系統鍍上 N 型金屬 Ni/Ge/Au

快速退火

雷射二極體金屬和半導體間的接面為歐姆接點(ohmic contact)，為了達到這個目的，我們將晶片放入快速退火系統中(簡稱 RTA)，當溫度升高，金屬融化滲入半導體接面中，可以提高參雜濃度，形成歐姆接點，一般而言，退火溫度約在 440°C 左右。

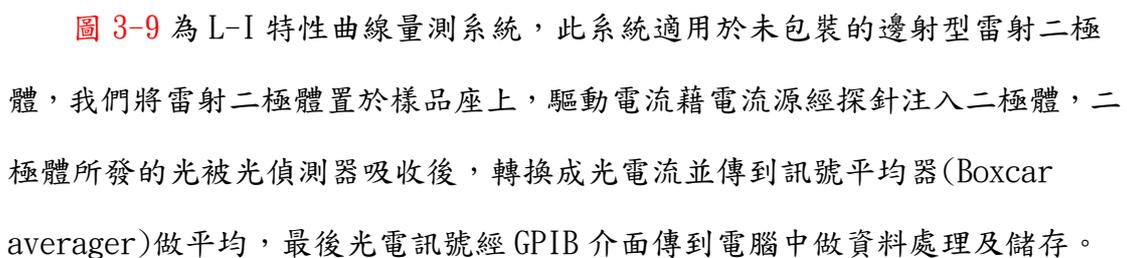
晶片劈裂

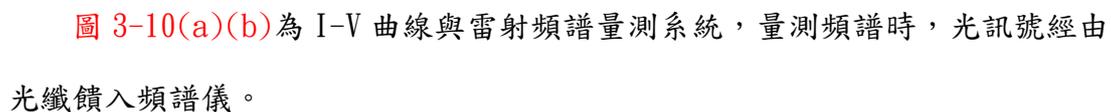
在晶片的邊緣，以用雷射切割機沿著垂直雷射條紋的方向，劃下不同間隔寬度的刻痕，定義不同的共振腔長度 L，最後沿著刻痕施力，使晶片沿著自然斷裂面劈開，如此即形成了 FP 共振腔鏡面。

(討論)

在本篇碩論中，晶片在進入爐管之前並沒有鍍上 Si_3N_4 ，其結果依然可得到良好的 P+ GaAs 接觸層表面以及良好的 P-N junction 電性，如  圖 3-8 所示。

3-3 雷射特性量測系統

 圖 3-9 為 L-I 特性曲線量測系統，此系統適用於未包裝的邊射型雷射二極體，我們將雷射二極體置於樣品座上，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 3-10(a)(b)為 I-V 曲線與雷射頻譜量測系統，量測頻譜時，光訊號經由光纖饋入頻譜儀。

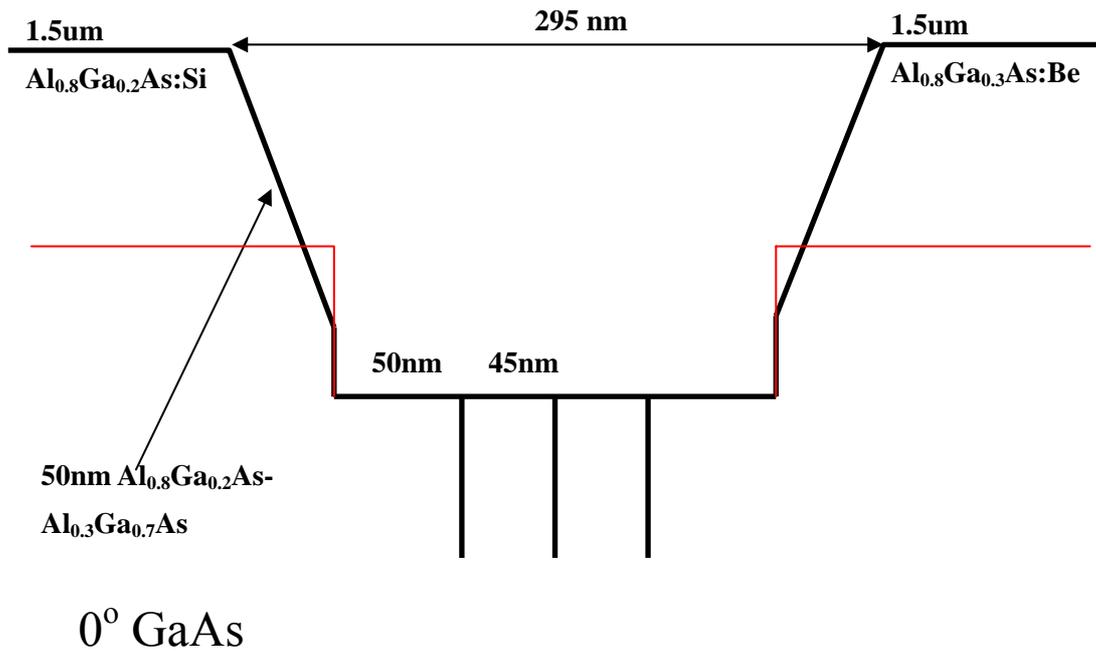


圖 3-1，1m4354 能帶結構圖。

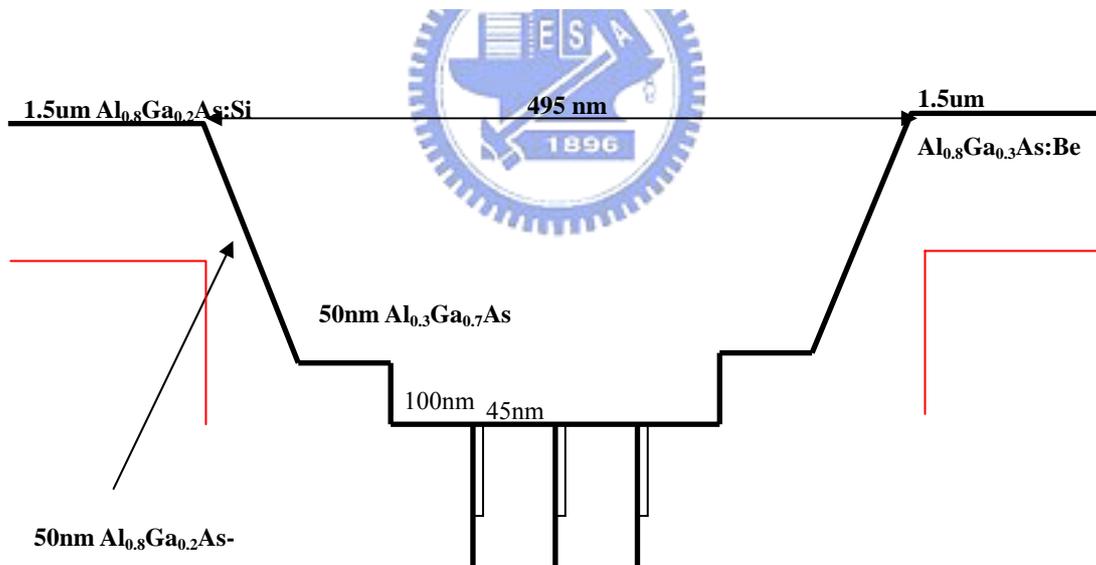


圖 3-2，1m4378 能帶結構圖。

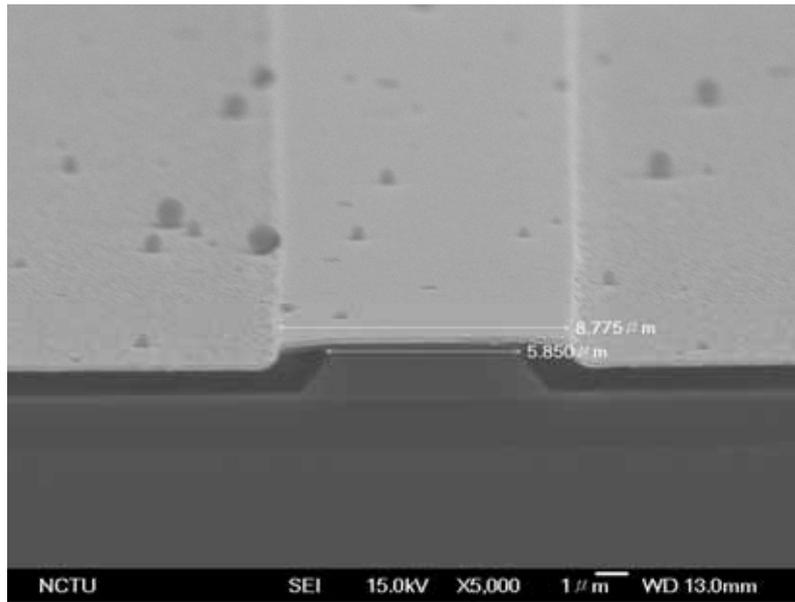


圖 3-3，氧化之脊狀雷射結構 SEM 圖。

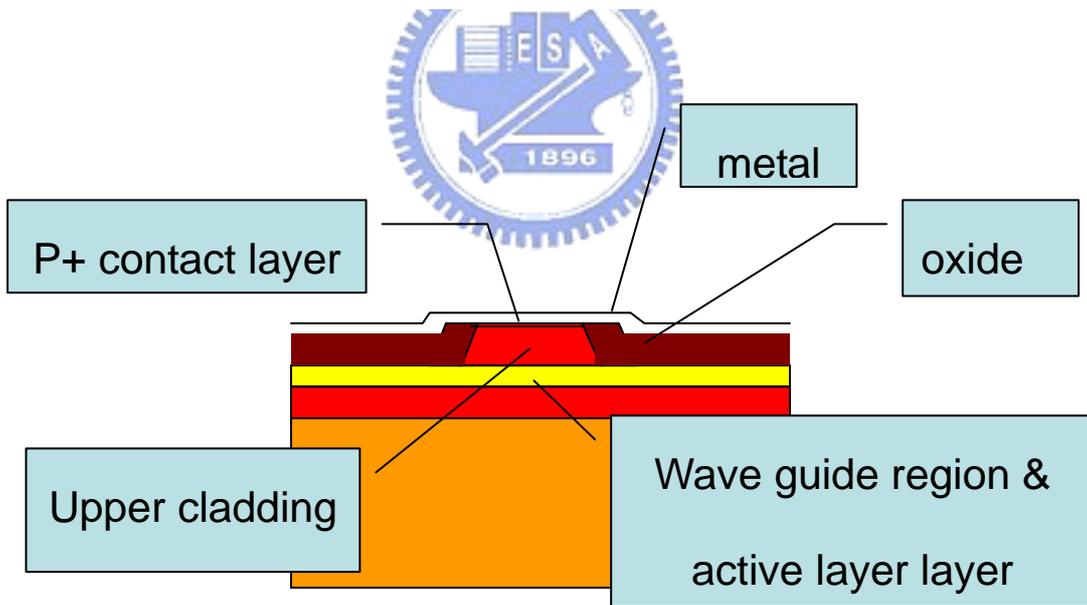


圖 3-4，氧化之脊狀雷射結構示意圖。

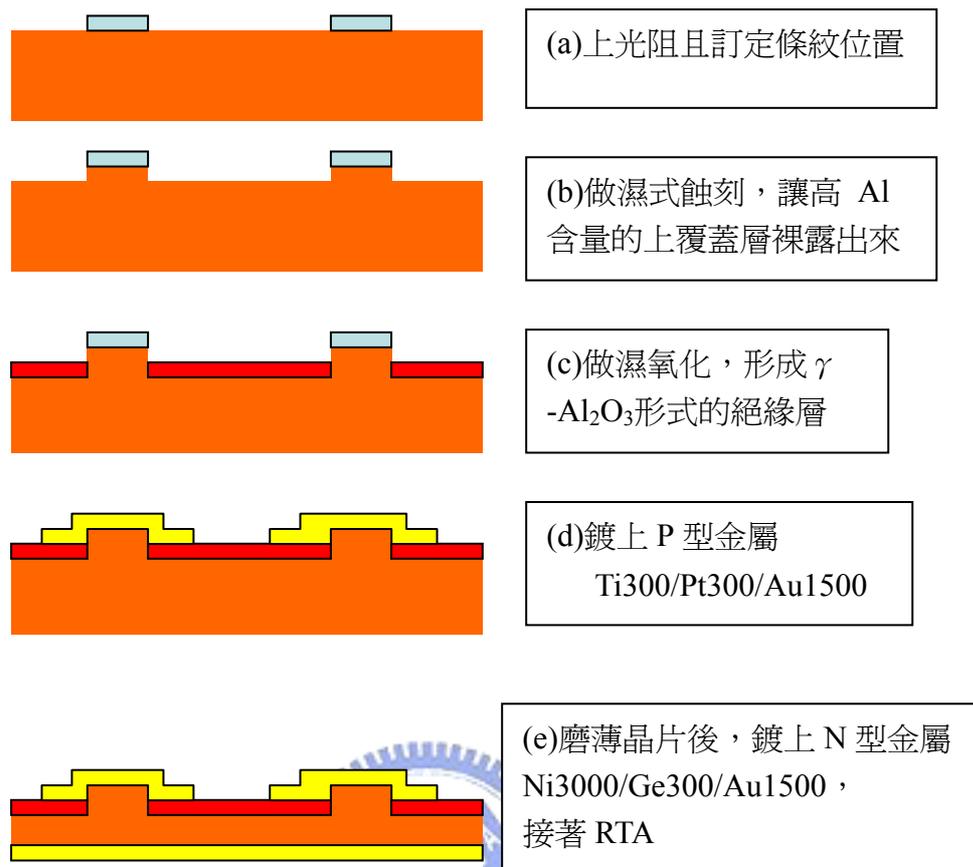


圖 3-5，脊狀結構製程流。

Wet oxidation

爐管配置

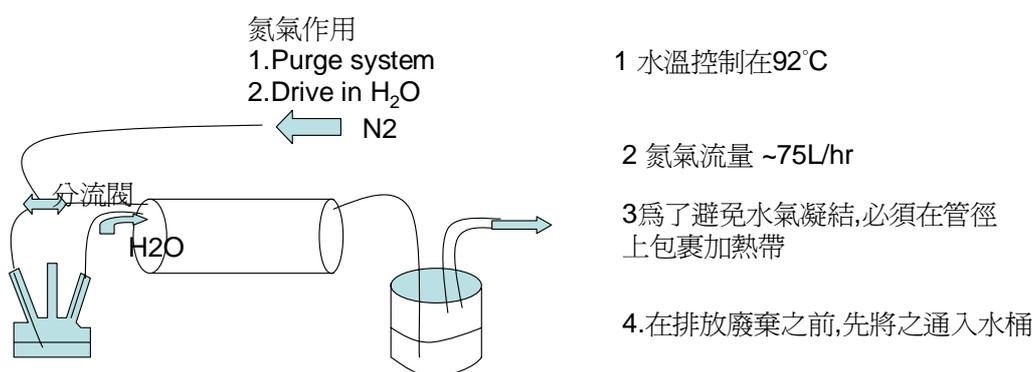


圖 3-6 氧化製程的爐管配製圖。

oxidation rate~0.12um/min

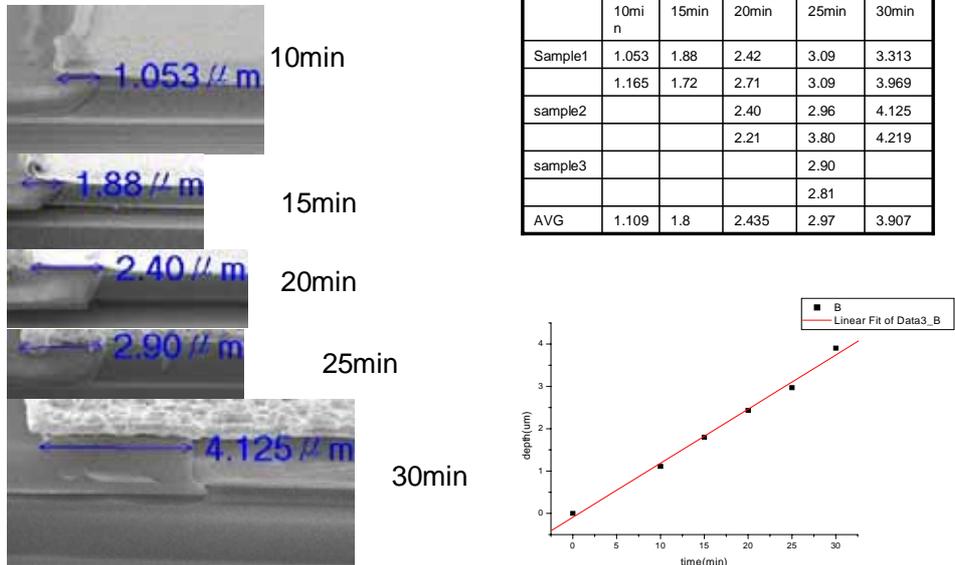


圖 3-7 氧化速率量測。

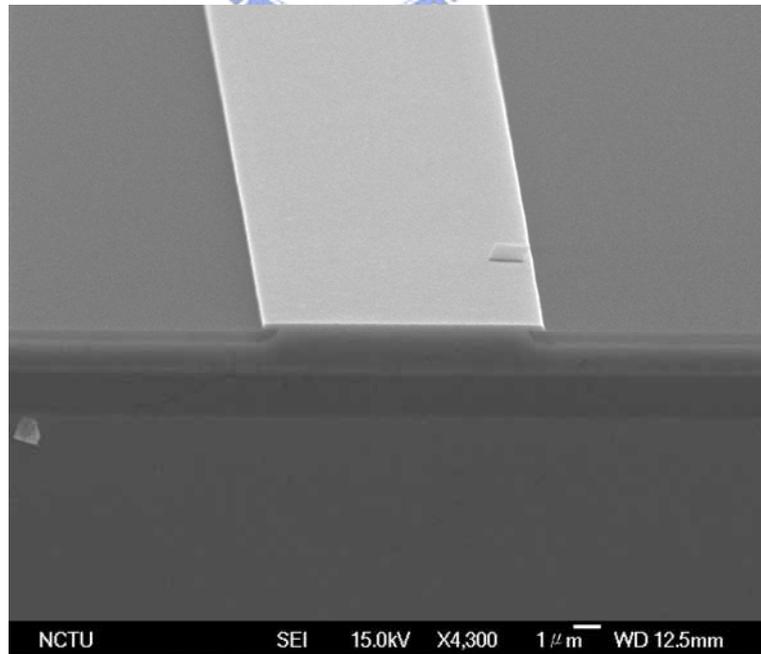


圖 3-8，氧化 SEM 圖。

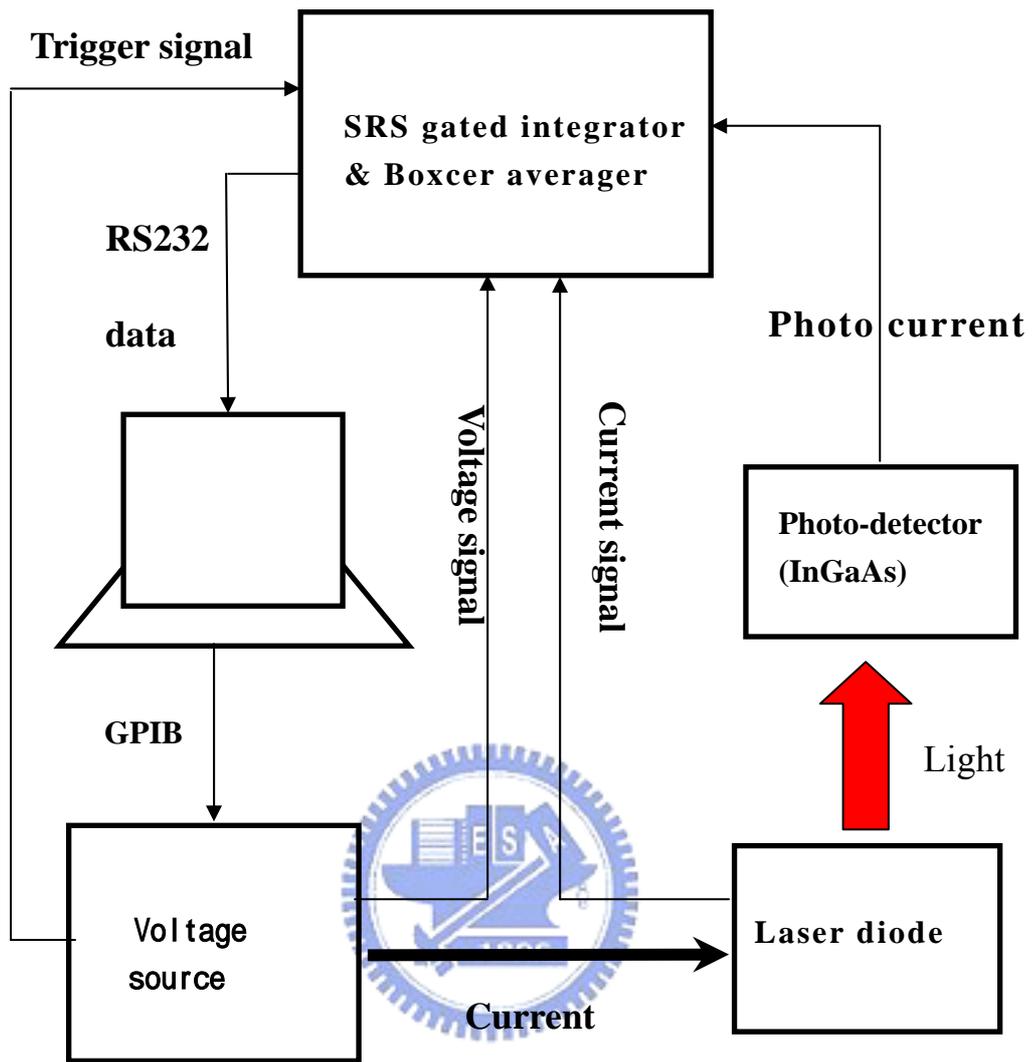


圖 3-9 ， LI 曲線量測系統圖。

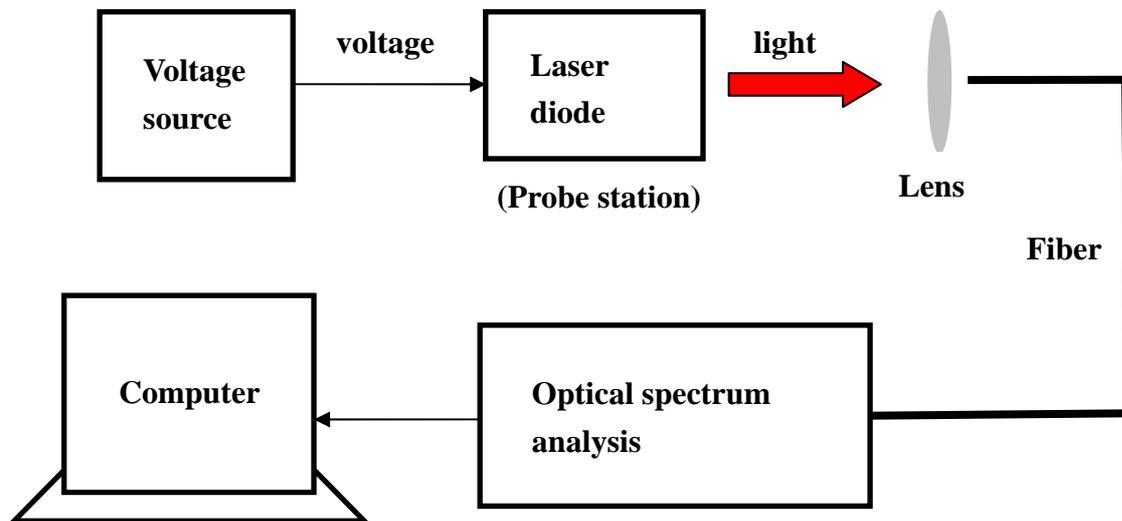


圖 3-10(a) 雷射輸出光譜量測系統圖。

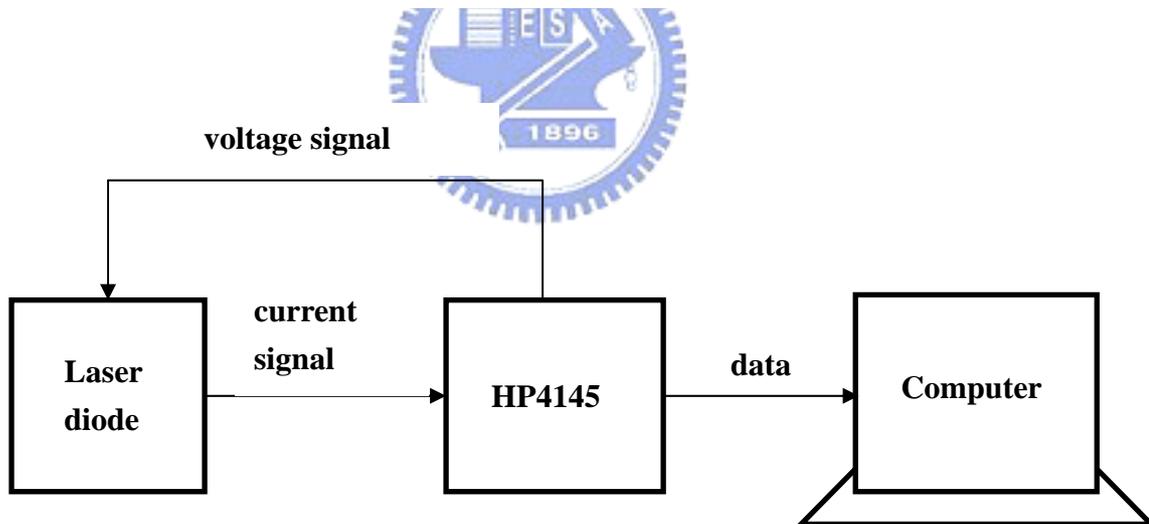


圖 3-10(b) I-V 曲線量測系統圖。

第四章 結果與討論

本章分為四個小節，4-1 節討論樣品 lm4378 寬面積雷射資料與參數、4-2 節討論樣品 lm4354 寬面積雷射資料與參數、4-3 節討論氧化製程脊狀結構雷射的量測結果、4-4 討論激發態波峰先出現，接著基態波峰才出現的雷射行為並對其做定性的解釋。

4.1 lm4378 寬面積雷射資料與參數

圖 4-1(a) lm4378 LI-curve，共振腔寬度 $W=20\mu\text{m}$ ，長度 $L=1.4\text{mm}$ 。其中，當電流達到約 130mA，LI-curve 出現一個明顯的 “kink”。觀察其對應的頻譜圖，如圖 4-1(b) 所示，隨著電流的增加，首先由 GS 開始雷射，其對應的波長位置為 1.190 μm ，電流持續增加，到達約 130mA 時，出現另外一個波峰，對應著 ES 的位置，其波長為 1.124 μm 。ES 開始雷射即為 LI-curve 上出現明顯 kink 的原因，而 kink 所在的位置，及對應 ES 的臨界電流位置 $I_{\text{th}}^{\text{ES}}$ 。接下來持續增加電流，ES 雷射的強度持續增加，而 GS 雷射的強度則在飽和之後漸漸的減弱，最後消失不見。這樣的現象同樣的在參考資料^{[15][16]} 中出現，該文獻指出，ES 能階上的載子累積並沒有因為 GS 已經開始雷射而停止，而是持續地隨著電流的增加，而緩慢的累積，於是有機會在隨後克服總損耗而出現 ES lasing。GS 之所以會消失是因為在 high bias 的情況下，主動層區域的局部溫度為相對的高溫，而高溫會造成熱游離的速率變快， f_{GS} 值下降， G_{GS} 值跟著下降。由圖 4-1(b) 可看出，GS 與 ES 的能量分別對應 1.042eV 與 1.103eV，兩者的能量差約為 60meV。

圖 4-2 所示改變不同的長度的 lm4378 LI-曲線， $L=(a) 1.1\text{mm}$ (b) 1.2 mm (c) 1.3 mm (d) 1.5mm。同時地，針對不同的 L，做變溫量測。圖一(a)所

示 $L=1.1\text{mm}$ ，其對應的總損耗(total loss) $\alpha\sim 14\text{cm}^{-1}$ ，而其波長落於 $1.124\mu\text{m}$ ，為ES lasing，由此可知在室溫的情況下($T=20^\circ\text{C}$)， $1\text{m}4378$ 所對應的基態飽和增益 $G_{\text{GS}}^{\text{sat}}$ 小於 14cm^{-1} 。接著觀察不同長度的雷射二極體，隨著長度增加，鏡面損耗變小，GS有機會克服總損耗而開始雷射，如圖 4-2(b)所示，一開始由GS先雷射，不過隨後即出現明顯的kink，代表ES也接著開始雷射。當溫度上升到 25°C ，又變成了只有 ES lasing，原因一樣是溫度上升造成熱游離的速率變快， f_{GS} 值下降， G_{GS} 值跟著下降，於是無法克服總損耗。一樣的方式，可解釋圖 4-2(c)(d)(e)中所發生的情形。隨著長度的增加，GS與ES的臨界電流比值 $I_{\text{thES}}/I_{\text{thGS}}$ 也跟著增加，這在參考資料 [15][16]中亦有觀察到相同的現象，以下我們就參考該作者的論述，對此現象做定性的解釋。



如圖 4-3 所示，我們定性地解釋GS/ES臨界電流比值對共振腔長度的相依性。首先考慮在GS/ES上，所累積的載子濃度 $N_{\text{GS}}/N_{\text{ES}}$ 隨著注入電流的增加而增加，直到增益足以克服總損耗(total loss)始達到雷射臨界條件，當GS先達到lasing，其載子濃度pinned 在值 $N_{\text{th}}^{\text{GS}}$ ，而ES上的載子濃度並不會跟著GS的載子濃度一起”pinned”住，而是持續的緩慢累積，這是QD雷射特有的性質，原因是QD-GS本身的所提供的states有限，在加上其finite relaxation time特性，使得載子持續在ES累積，最後ES的增益亦有機會克服總損耗而達到雷射的臨界條件。當ES開始雷射，其載子濃度將pinned在值 $N_{\text{th}}^{\text{ES}}$ 。

接著考慮共振腔長度(cavity length, L)增加造成的影響：

(a)當 L 增加，鏡面損耗(mirror loss, α_m)下降，臨界增益(threshold gain, g_{th})下降，對應的雷射臨界條件所需的載子濃度 $N_{\text{th}}^{\text{ES}}$ 也跟著下

降。如圖上之參考線(i)所標示。

(b)當L增加，對應雷射臨界條件的GS載子濃度 N_{th}^{GS} 也跟著下降。如圖上之參考線(ii)所標示。

(c)考慮

$$(\tau)^{-1} = (1 - f_{GS})(\tau_0)^{-1}$$

其中 τ 稱為relaxation time， f_{GS} 是the occupancy of the QD ground state， τ_0 稱為intrinsic relaxation time，當 f_{GS} 等於零， $\tau = \tau_0$ 。亦即relaxation time 與量子點的填充率有關，在填充率越高的情況下，relaxation time會越慢。

當L增加，對應地 N_{th}^{GS} 下降， f_{GS} 下降，relaxation time、 τ 變快，於是在ES上載子濃度 N_{ES} 累積較緩慢，由圖中斜率的差異可見。基於(a)(b)(c)三點可解釋GS/ES臨界電流比值隨共振腔長度增加而增加的性質，其中因素(c)是主要原因。

註：比較QD與QW系統，其中QD有較緩慢的intraband relaxation time，其數值約落在1~100ps^{[17]-[20]}，而QW大概小於1ps^[21]

如圖 4-4(a)所示 η_D^{-1} 對L作圖(1m4378)，對長共振腔的部份做線性分析可得internal loss $\alpha_i = 4\text{cm}^{-1}$ 與internal quantum efficiency $\eta_i = 98\%$ 。另外如圖 4-4(b)所示，利用方程式

$$\eta_D^{-1} = [1 + (2\tau_0 / \tau_{ES}) / (1 - q)](1 - q_{in}/q)^{-1}$$

可估算出樣品 4378 的 intrinsic relaxation time $\tau_0 \sim 4\text{ps}$ 、 $G_{\text{GS}}^{\text{sat}} = 13\text{cm}^{-1}$ 。接著，我們來考慮估算得的 τ_0 之精準度。其一，由擬合所得的 $G_{\text{GS}}^{\text{sat}}$ 值 13cm^{-1} 小於並且接近圖 4-2(a) 中估算的值 14cm^{-1} ，該估算值與實驗結果吻合。由此可確認我們所估算的 intrinsic relaxation time τ_0 亦有一定程度的精準性、其二，考慮擬合誤差，我們令 $2\tau_0/\tau_{\text{ES}}$ 為變數，所擬合出來的值為 0.00661，而誤差範圍為 ± 0.00321 ，因此估算的 τ_0 值為 $3.3 \pm 1.6 \text{ ps}$ 。(其中設定 τ_{ES} 為 1ns)

圖 4-5 利用方程式 $J_{\text{thGS}} = J_0(1+q) + J_i(1+q)/(1-q)$ 可擬合估算出 $J_{\text{tr}} \sim 44\text{A/cm}^2$ 或 $J_{\text{tr}} \sim 15 \text{ A/cm}^2(\text{per layer})$ 、 $\tau_e \sim 1\text{ns}(T=20^\circ\text{C})$ 。(其中套入在圖 4-4 所得到的參數值 $2\tau_0/\tau_{\text{ES}} \sim 0.00661$ ， $\tau_{\text{ES}} \sim 1\text{ns}$ ， $\tau_{\text{GS}} \sim 1\text{ns}$)。

最後，我們將 1m4378 的參數作整理，製作表格如下：

表 4-1 1m4378 寬面積雷射參數值

Jtr(A/cm ²)	τ_0 (ps)	τ_e (20°C)	α_i (cm ⁻¹)	η_i	$G_{\text{GS}}^{\text{sat}}$ (cm ⁻¹)
44/three layer or 15/one layer	4ps	1ns	4cm ⁻¹	0.98	13cm ⁻¹

4.2 1m4354 寬面積雷射資料與參數

圖 4-6 所示為 1m4354 之 LI-curve，(a)1.7mm，(b)2.0mm，(c)2.5mm，(d)3.0mm。觀察圖 5(d) $I_{\text{th}} \sim 17.38\text{mA}$ ， $J_{\text{th}} \sim 29\text{A/cm}^2$ 或 $J_{\text{th}} \sim 10/\text{per layer}$ ，樣品 4354 可達到極低的臨界電流密度。另外，此樣品在 $L=1.2\text{mm}$ 時，為 ES-lasing，由此可推斷其基態飽和增益 $G_{\text{GS}}^{\text{sat}}$ 小於 12.5cm^{-1} 。

圖 4-7 所示，亦為 Im4354 之 LI-curve，在此我們注入較大的電流，一樣可觀察到 LI 曲線上出現明顯的” kink”，即 ES-lasing。 I_{th}^{ES}/I_{th}^{GS} 值在固定溫度的情況下，隨著共振腔長度的增加而增加。在固定共振腔長度的情況下，隨著溫度的增加而減少。另外，觀察圖 4-6(d)， $L=3.0\text{mm}$ ，GS 的雷射光功率 P_{GS} 隨著電流的增加而達到飽和值 P_{GS}^{sat} ，接著其功率漸漸下降，然後 ES-lasing 出現，又使得總功率上升，於是在 LI-curve 上可觀察到一個明顯的凹谷，這一點與參考資料 [5] 中提到開始 ES-lasing 的位置一定對應到基態飽和功率 P_{GS}^{sat} 的位置相同有所出入。

如圖 4-8(a) 所示，隨著電流的增加，首先由 GS 開始雷射，其對應的波長位置為 $1.235\ \mu\text{m}$ ，電流持續增加，到達約 150mA 時，出現另外一個波峰，對應著 ES 的位置，其波長為 $1.157\ \mu\text{m}$ ，GS 與 ES 的能量分別對應 1.004eV 與 1.071eV ，兩者的能量差約為 68meV 。接下來持續增加電流，如圖 4-8(b) 所示，ES 雷射的強度持續增加，而 GS 雷射的強度則在飽和之後漸漸的減弱，最後消失不見。

如圖 4-9(a) 所示 η_D^{-1} 對 L 作圖，對長共振腔的部份做線性分析可得 internal loss $\alpha_i = 3\text{cm}^{-1}$ 與 internal quantum efficiency $\eta_i = 82\%$ 。另外如圖 4-9(b) 所示，利用方程式 $\eta_D^{-1} = [1 + (2\tau_0/\tau_{ES})/(1-q)](1-q_{in}/q)^{-1}$ 可估算出樣品 4354 的 intrinsic relaxation time $\tau_0 \sim 40\text{ps}$ 、 $G_{GS}^{sat} = 12\text{cm}^{-1}$ 。接著，我們來考慮估算得的 τ_0 之精準度。由擬合所得的 G_{GS}^{sat} 值 12cm^{-1} 小於並且接近先前所估算的值 12.5cm^{-1} ，證明該估算值與實驗結果並沒有衝突。由此可確認我們所估算的 intrinsic relaxation time τ_0 亦有一定程度的精準性。

圖 4-10 利用方程式 $J_{thGS} = J_0(1+q) + J_1(1+q)/(1-q)$ 可擬合估算出 $J_{tr} \sim 17$

A/cm² 或 $J_{tr} \sim 6 \text{ A/cm}^2$ (per layer)、 $\tau_e \sim 3\text{ns}$ ($T=20^\circ\text{C}$)。(其中套入在圖 4-9(b)

所得到的參數值 $2\tau_0 / \tau_{ES} \sim 0.00273$ ， τ_{ES} ， $\tau_{GS} \sim 3\text{ns}$)。

最後，我們將 lm4354 的參數作整理，製作表格如下：

表 4-1 lm4354 寬面積雷射參數值

Jtr(A/cm ²)	τ_0 (ps)	τ_e (20°C)	α_i (cm ⁻¹)	η_i	G_{GS}^{sat} (cm ⁻¹)
17/three layer or 6/one layer	40ps	3ns	3cm ⁻¹	0.82	12cm ⁻¹

4.3 氧化製程脊狀結構雷射

圖 4-11 為氧化製程脊狀結構的截面圖 (SEM)，

(a) $W \sim 17\mu\text{m}$ (b) $W \sim 7\mu\text{m}$ ，我們改變不同的共振腔寬度，觀察臨界電流直是否有等比例下降。圖 4-12 為其對應的 LI-curve，比較其數據如下表所示：

	I_{th} (mA)	J_{th} (A/cm ²)	λ (μm)
(a) 7.1 μm	28.34	160	1.174
(b) 17.0 μm	34.35	80.82	1.219
(c) 20.0 μm (BA)	30.80	61.60	1.219

首先，比較 (a) 7.1 μm 與 (b) 17 μm 的雷射二極體 (兩者的共振腔長度相同， $L = 2.5\text{mm}$)，(a) 7.1 μm 的發光波長為 1.174，為 ES-lasing，而 (b) 17.0 μm 的發光波長為 1.219，為 GS-lasing。顯示出寬度的減少讓發光波長由 GS 跳到了 ES，主要的原因是寬度的減少造成

internal loss, α_i 上升。接著比較(b)17.0um-氧化脊狀結構與(c)20um-濕式蝕刻寬面積雷射，兩者均為GS-lasing，(b)有較高的臨界電流密度，也使得寬度的減少無法使臨界電流直順利的下降。主要還是考慮寬度變小，internal loss, α_i 上升造成的結果，另外也有可能是氧化製程造成條紋有不平整的現象，而造成散射(scattering)增加，造成 α_i 上升。為了平衡 α_i 上升，減少鏡面損耗(mirror loss, α_m)是必要的考量，可以考慮增加共振腔長度，並且在劈裂鏡面上，鍍上高反射率的材料(HR coating)。

圖 4-13 所示，我們增加了共振腔長度達 $L=5.0\text{mm}$ ，而寬度維持在約 $7.5\mu\text{m}$ ，可使得雷射維持在 GS-lasing，並且有效地降低了臨界電流值。



4.4 激發態波峰先出現，接著基態波峰才出現

如圖 4-14(a)所示，我們觀察到 ES-lasing 先產生，持續增加電流，接著 GS-lasing 才出現，這與一般觀察到的雷射順序有所不同，我們增加溫度達 25°C ，也是一樣的情況，激發態波峰先出現，接著才是基態波峰出現。持續增加電流，如圖 4-14(b)電流在 $104\text{mA}\sim 190\text{mA}$ 區間，兩個波峰均維持穩定的存在，圖 4-14(c)電流持續增加直到最後基態波峰逐漸消失，這與一般的情況吻合。

利用圖 4-15 來解釋 ES 波峰先出現，GS 波峰後出現的現象。首先，由 ES 先雷射可以知道，基態飽和增益 G_{GS}^{sat} 並沒有辦法克服總損耗 (total loss)，因此持續增加電流才有激發態雷射波峰出現。然而持續增加電流並沒有辦法增加基態增益 G_{GS} ，因此唯一有可能使 GS 接著

lasing僅有可能是因為電流的增加造成總損耗(total loss)下降。其中總損耗包含了內部損耗(internal loss)與鏡面損耗(mirror loss)，其中鏡面損耗主要與鏡面反射率和共振腔長度有關，與電流大小無關，而內部損耗與光在共振腔內的散射(scattering)與材料吸收(absorption)有關，其三我們在 4-3 節中也提到內部損耗與共振腔寬度有關。接下來由圖 4-16 可以看到該元件的SEM影像，氧化的區域並沒有到達主動層的位置，因此當電流較大時，有可能產生電流分散(current spreading)的情況，而使得電流的增加造成元件等效寬度(effective width)的增加，對應地造成內部損耗的下降。結果是有機會在電流增加的情況下，總損耗下降，於是在ES-lasing發生後，有機會讓GS-lasing接著發生。



接著我們降低溫度去做量測，圖 4-17 (a) 所示，我們將溫度降到 12°C 與 16°C，重新量測該元件之雷射頻譜，發現基態波峰先出現，接著激發態波峰才出來，該元件又回到了正常的發光順序。持續增加電流則如圖 4-17(b) 與 4-17(c) 所示，最後一如往常，基態波峰在高電流下逐漸消失。我們利用圖 4-18 來解釋這樣的行為，首先我們可確認在 20°C 時，總損耗大於但是非常接近基態飽和增益值，其原因是電流分散(current spreading)造成的內部損耗下降有限，因此總損耗的參考線勢必非常接近基態 gain peak 的位置如圖所示。其二、考慮方程式

$$G_{GS} = G_{GS}^{\text{sat}} (2f_{GS} - 1)$$

其中， f_{GS} 一般的情況下並不會到達 1，而是小於 1，其最大填充率則是與溫度有關，在溫度由 20°C 降到 16°C 的情況下， f_{GS} 值增加，因此

有較高的 G_{GS} 值，於是在低溫的情況下 G_{GS} 大於總損耗，因此轉為GS先雷射。



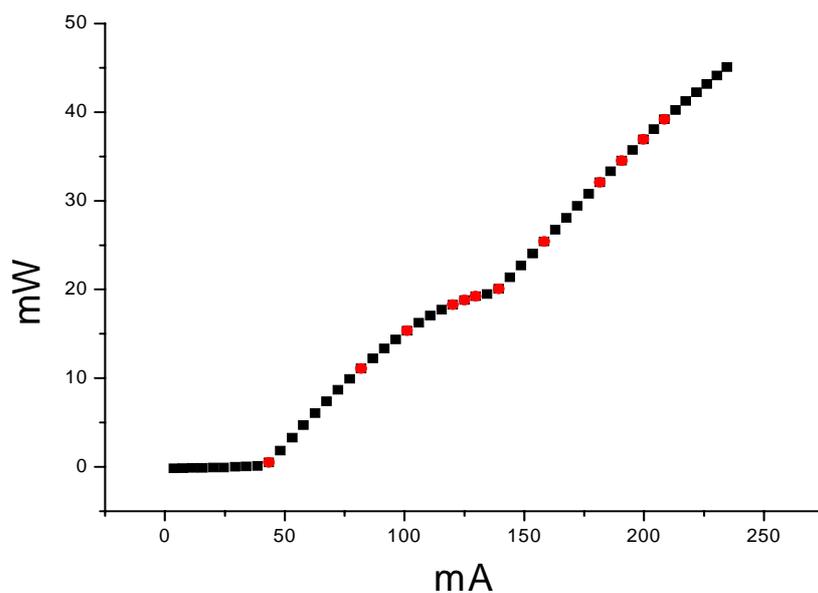


圖 4-1(a)lm4378 LI-curve , W=20um , L=1.4mm 。

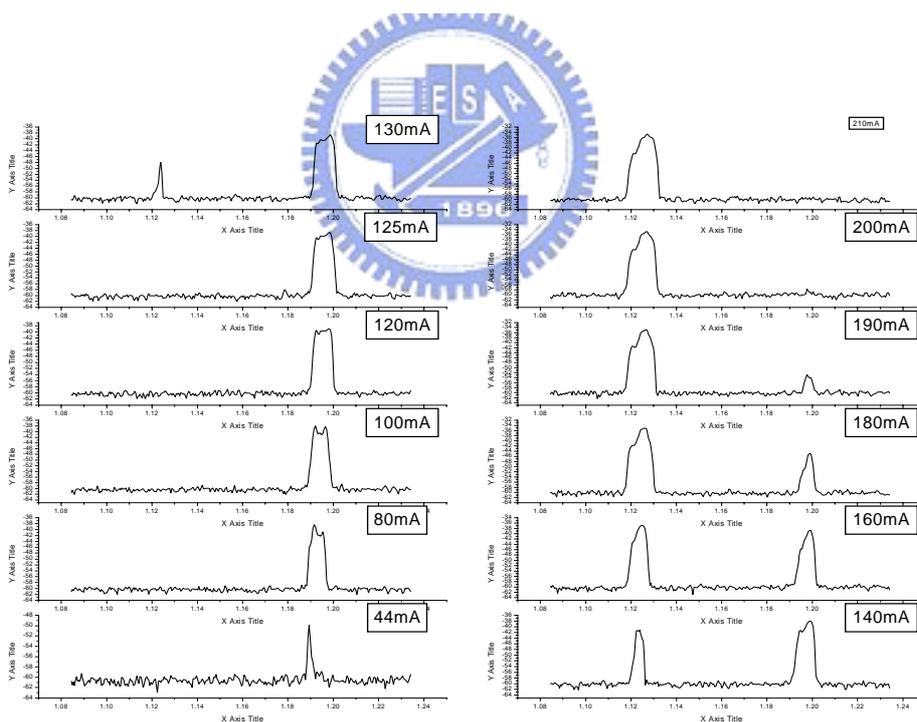


圖 4-1(b)lm4378 之頻譜量測，對應 4-1(a)的 LI-curve 。

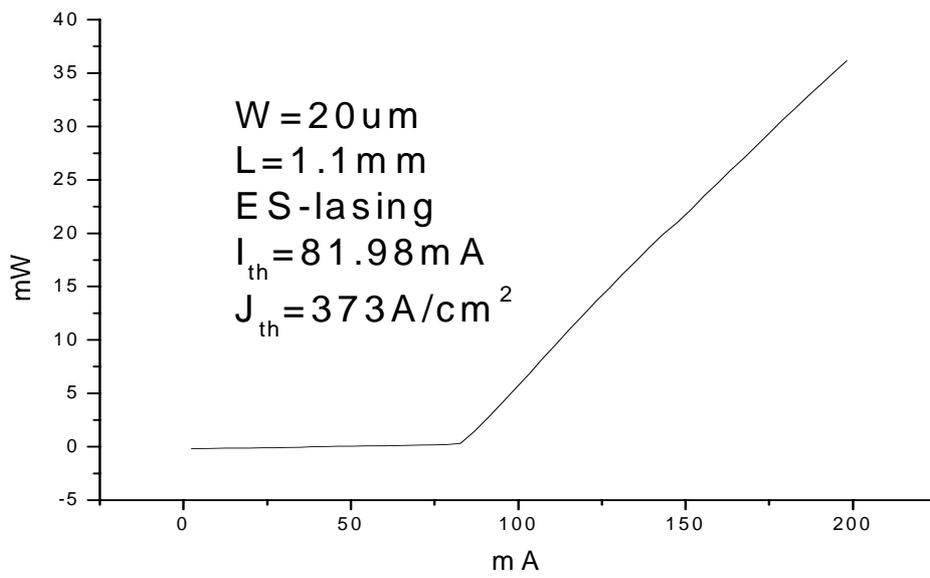


圖 4-2(a) 1.1mm

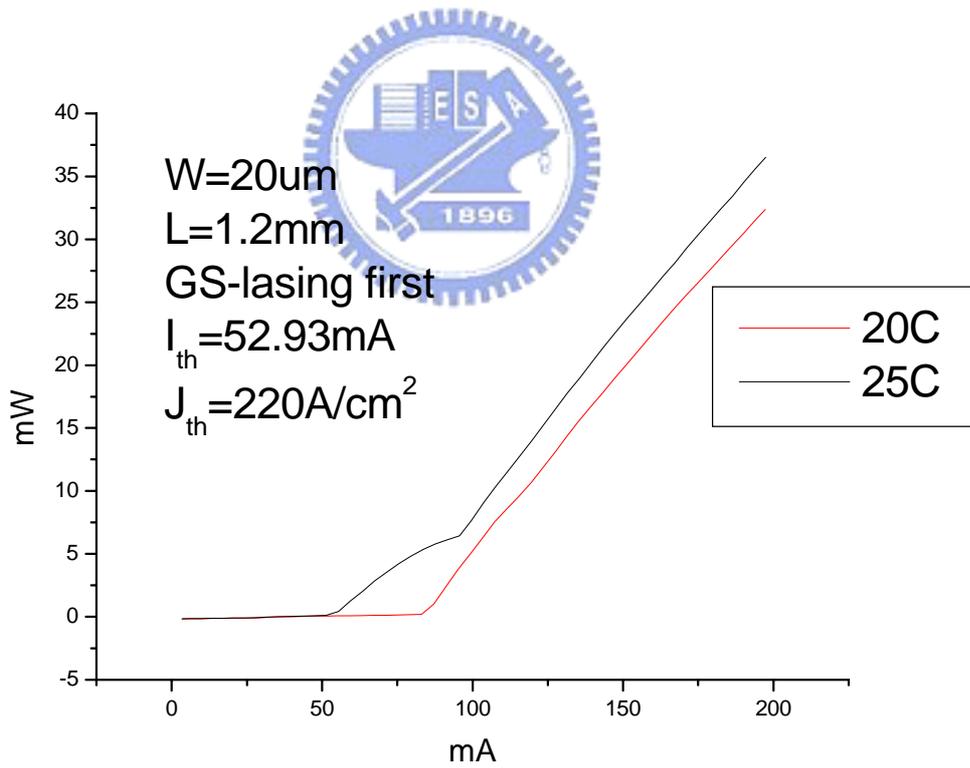


圖 4-2(b) 1.2mm

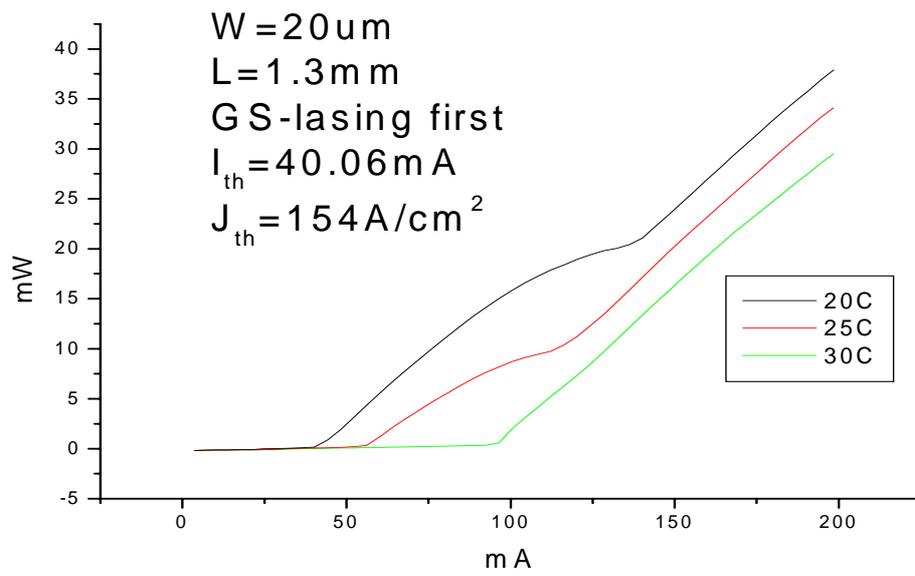


圖 4-2(c) 1.3mm

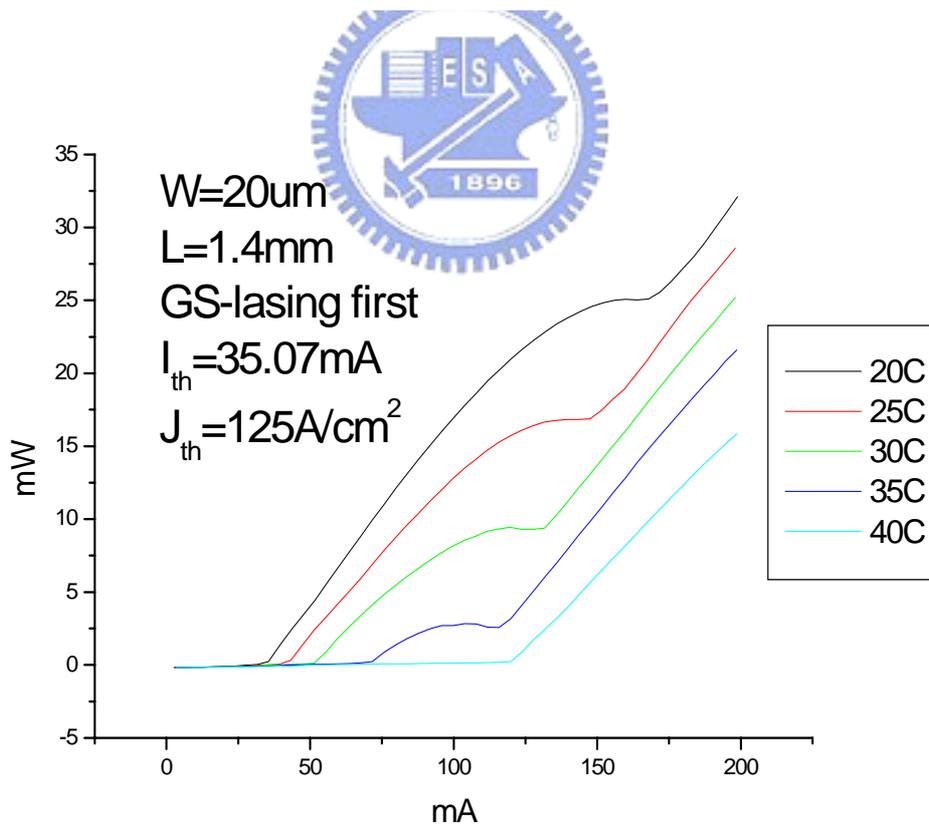


圖 4-2(d) 1.4mm

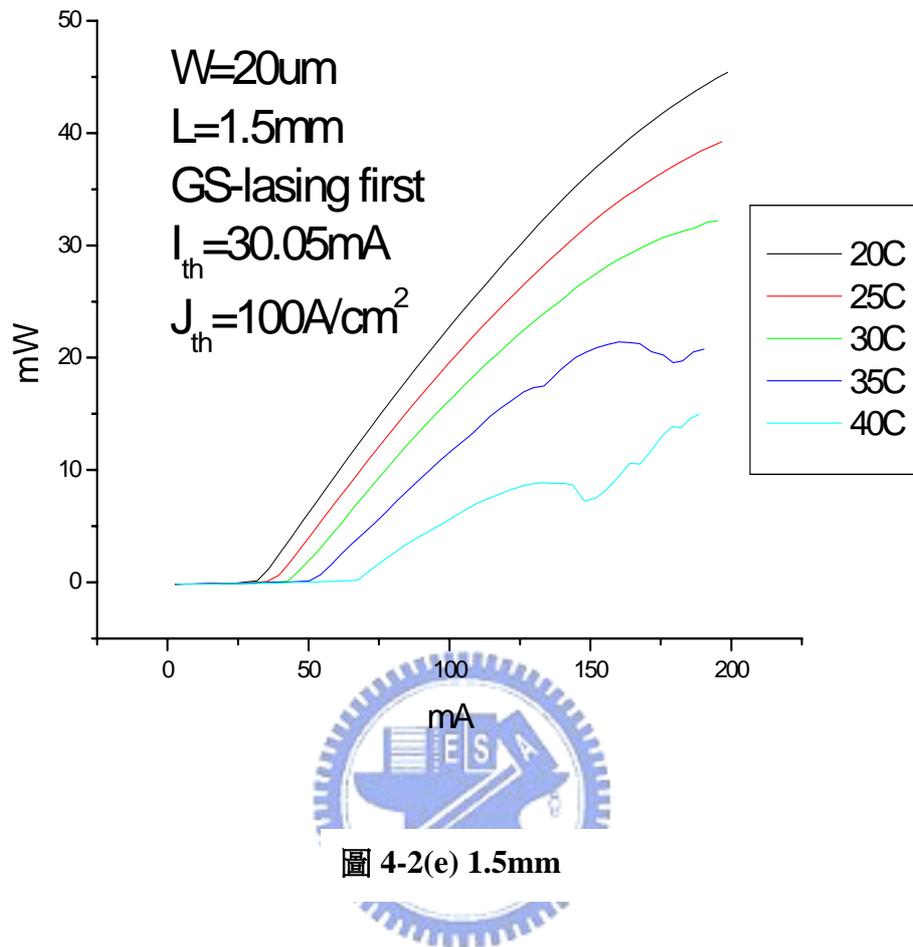


圖 4-2 所示為 Im4378 的 LI-curve。
 $L=(a)1.1\text{mm}(b)1.2\text{mm}(c)1.3\text{mm}(d)1.4\text{mm}(e)1.5\text{mm}$ 。
 針對不同的 L ，做變溫量測。

I_{th}^{ES}/I_{th}^{GS} depend on cavity length

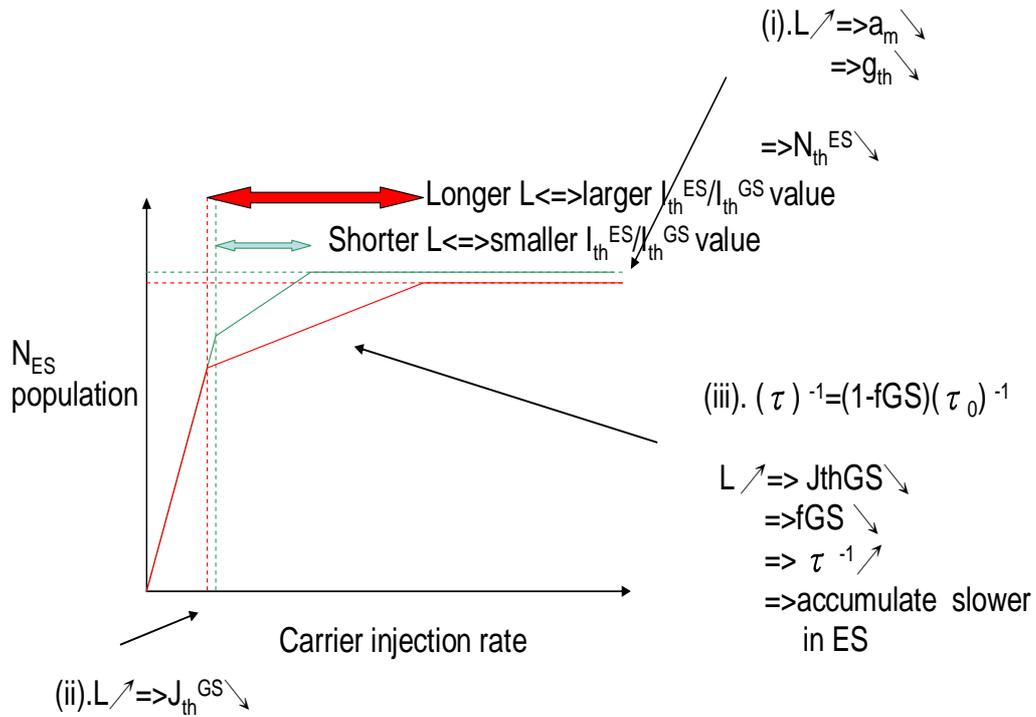


圖 4-3 定性解釋 I_{th}^{ES}/I_{th}^{GS} 比值隨共振腔長度增加而增加。

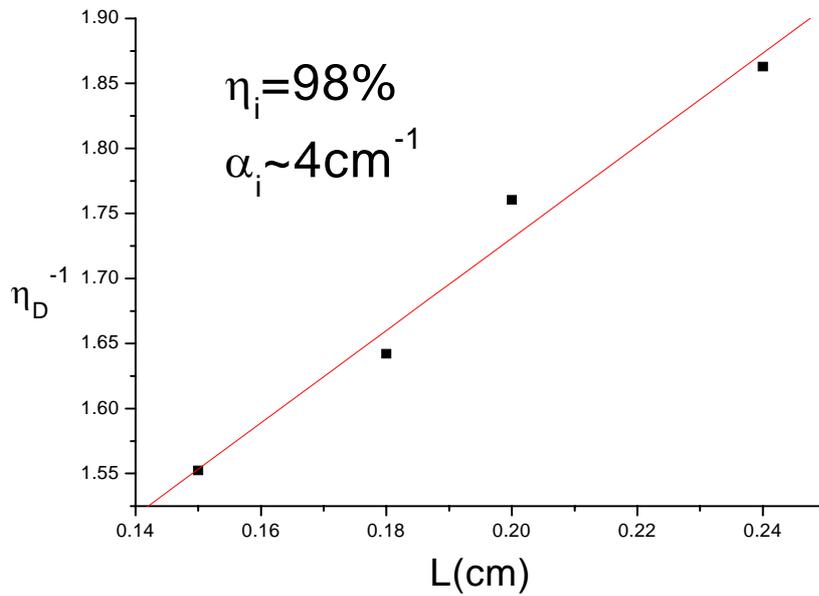


圖 4-4(a) 對 η_D^{-1} -L 圖，作線性分析。

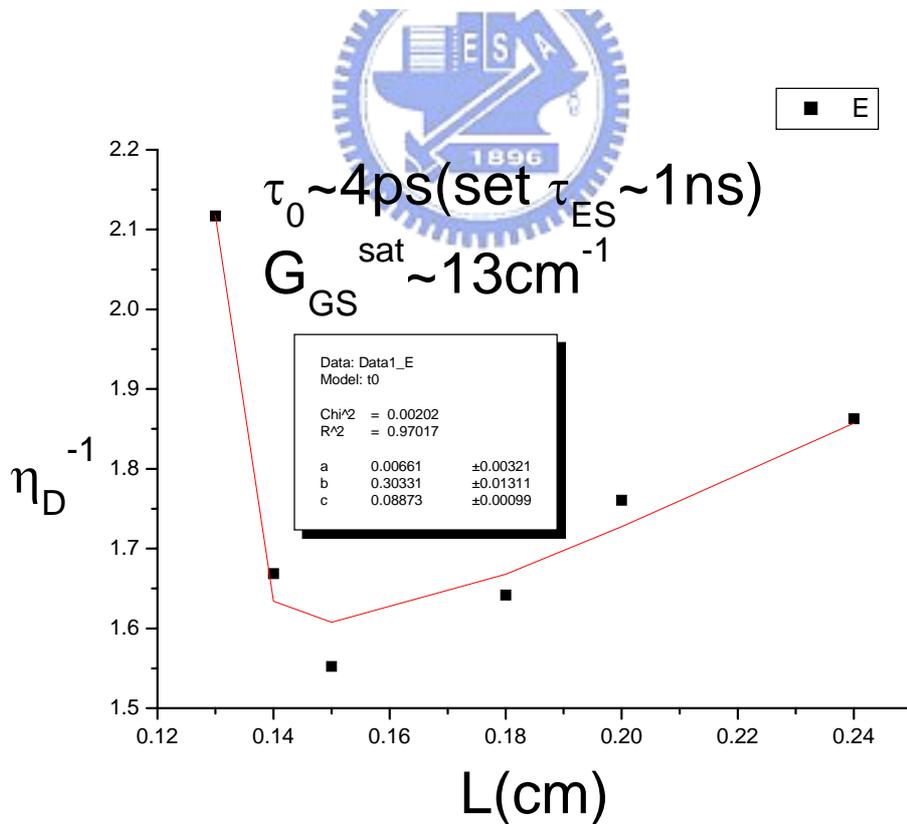


圖 4-4(b) 利用方程式 2.7(a) 對 η_D^{-1} -L 圖做擬合。

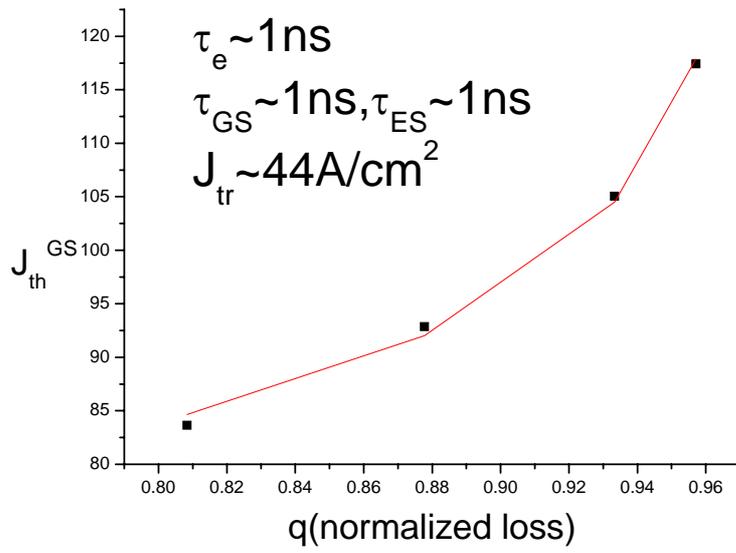


圖 4-4(c)，利用方程式 2.6(a)對 J_{th} - q 圖做擬和。

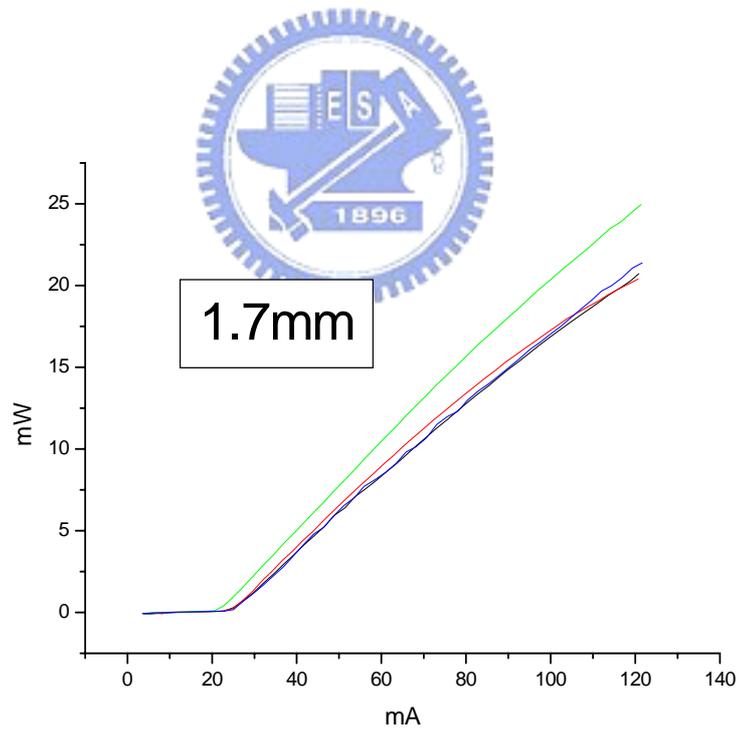


圖 4-5，Im4354 LI-curve(a) $L=1.7\text{mm}$ ，

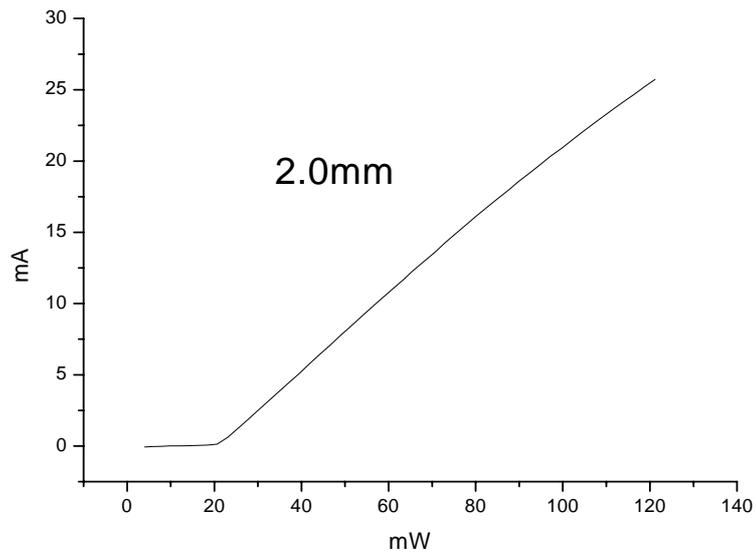


圖 4-5 , lm4354 LI-curve(b)L=2.0mm ,

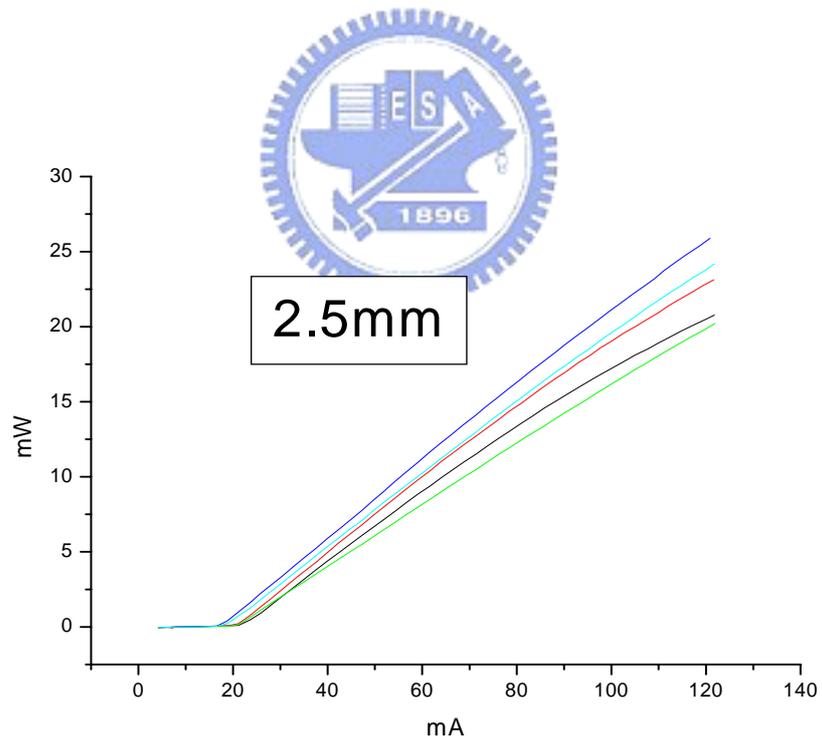


圖 4-5(c)L=2.0mm ,

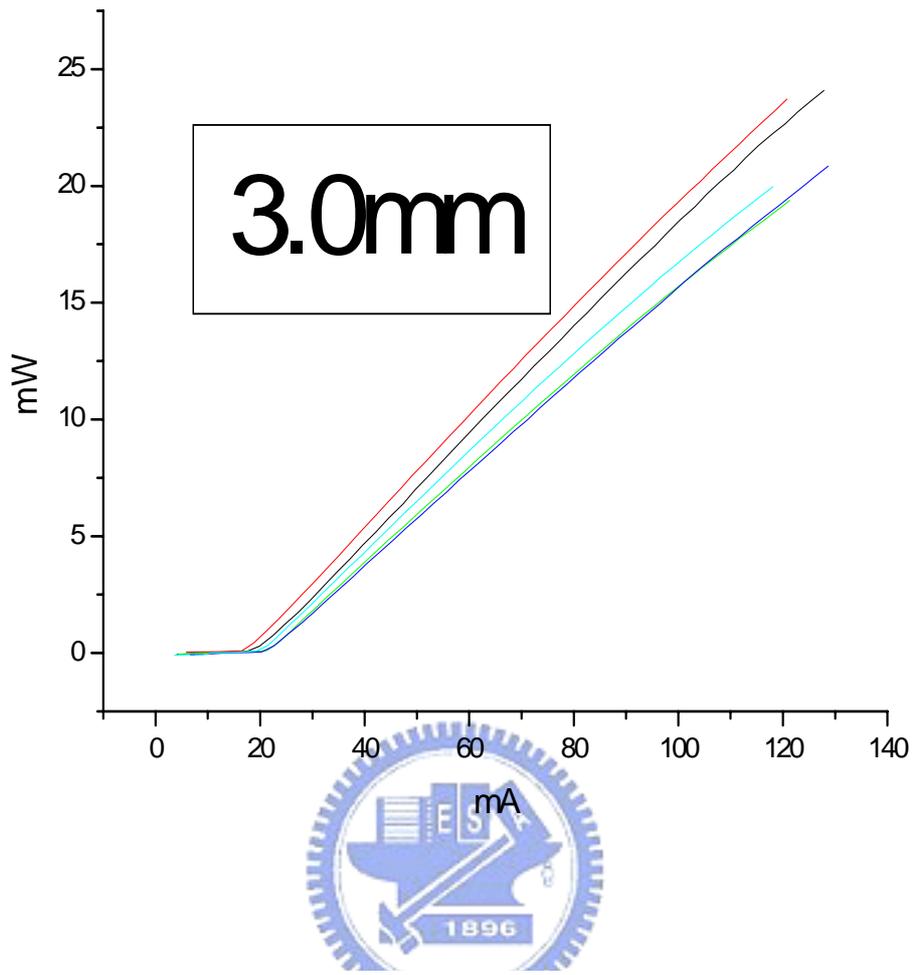


圖 4-5(d)L=3.0mm ◦ $J_{th} < 10A/cm^2$ ◦

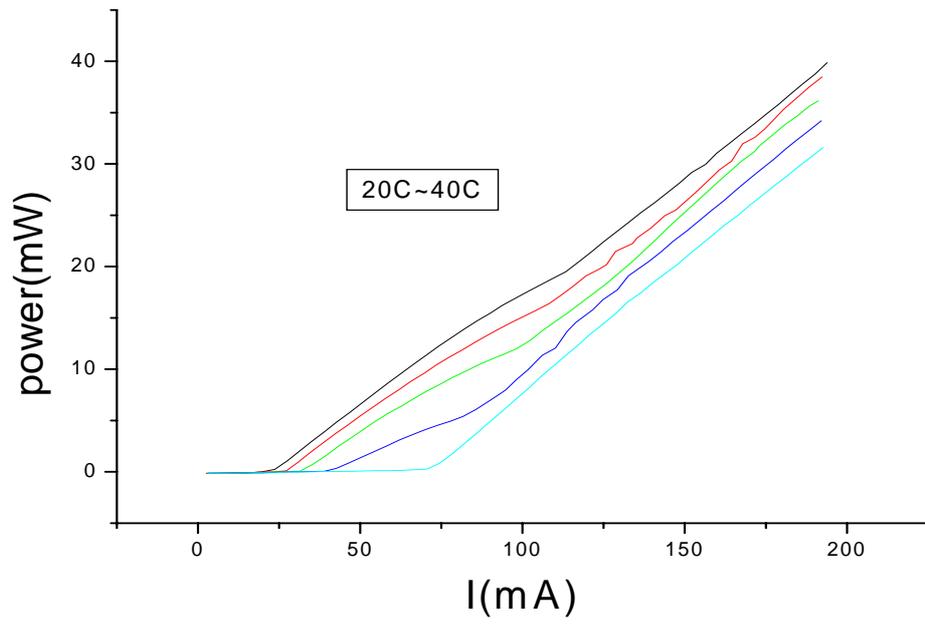


圖4-6(a)L=1.7mm

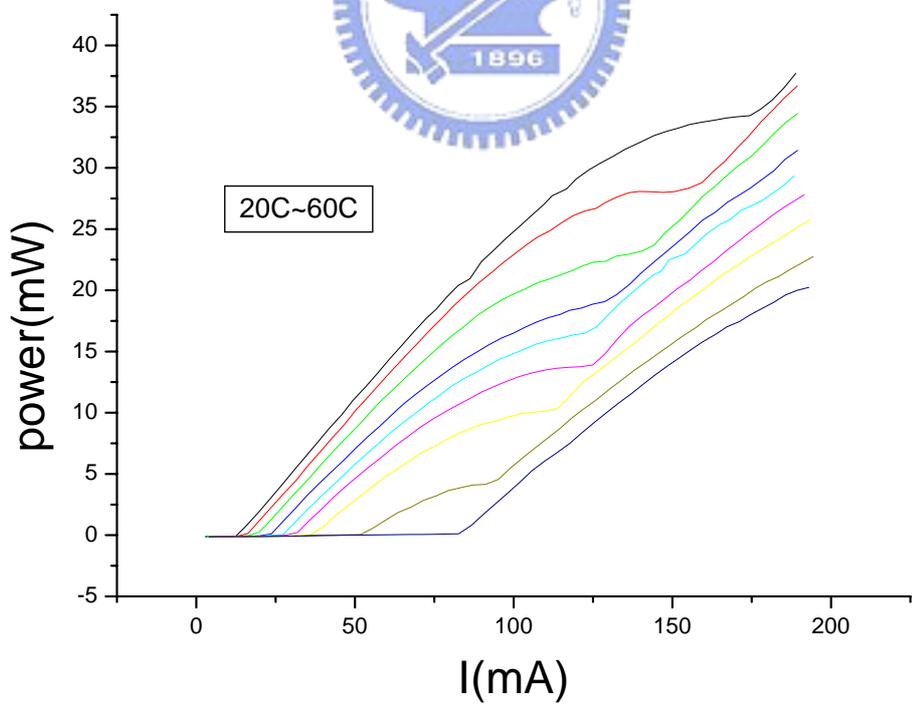


圖4-6(b)L=2.0mm

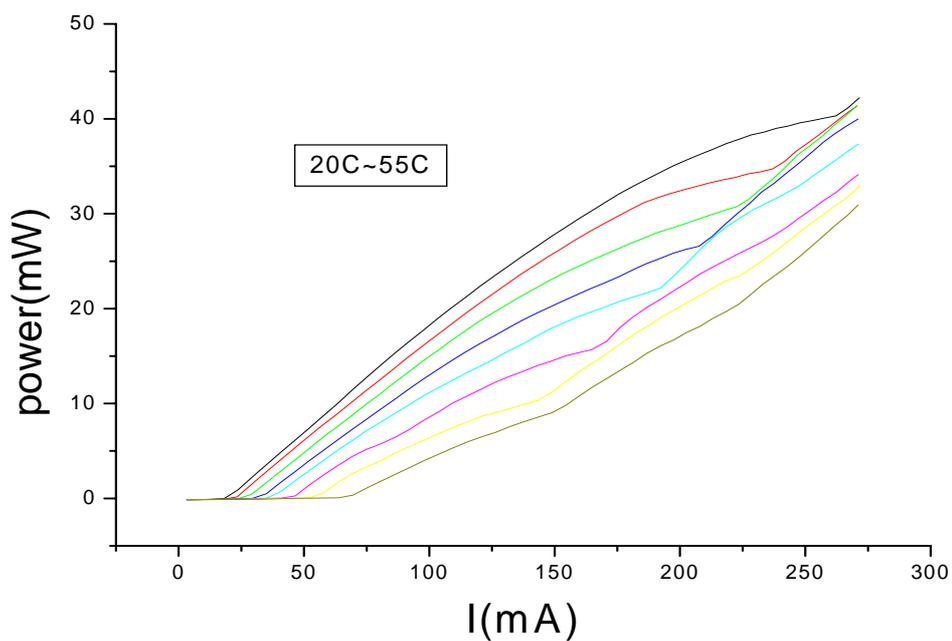


圖4-6(c) $L=2.5\text{mm}$

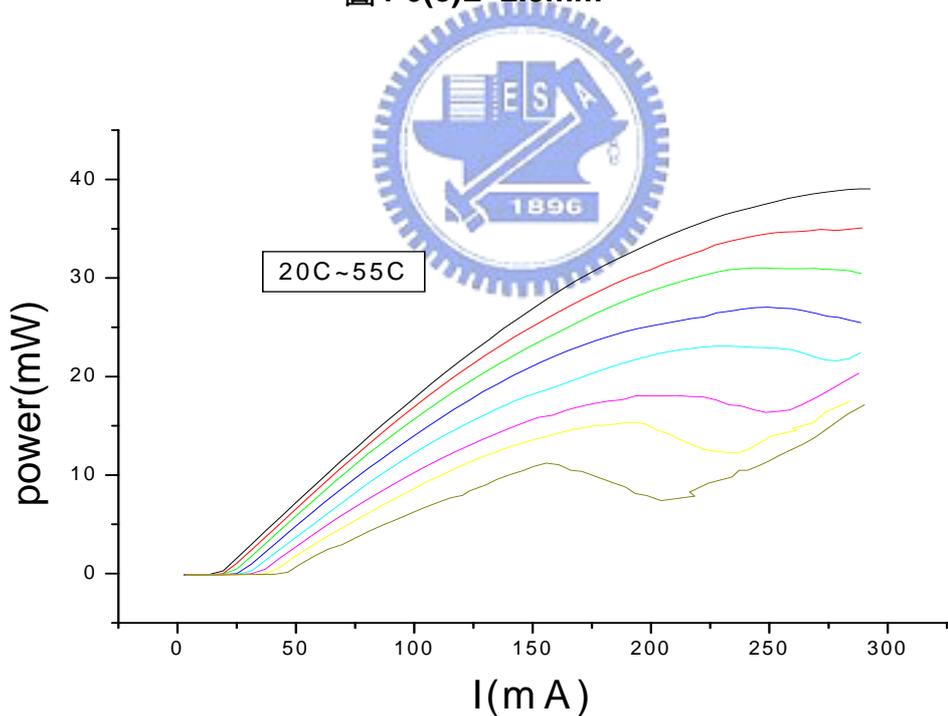


圖4-6(d) $L=3.0\text{mm}$

圖 4-6 所示為 Im4354 的 LI-curve。

$L =$ (a)1.7mm, (b)2.0mm, (c)2.5mm, (d)3.0mm, (e)3.5mm。針對不同的 L ，做變溫量測。

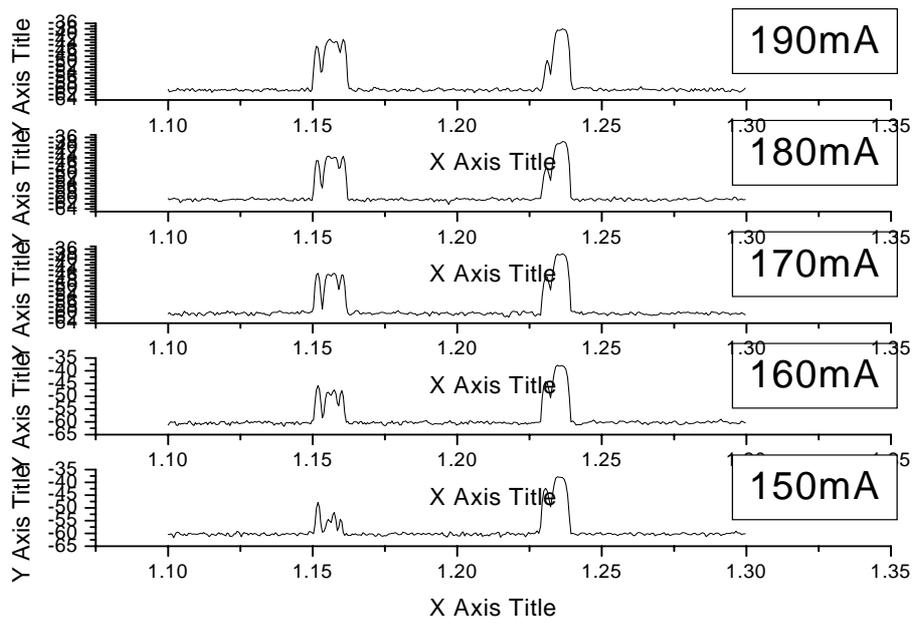


圖 4-7(a)4354 頻譜， $L=1.7\text{mm}$ ， $W=20\mu\text{m}$ ， $T=20^\circ\text{C}$ 。

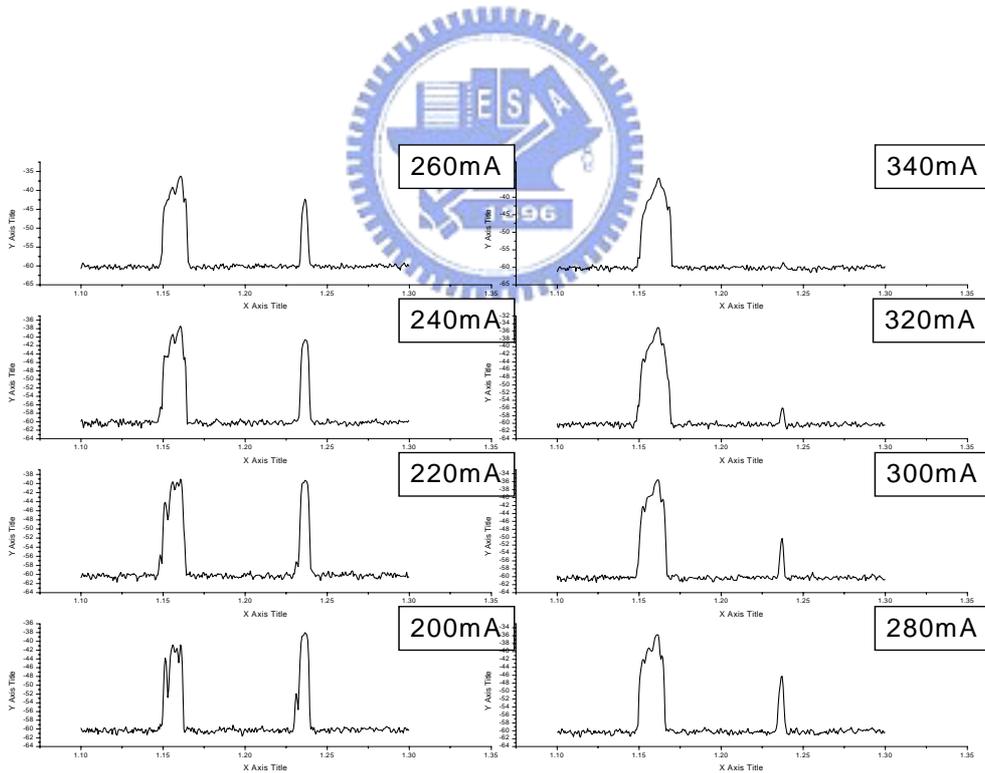


圖 4-7(b)4354 頻譜， $I=200\text{mA}\rightarrow 340\text{mA}$

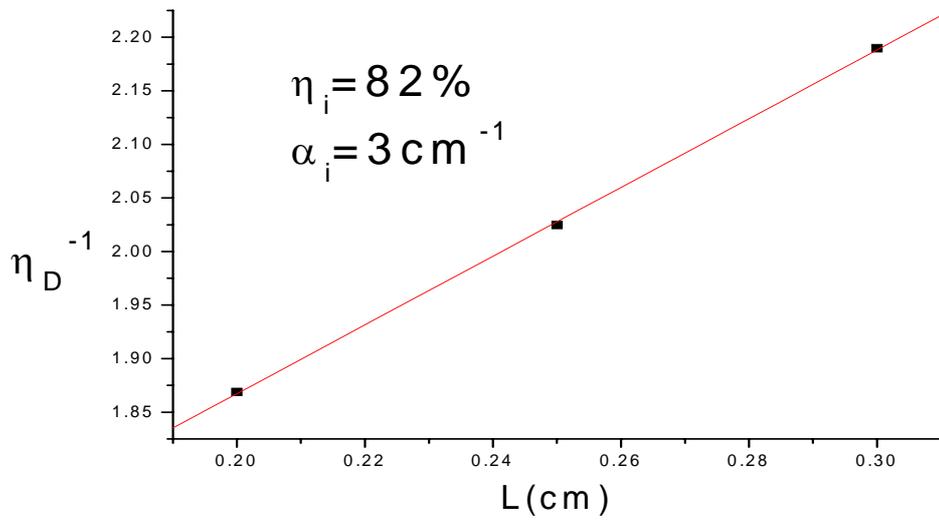


圖 4-8(a)lm4354，對 η_D^{-1} -L圖，作線性分析。

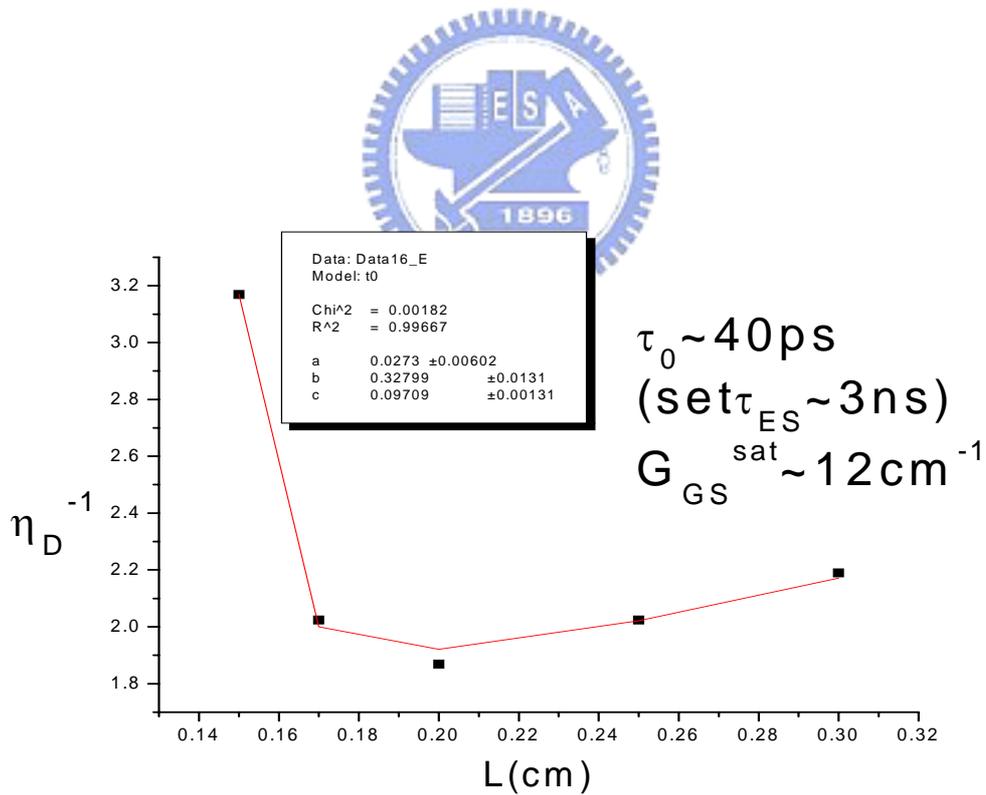


圖 4-8(b) 利用方程式 2.7(a) 對 η_D^{-1} -L圖做擬合。

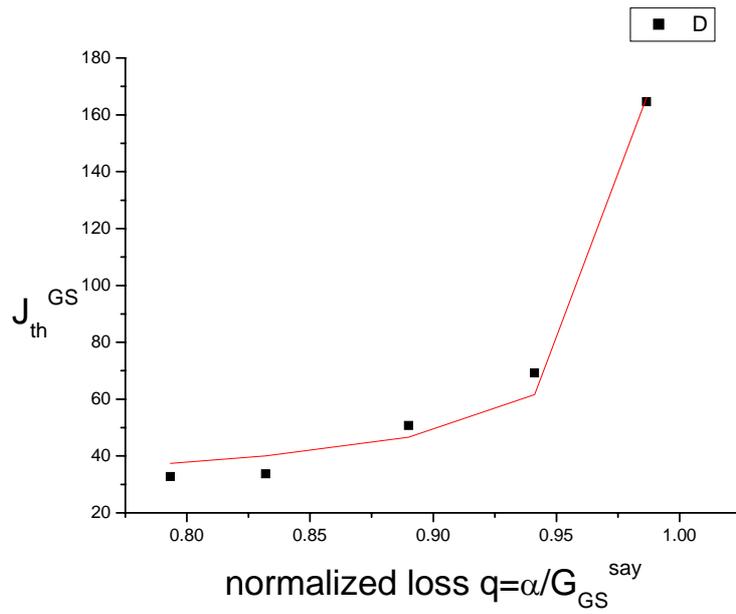


圖 4-9，利用方程式 2.6(a)對 Jth-q 圖做擬合。

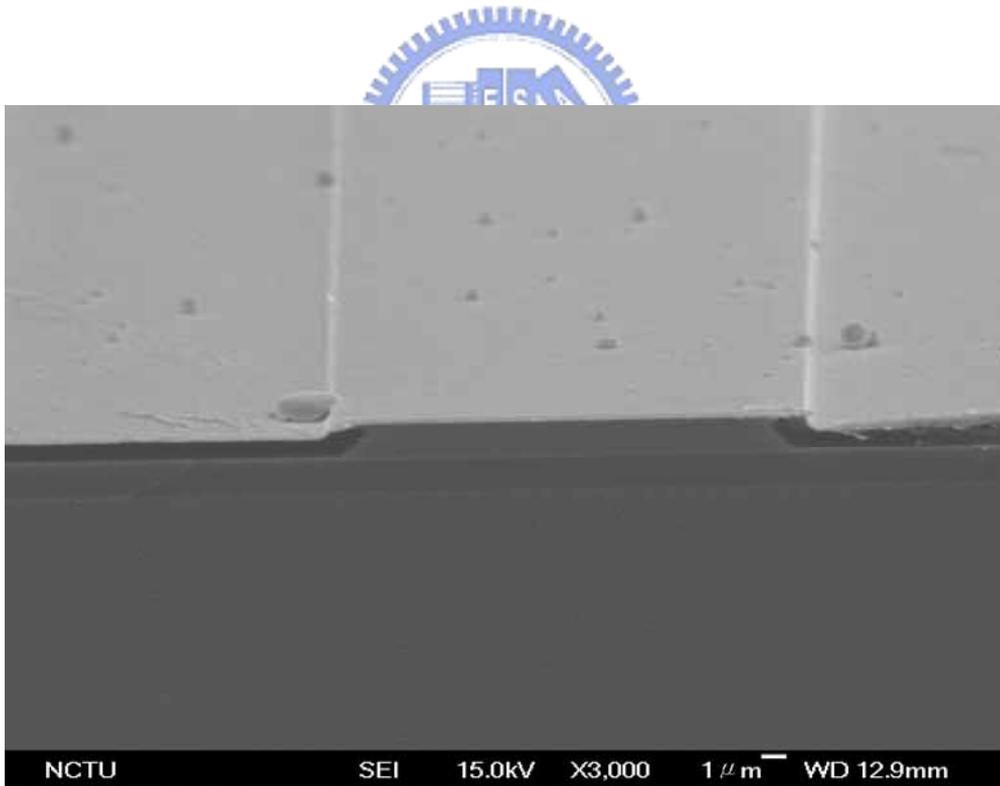


圖 4-10(a)氧化結構雷射截面圖，L=2.5mm，W=17um

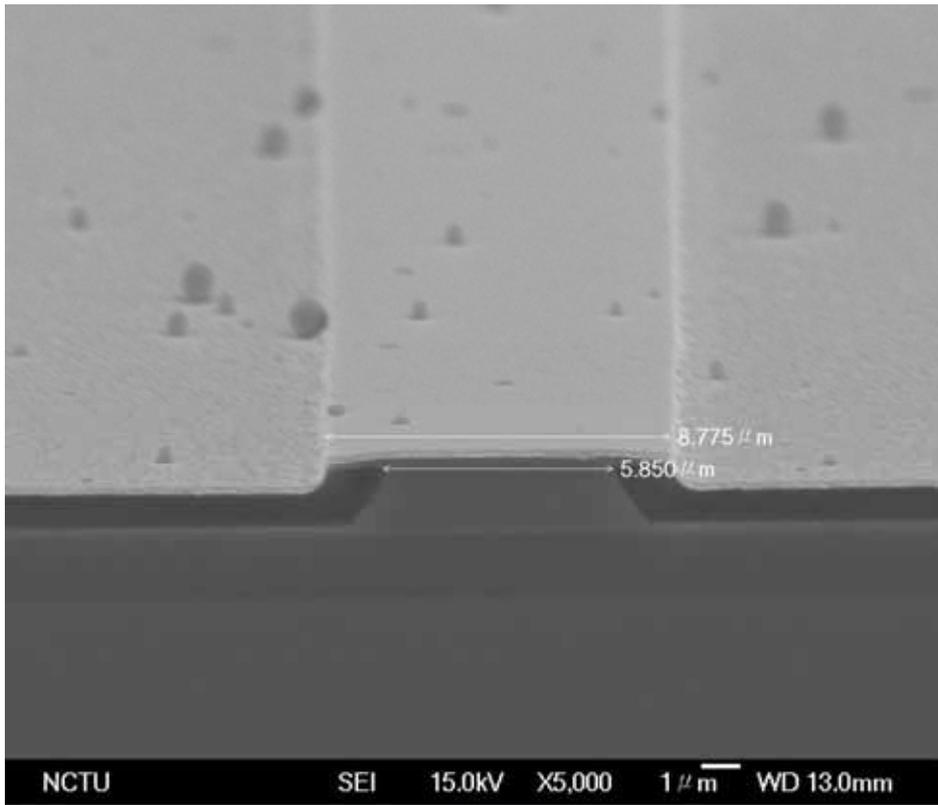


圖 4-10(b)氧化結構雷射截面圖， $L=2.5\text{mm}$ ， $W=7\mu\text{m}$

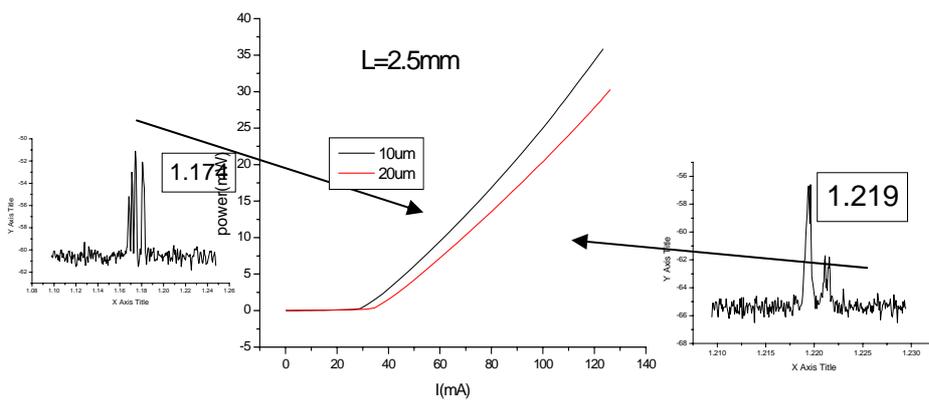


圖 4-11，對應圖 4-10 的 LI-curve，並且附上對應的發光波長。

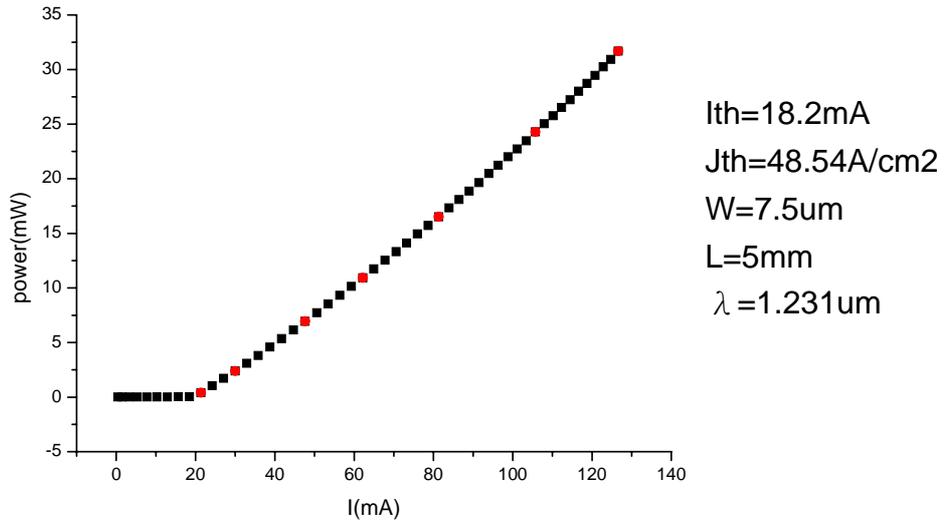


圖 4-12， $L=5.0 \text{ mm}$ ， $W=7.5 \text{ } \mu\text{m}$ ，雷射維持在 GS-lasing。

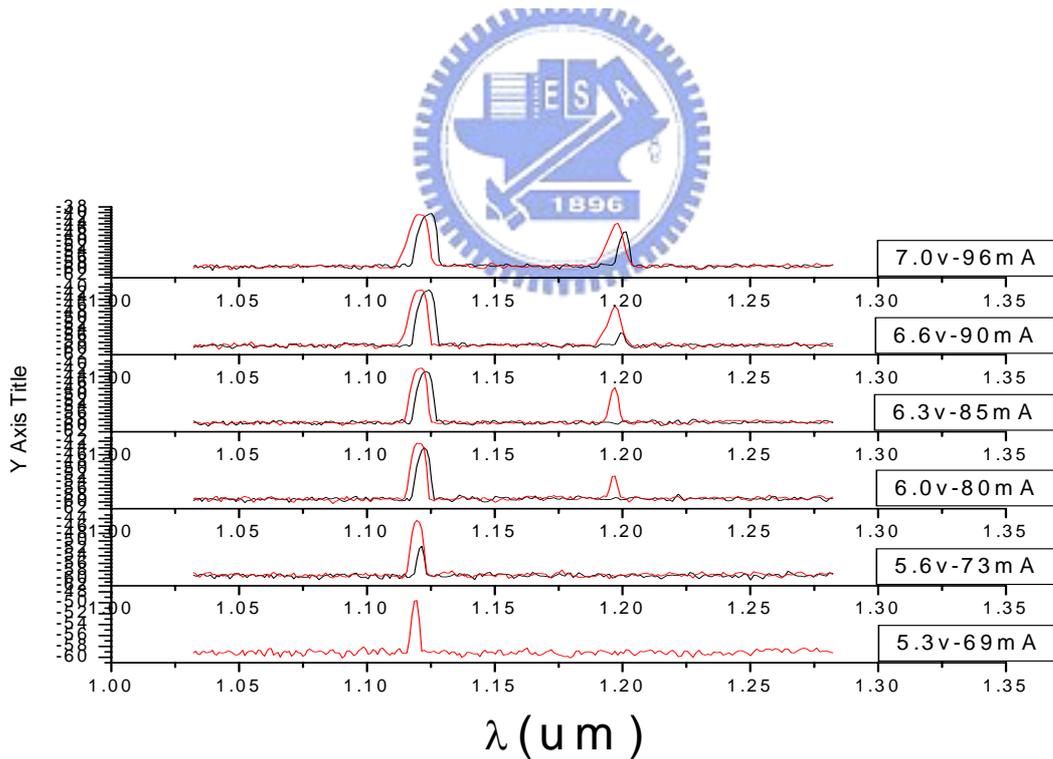


圖 4-13(a)，4378 脊狀結構雷射頻譜，圖上分別為 20°C 與 25°C 的量測。

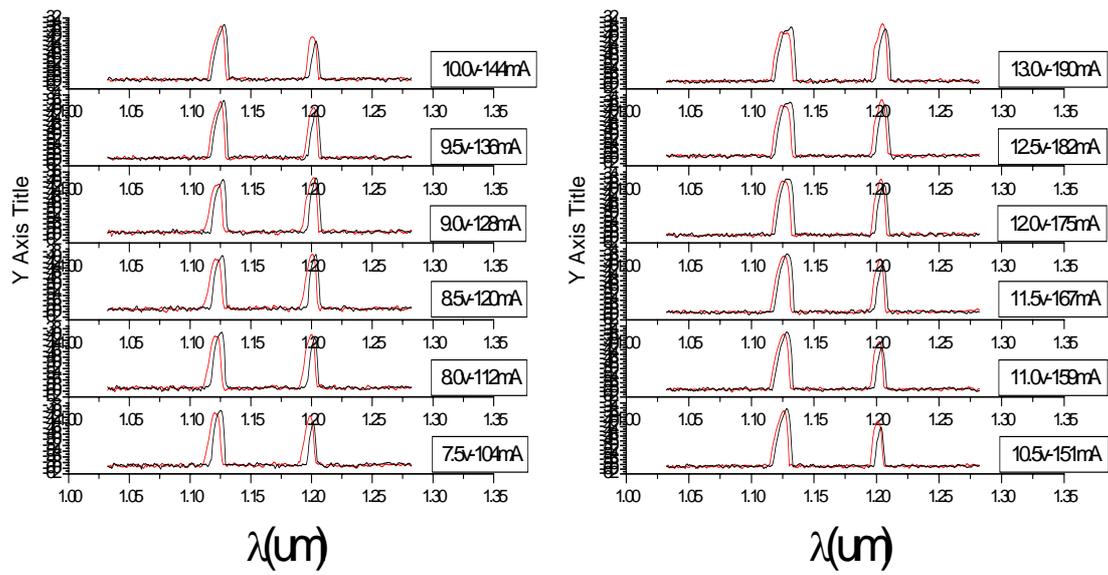


圖 4-13(b)電流在 104mA~190mA 區間，兩個波峰均維持穩定的存在。

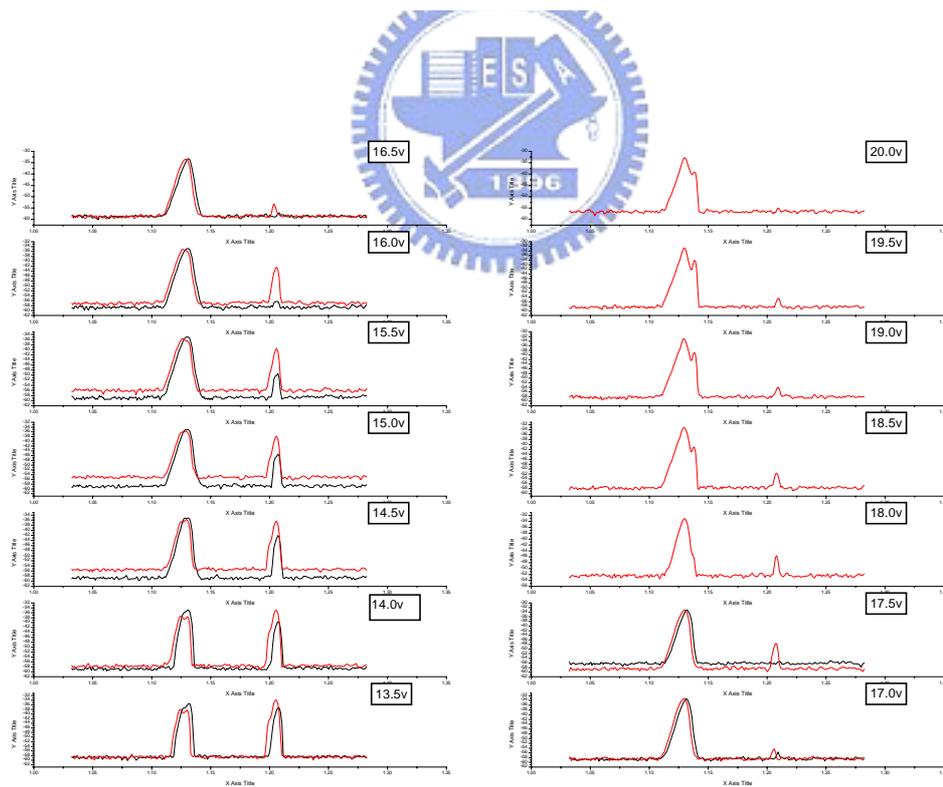


圖 4-13(c)電流持續增加直到最後基態波峰逐漸消失。

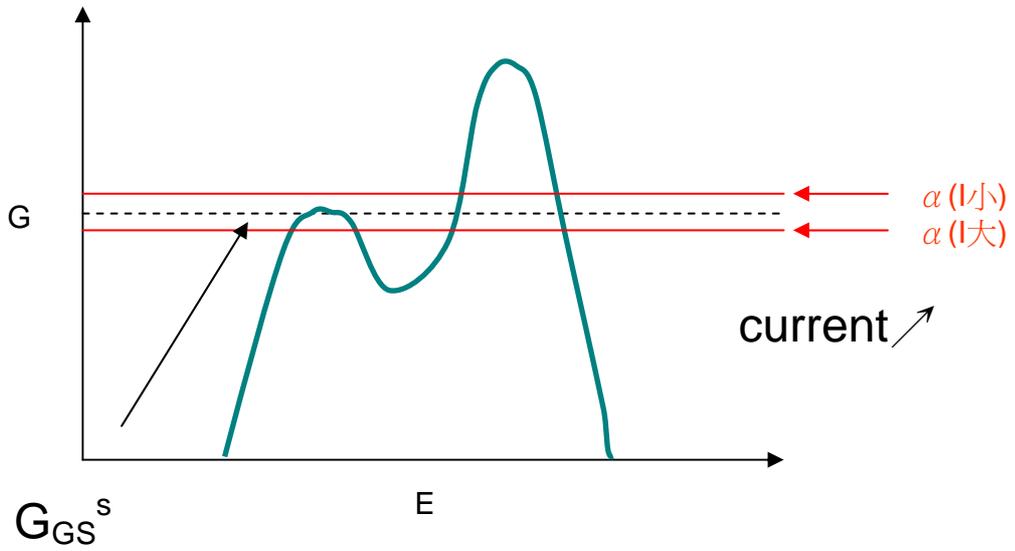


圖 4-14，在電流增加的情況下，總損耗下降，於是在 ES-lasing 發生後，有機會讓 GS-lasing 接著發生。

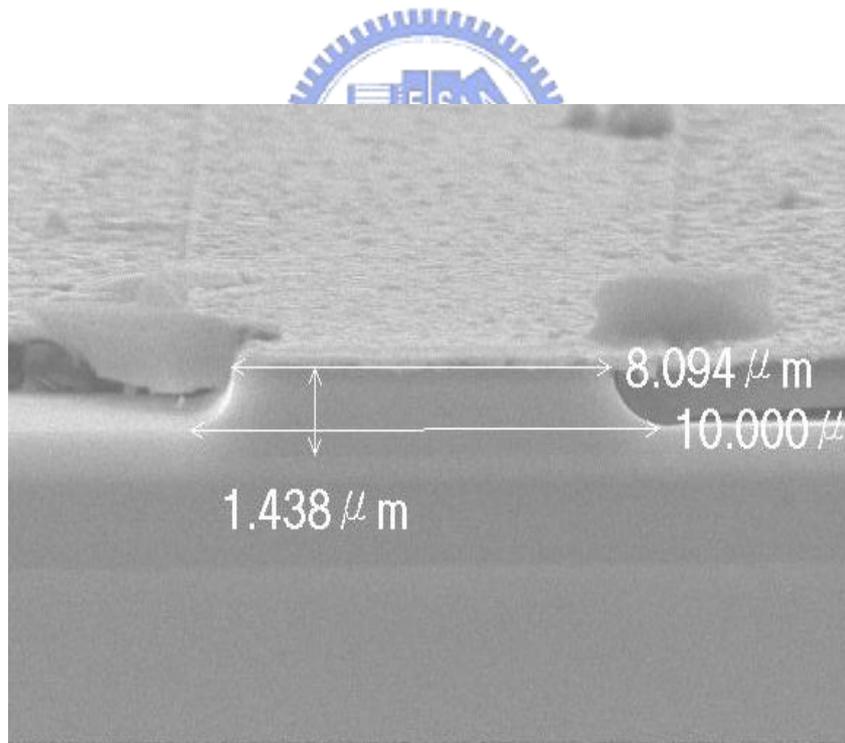


圖 4-15 該元件 SEM 影像。

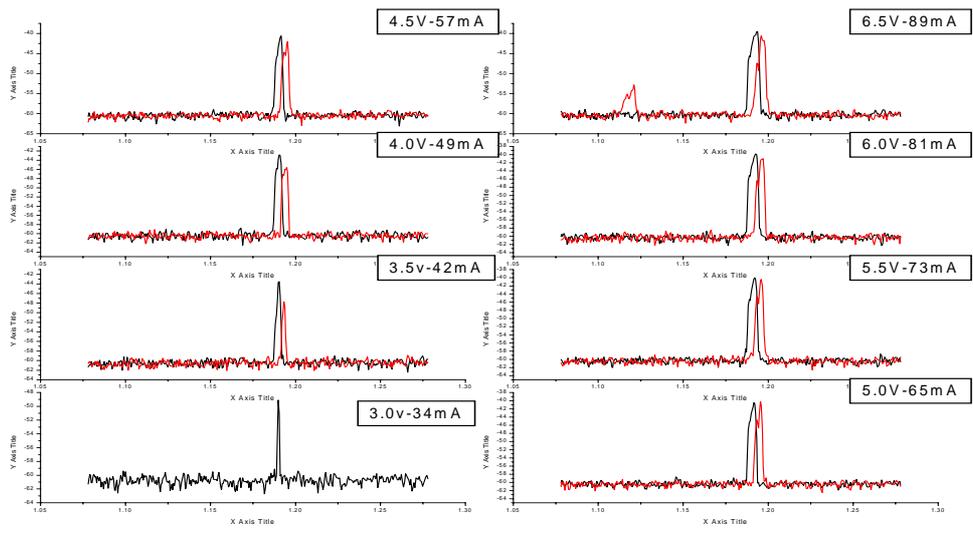


圖 4-16 (a) 溫度降到 12°C 與 16°C，重新量測該元件之雷射頻譜。

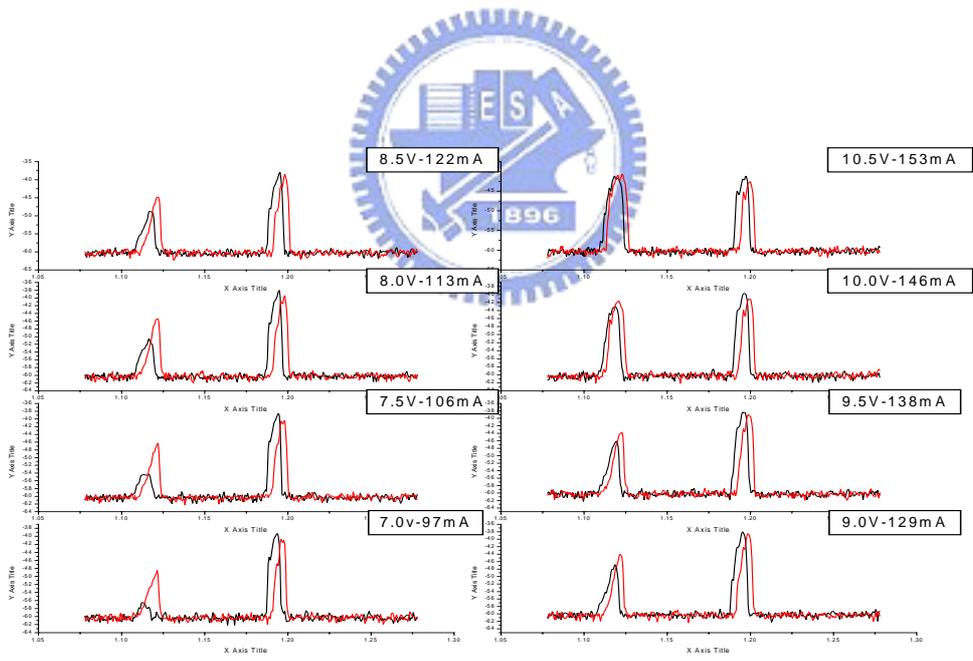


圖 4-16(b)，承上圖電流加到 97~153mA

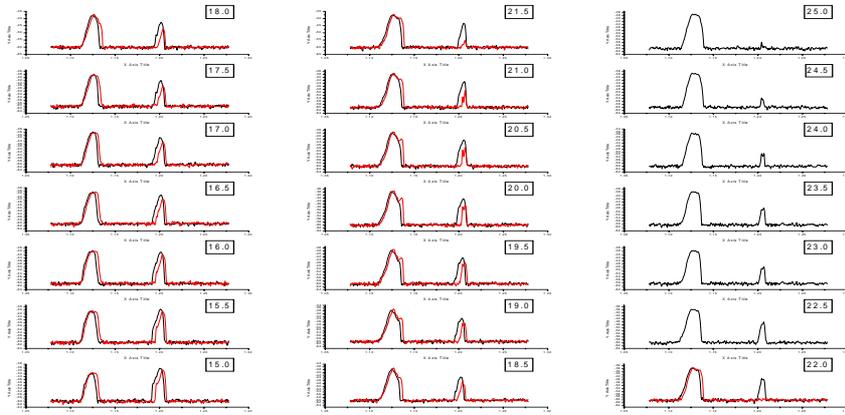


圖 4-16(c)，基態波峰在高電流下逐漸消失。

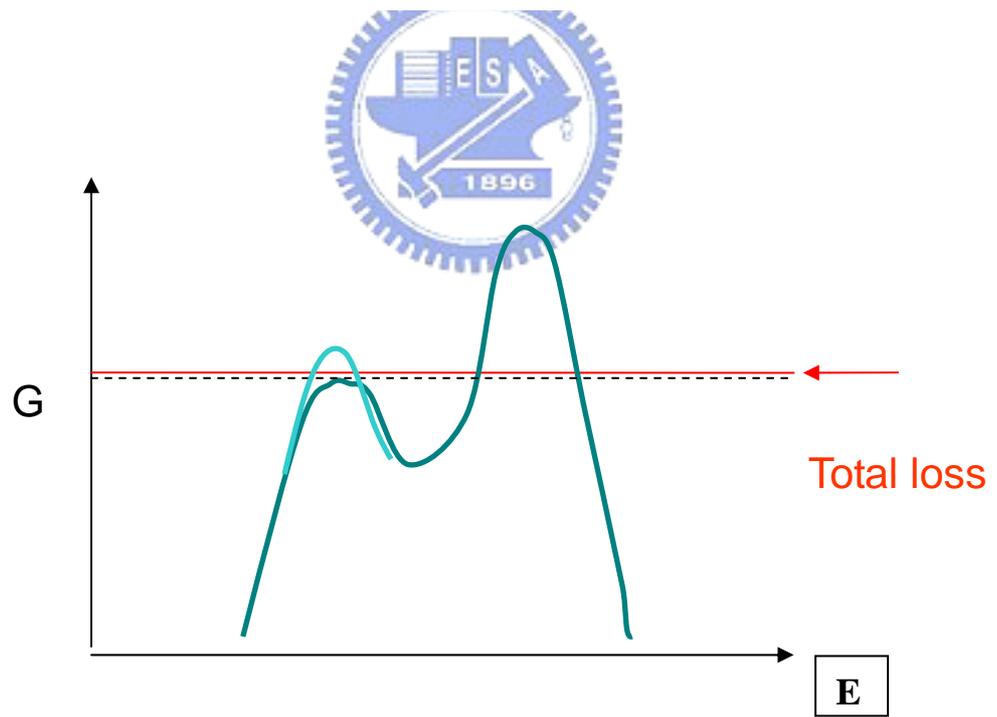


圖 4-17 在溫度由 20°C 降到 16°C 的情況下， f_{GS} 值增加，因此有較高的 G_{GS} 值，於是在低溫的情況下 G_{GS} 大於總損耗，因此轉為 GS 先雷射。

第五章 結論與未來展望

結論

我們已知製作脊狀結構雷射時，共振腔寬度的下降會造成內部損耗增加，而對於量子點雷射來說，其基態飽和增益有限，因此在製作脊狀結構雷射時要特別注意內部損耗的增加，否則將造成量子點無法在基態雷射，因此在製作脊狀結構量子點雷射時，增加共振腔長度或是在鏡面塗佈高反射率的材料，藉由降低鏡面損耗來降低總損耗是必要的。若考量高速雷射之應用，高速雷射要求元件的共振腔要短，這與我們提出的增加共振腔長度相違背，因此可考慮增加雷射飽和增益，也就是增加量子點的密度或是層數來確保雷射為基態發光。

在本實驗中我們觀察到激發態波峰先出現，基態波峰才接著出現的情形，其原因是電流在增加的過程中，發生電流分散的情形，使得等效的共振腔寬度增加，於是內部損耗下降，總損耗跟著下降，造成基態波峰有機會在激發態波峰出現後接著出現。觀察到這樣的現象，讓我們有更多的線索去瞭解內部損耗的機制，進而提出更具創新的想法。

未來展望

量子點雷射具有基態與激發態同時雷射的特性，可以善用此性質，配合光子晶體結構或是DFB(distributed feedback)結構，有機會做出可切換頻率(tunable)的量子點雷射。

参考文献

- [1] Bimberg D, Ledentsov N, JOURNAL OF PHYSICS-CONDENSED MATTER , R1063-R1076 JUN 25 (2003)
- [2] G. Park, O. B. Shchekin, D. L. Huffaker, and D. G. Deppe, “Low-threshold oxide-confined 1.3- μ m quantum-dot laser,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 230–232, (2000)
- [3] O. B. Shchekin and D. G. Deppe, “1.3 μ m InAs quantum dot laser with T = 161K from 0 to 80 C,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 3277–3279, (2002).
- [4] P. Bhattacharya and S. Ghosh, “Tunnel injection InGaAs/GaAs quantum dot lasers with 15 GHz modulation bandwidth at room temperature,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 3482–3484, 2002.
- [5] A E Zhukov ,A R Kovsh ,D A Livshits ,V M Ustinov and Zh I Alferov .
“Output power and its limitation in ridge-waveguide 1.3 μ m wavelength quantum-dot lasers” *Semicond. Sci. Technol.***18**(2003)744-781.
- [6] J. M. Dallesasse, N. Holonyak, Jr., A. R. Sugg, T. A. Richard and N. El-Zein
“Hydrolyzation oxidation of Al_xGa_{1-x}As-AlAs-GaAs quantum well heterostructures and superlattices” *Appl. Phys. Lett.* 57, 2844, (1990)
- [7] J. M. Dallesasse and N. Holonyak, Jr. ”Native-oxide stripe-geometry Al_xGa_{1-x}As-GaAs quantum well heterostructure lasers” *Appl. Phys. Lett.* ,58, 394 (1991)
- [8] S. J. Caracci, F. A. Kish, N. Holonyak, Jr. and S. A. Maranowski ; S. C. Smith and R. D. Burnham “High-performance planar native-oxide buried-mesa index-guided AlGaAs-GaAs quantum well heterostructure lasers” *Appl. Phys. Lett.* **61**, 321, (1992)
- [9] R. S. Burton and T. E. Schiesinger ;D. J. Holmgren , S. C. Smith , and R. D.

- Burnham “Self-aligned native-oxide ridge-geometry Al_xGa_{1-x}As-GaAs quantum well heterostructure laser arrays” *Appl. Phys. Lett.* ,**60** , 1776,(1992)
- [10] H.Nickel” A detailed experimental study of the wet oxidation kinetics of Al_xGa_{1-x}As layers” *J. Appl. Phys.*, **78**, 5201 (1995)
- [11] J.H. Kim, D.H. Lim ,K.S. Kim ,G.M. Yang, K.Y. Lim and H.J. Lee ”Lateral wet oxidation of Al_xGa_{1-x}As-GaAs depending on its structures ”*Appl.Phys.Lett* . **69**, 3357.
- [12] M.Ochiai, GE Giudice, H. Temkin , J.W. Scott and T.M. Cockerill “Kinetics of thermal oxidation of AlAs in water vapor” *Appl. Phys. Lett.* ,**68**,1898.
- [13] A. R. Sugg, N. Holonyak, Jr., J. E. Baker, F. A. Kish, and J. M. Dallesasse ”Native oxide stabilization of AlAs-GaAs heterostructures” *Appl. Phys. Lett.* ,**58**, 1199,(1991)
- [14] G. walter, T. Chung, and N. Holonyak, Jr. “High-gain coupled InGaAs quantum well InAs quantum dot AlGaAs-GaAs-InGaAs-InAs heterostructure diode laser operation” *Appl. Phys. Lett.* ,**80** ,1126,(2002)
- [15] A.Markus, J.X.Chen, C.Paranthoen, and A.Fiore ; C. Platz ; O. Gauthier-Lafaye “Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers ”*Applied Physics Letters*, **82** ,1818.(2003)
- [16] A Markus, J.X.Chen, O. Gauthier-Lafaye , Jean-Guy Provost , C.Paranthoen, and A.Fiore “Impact of intraband relaxation on the performance of a quantum-dot laser” *IEEE Journal of topics in quantum electronics*” **vol19**, NO.5, (2003)
- [17] S. Krishna, P. Bhattacharya, J. Singh, T. Norris, J. Urayama, P. J. McCann, and K. Namjou, “Intersubband gain and stimulated emission in long-wavelength ($\lambda = 1.3\mu\text{m}$) intersubband In(Ga)As/GaAs quantum-dot electroluminescent devices,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 37, pp. 1066–1074, Aug. 2001.
- [18] R. Heitz, A. Kalburge, Q. Xie, M. Grundmann, P. Chen, A. Hoffmann, and D.

Bimberg, “Excited states and energy relaxation in stacked InAs/GaAs quantum dots,” *Phys. Rev. B*, vol. 57, pp. 9050–9060, 1998.

[19] S. Raymond, S. Fafard, P. J. Poole, A. Wojs, P. Hawrylak, S. Charbonneau, D. Leonard, R. Leon, P. M. Petroff, and J. L. Merz, “State filling and time-resolved photoluminescence of excited states in In Ga As/GaAs self-assembled quantum dots,” *Phys. Rev. B*, vol. 54, pp. 11 548–11 554, 1996.

[20] A. Fiore, P. Borri, W. Langbein, J. M. Hvam, U. Oesterle, R. Houdre, R. P. Stanley, and M. Ilegems, “Time-resolved optical characterization of InAs/InGaAs quantum dots emitting at 1.3 μm ,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 911–913, 2002.

[21] M. C. Tatham, J. F. Ryan, and C. T. Foxon, “Time-resolved raman measurements of intersubband relaxation in GaAs quantum wells,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 63, pp. 1637–1640, 1989.



簡歷 (Vita)

姓名：楊仁盛(Yang, Jen-Sheng)

性別：男

出生年月日：民國 68 年 10 月 11 日

籍貫：台灣屏東

學歷：

國立交通大學電子物理學系學士(89.9-92.6)

國立交通大學電子研究所碩士班(92.9-94.6)

碩士論文題目：

半導體量子點雷射之研究

Studies of Semiconductor quantum dots Lasers

