

國立交通大學

光電半導體與奈米科技產業研發碩士班

碩士論文

高功率單模態面射型雷射技術之研究

A Study of high power single mode Vertical-cavity
surface-emitting laser



研究生：宋美佳

指導教授：郭浩中 教授

林烜輝 教授

中華民國九十七年十月

高功率單模態面射型雷射技術之研究

**A Study of high power single mode Vertical-cavity
surface-emitting laser**

研究生：宋美佳

Student : Mei-Chia Sung

指導教授：郭浩中 教授

Advisor : Hao-Chung Kuo

林烜輝 教授

Shiuan-Huei Lin



A Thesis
Submitted to College of Science
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master
in
Industrial Technology R & D Master Program on
Optoelectronics and Nano Technology
January 2008
Hsinchu, Taiwan, Republic of China
中華民國九十七年十月

單模態面射型雷射製程技術之研究

研究生：宋美佳

指導教授：林烜輝 教授

郭浩中 教授

國立交通大學

理學院光電半導體與奈米科技產業研發碩士班

中文摘要



高功率單模態的面射型雷射，一直是近年來大家努力的方向之一。主要受限於發光的孔徑大小，單模態面射型雷射的特性，一直難以提昇。

本文藉由氧化和鋅擴散技術，嘗試以不同的發光幾何孔徑，來達成高功率和單一空間模態的操作特性，在實驗上，主要設計並製作了兩種幾何圖形作為發光孔徑並搭配兩種擴散深度來進行分析：發光孔徑分別是三圓形和花瓣狀，而擴散深度分別有1及1.4 μm 。尤其是花瓣狀在擴散深度1.4 μm 特性表現上，元件Slop efficiency可達0.48 W/A，在8mA電流操作下仍可維持單模操作。這也證明了這種幾何圖形的發光孔徑，搭配上氧化和鋅擴散技術，具有相當優異的特性。

A Study of high power single mode Vertical-cavity surface-emitting laser

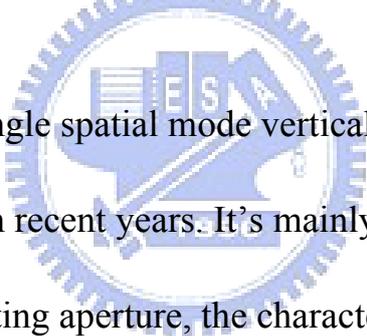
Student : Mei-Chia Sung

Advisor : Hao-Chung Kuo

Shiuan-Huei Lin

**Industrial Technology R & D Master Program of Science College
National Chiao Tung University**

Abstract



High power and single spatial mode vertical cavity surface-emitting lasers were developed in recent years. It's mainly limited by the magnitude of light-emitting aperture, the characteristics of single mode VCSEL is difficult to improve.

In this thesis, we demonstrate the single spatial mode vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL) with a three- circle shaped light-emitting aperture and single spot floral ring-type laser array, respectively. These devices are realized by the oxidation and Zn diffusion technique, we fabricated the devices with two different depth of Zn-diffusion to compare their characteristics. at a wavelength of 850nm. According to

our experiment results, The device of single spot floral ring-type in the Zn-diffusion $1.4\mu\text{m}$ its slope efficiency is 0.48 W/A , and the lasing spot can still maintain spatial single-mode under the 8mA electric current operation.



誌謝

九百多個日子的煎熬終於要過去了，讓我從一個只懂得製程實務面的大學生進而學習到碩士生的專業理論研究精神，在求學過程中最煎熬的就是公司與學業的拔河戰，雖然忙碌但讓自己這兩年多的日子感覺過的是特別充實，寫論文是我最後一個要向自己及學校交的功課了，或許也還有另一個挑戰等待著自己，但我相信人唯有不斷充實自我及吸收新知才不會走後退路。

感謝我的家人，還有最支持我的同事及老師、同學，有你們的支持，才讓我在求學路上感覺不孤單，如果沒有你們，就不可能拿到從小夢寐以求的交大研究所學歷，這份榮耀是屬於你們的。

這篇論文能夠完成，由衷的感謝指導教授郭老師的支持與教導，提供良好的研究環境，並適時的指正思考方向及主軸，讓我在每一次的實驗討論中獲得不少新的知識及啟發我無限的思維；也感謝賴芳儀學姐的指導；感謝我的學弟招恩、治凱每次帶我操作電性量測儀器；也感謝鼎元光電研發處 宋協理提供我實驗上所需之器材及設備，小胖、胖胖、海賊王、老頭、小孟及所有共同陪伴我共事的同仁，感謝你們在遇到實驗瓶頸時能適時的提出良好的見解及經驗，讓我在這條路上不至於感到孤單無助。

我親愛的朋友們，因為有你的陪伴才讓我得以繼續往前邁進，我將在人生旅途中繼續努力及接受挑戰，在未來人生路上我將更能克服其他難關。

目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
致謝	IV
表目錄	V
圖目錄	VI
第一章 導論	1
1-1 前言	1
1-2 歷史回顧	4
1-3 VCSEL 應用	8
第二章 理論	11
2-1 面射型雷射的基本原理	11
2-2 VCSEL 選擇性水氧化理論	15
2-3 VCSE 鋅擴散於 DBR 理論	18
2-4 典型面射型雷射之介紹	22
2-4-1 氧化物侷限之面射型雷射	22
2-4-2 氧化物及鋅擴散侷限之面射型雷射	23
2-4-3 離子佈植方式之面射型雷射	23
2-4-4 蝕刻空氣台柱結構	24

第三章 半導體製程及特性量測	26
3.1 VCSEL 磊晶結構.....	26
3.2 元件設計.....	28
3.3 製程.....	32
3.3.1 VCSEL 試片準備.....	32
3.3.2 鋅擴散製程.....	32
3.3.3 濕氧化製程.....	37
3.3.4 製作 p-type 電極以及金屬回火.....	41
3.3.5 製作 n-type 電極以金屬回火.....	43
3.4 特性量測.....	45
3.4.1 L-I-V Curve 與光譜量測.....	45
3.4.2 近場模態測量.....	46
第四章 結果與討論	47
4.1 氧化型 VCSEL 量測結果.....	47
4.1.1 電流電壓 I-V 曲線.....	47
4.1.2 輸出光功率對電流(L-I)曲線.....	48
4.1.3 頻譜圖.....	49
4.2 氧化型合併擴散型 VCSEL 量測結果.....	51
4.2.1 電流電壓 I-V 曲線.....	51

4.2.2 輸出光功率對電流(L-I)曲線	52
4.2.3 頻譜圖	54
4.2.4 近場(Near field)模態	56
第五章 結論	57
參考文獻	58



表目錄

表一 半導體光源特性表.....	1
表二 VCSEL 在各波長下之材料選擇.....	7
表三 IQE IEGENS-7-20 晶片之詳細資料.....	27
表四 擴散圖形與擴散深度 VCSEL 元件光電特性表.....	54



圖目錄

圖1-1 Chalmers University of Technology研究之面射型雷射，氧化孔徑為 $2\mu\text{m}$	2
圖1-2 氧化孔徑與鋅擴散孔徑比較示意圖.....	3
圖1-3 (a) 面射型雷射 (b) 邊射型雷射.....	5
圖1-4 典型的面射型雷射.....	6
圖1-5 單模及多模VCSEL 對光二極體資料傳輸之示意圖.....	8
圖1-6 VCSEL 光學產品的基本應用.....	9
圖1-7 Intel' s 10GHz Nehalem CPU.....	10
圖1-8 光連結科技未來藍圖.....	10
圖2-1 面射型雷射的結構.....	11
圖2-2 面射型雷射的概要圖.....	13
圖2-3 面射型雷射在不同反射率下之電流密度與增益厚度 d 之關係圖.....	14
圖2-4. 氧化模與共振腔模同時出現互相影響.....	17
圖2-5 經過鋅擴散後的DBR 反射率與鋅擴散深度關係.....	19
圖2-6 於共振腔結構中產生的多模與放射單模雷射光束示意圖.....	20
圖2-7 經過計算的臨界增益 G_{th} (實線)，是VCSEL 中擴散深度的函數.....	21

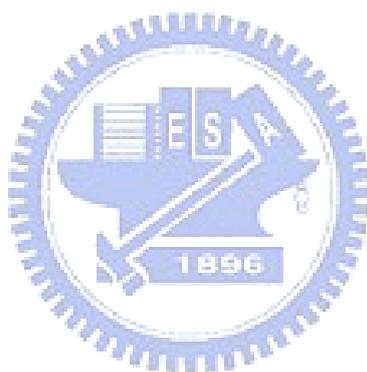
圖 2-8 典型面射型雷射(a) Selective oxidation (b) Zn diffusion - oxidation (c) roton - implant (d) Air - post type.....	25
圖3-1 Furukawa所設計高功率單模態VCSEL(a)元件尺寸及結構圖(b) 近場圖(c)遠圖.....	28
圖3-2 擴散元件之花瓣狀發光孔徑圖形.....	29
圖3-3 National Taiwan University所設計單模態VCSEL(a)元件結構圖 (b)出光孔徑5 μm 之L-I curve(c)) 出光孔徑5 μm 之頻譜圖.....	30
圖3-4 擴散元件之三圓形發光孔徑圖形.....	31
圖3-5 沉積一層2000Å 的SiO ₂ 示意圖.....	32
圖3-6 旋塗光阻定義出擴散區域示意圖.....	33
圖3-7 乾蝕刻完之圖形示意圖.....	33
圖3-8 RIE蝕刻SiO ₂ 完的實際圖形.....	34
圖3-9 以氫氧焰封管示意.....	34
圖3-10 鋅擴散之示意圖.....	35
圖3-11 ECV所量測鋅擴散10分鐘之深度.....	36
圖3-12 ECV所量測鋅擴散15分鐘之深度.....	36
圖3-13 成長Si ₃ N ₄ 介電層示意圖.....	37
圖3-14 RIE蝕刻Si ₃ N ₄ 示意圖.....	38
圖3-15 蝕刻GaAs 半導體部分示意圖.....	39

圖3-16 經過111 蝕刻之上視圖照片.....	39
圖3-17 選擇性橫向氧化侷限製程示意圖.....	40
圖3-18 OM觀察到的氧化時間與孔徑之關係圖.....	41
圖3-19 RIE蝕刻SiO ₂ 層開窗示意圖.....	42
圖3-20 蒸鍍p-type 電極示意圖.....	43
圖3-21 蒸鍍N-type 電極示意圖.....	44
圖3-22 氧化型合併鋅擴散VCSEL元件(a)三圓形 (b)花瓣形.....	44
圖3-23 量測L-I-V Curve系統示意圖.....	45
圖3-24 近場投影量測系統.....	46
圖4- 1 I-V 特性曲線.....	47
圖4-2 L-I 特性曲線.....	48
圖4-3 氧化孔徑7 μ m 相對頻譜圖.....	49
圖4-4 氧化孔徑11 μ m 相對頻譜圖.....	50
圖4-5 鋅擴散合併氧化孔徑11 μ m I-V 特性曲線 (a)三圓型(b)花瓣型	52
圖4-6 鋅擴散合併氧化孔徑11 μ m L-I特性曲線 (a)三圓形 (b)花瓣形	53
圖4-7 三圓形鋅擴散圖形合併氧化元件之相對頻譜圖 (a)1 μ m (b) 1.4 μ m.....	54

圖4-8 花瓣形鋅擴散圖形合併氧化元件之相對頻譜圖 (a)1 μ m (b)
1.4 μ m.....55

圖4-9 三圓形VCSE在1mA~7mA~之近場模態.....56

圖4-10 花瓣形VCSE在1mA~9mA~之近場模態.....56



第一章導論

1-1 前言

隨著人類文明及科技的演進，從大範圍的通訊市場一直到民生消費性電子產品，人們的依賴已隨之提升，如何讓訊息透過高速度、高容量、精確以及安全保密的通訊系統傳輸是相當重要的課題，而光通訊元件兼具了以上的優點，因此近年來光通訊元件受到全球廣泛的研究，並且名列近年來最受矚目的光電產業之一。VCSEL對比於LED及傳統邊射型雷射因具備以下特點而大量使用於光通訊元件[1]。



	Unit	LED	Edge emitter	Single-mode VCSEL
Threshold Current	mA	-	20	<1
Operating Current	mA	100	30	<5
Power Dissipation	mW	200	100	<10
Modulation Bandwidth	GHz	0.1	2	5
Slope Efficiency	W/A	0.01>	0.3	0.5<
Beam Divergence (FWHM)	deg.	100	30 \perp ,10//	20
Spectral Width	nm	50	0.3	0.01
Astigmatism	-		3	1

表一 半導體光源特性表

近年來研究單位所研究之高速面射型雷射，一般皆利用氧化型面射型雷射來製作，原因是離子佈值型面射型雷的電流侷限並不如氧化型面射型雷射，所以在高速的表現上，氧化型的面射型雷射會優於離子佈值型。

為了製作單模之面射型雷射，我們必須把氧化孔徑降低，使邊模(side mode)能夠被抑止。但若將氧化孔徑降低，輸出功率會降低，且氧化孔徑降低，主動區電阻就會上升，熱效應也就會更加的明顯。元件會有提早產生阻尼(damping)的現象，這也將會影響元件的速度[2]。如圖1-1，雖然是單模操作，但是輸出功率很低，且阻尼現象也很嚴重，導致速度表現不理想。

所以有研究單位就提出使用表面浮雕(surface relief)的方法來製作高速單模之面射型雷射[3]，而或同時利用離子佈值及氧化製程之面射型雷射[4]。而我們的方法是利用鋅擴散的製程，去抑止邊模的產生，也不需要降低氧化孔徑，而是利用鋅擴散之孔徑來控制發光區域，如圖1-2 所示。

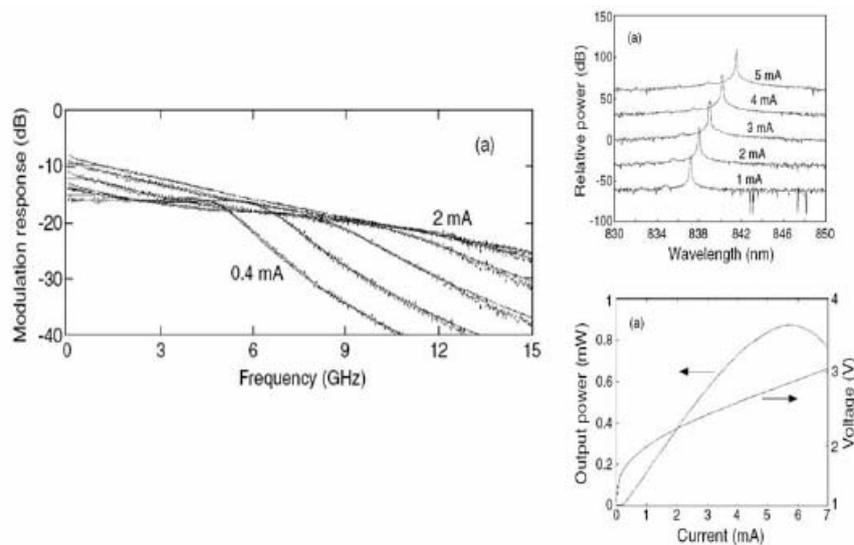


圖1- 1. Chalmers University of Technology研究之面射型雷射，氧化孔徑為2 μ m[5]

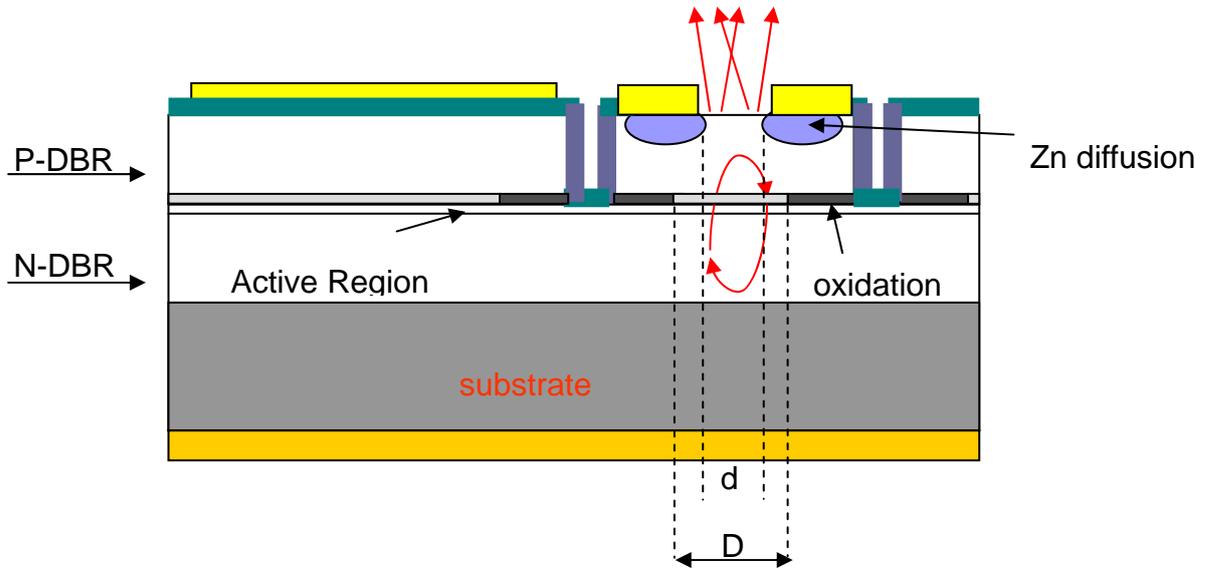


圖1-2 氧化孔徑與鋅擴散孔徑比較示意圖



1-2 歷史回顧

面射型雷射 (Vertical Surface Emitting Laser, VCSEL) 是一種光發射路徑與磊晶層垂直之半導體雷射，在此雷射被提出前，半導體雷射主要是以邊射型雷射 (Edge Emitting Laser) 為主，而邊射型雷射所發射出的光源是與磊晶層平行。第一個VCSEL是在1979年由H. Soda, K. Iga, F. Koyama and S. Kinoshita (Soda 1979) 所發表[6]。到了1988年，Fumio Koyama 就發展出能在室溫下給予直流電操作的GaAlAs/GaAs VCSEL，且達到所需要的單一模式，圖形不易發散，且雷射光束有極細的輸出結果[7]。此時的VCSEL 的共振腔已經非常小 (microcavity)；主要有效發光層直徑也只有幾個 μm ；具有高反射率 ($R > 95\%$) 的DBR (Distributed Bragg Reflector) 反射鏡。而如此精細的多層結構也須仰賴較精細的長晶機器，如：分子束磊晶MBE (Molecular Beam Epitaxy)，有機金屬化學氣相沈積法MOCVD (Metalorganic Chemical Vapor Deposition) 等機器。它們提供了準確的薄膜厚度控制，好的表面平整度。

90年代末期面射型雷射 (Vertical Surface Emitting Laser, VCSEL) 快速發展並廣泛應用到光學元件上，到了1992年，GaAs基材的VCSEL廣泛地被應用在0.98、0.85、0.78 μm 波長通訊元件上且目前已商業化導入光學系統。在光纖應用上VCSELs已成為理想的雷射光源。

圖 1-3 說明了 VCSEL 相較於傳統邊射型雷射之差異，而 VCSEL 具有以下優點：

- (1)低發散之圓形雷射光束，易與光纖耦合。
- (2)具有快速調變功能，利於高速光纖網路傳輸。
- (3)元件製程技術適於大量生產。
- (4)磊晶片在未切割及封裝前即可進行晶粒特性檢測，成本較低。
- (5)可做成一維(1D)或二維(2D)雷射陣列，利於串接或並列式光纖傳輸

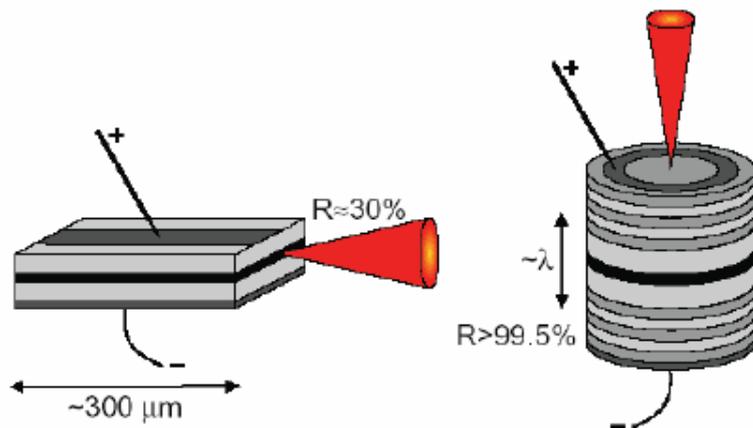


圖1-3

(a) 面射型雷射 (b) 邊射型雷射

典型的面射型雷射由二個平行反射面、中間一層薄的活性層構成(圖 1-4)，尤如一個三明治結構一般，而雷射要到達激發放射需有高反射率的 DBR，其反射比通常要高於 99.9%，此外，活性層的主要目的是使電子與電洞能在此區復合(recombination)以產生光子，因此如何增加載子限制(carrier confinement)以提高複合機率，成為活性層設計之主要方向。

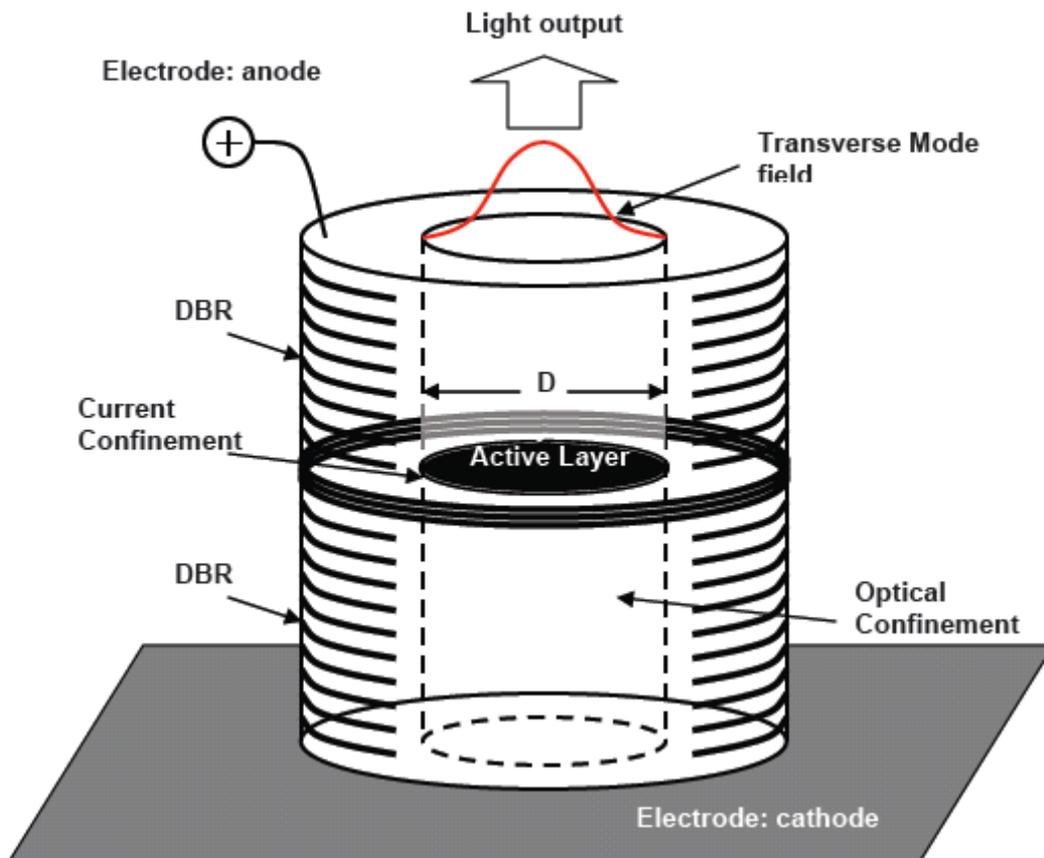
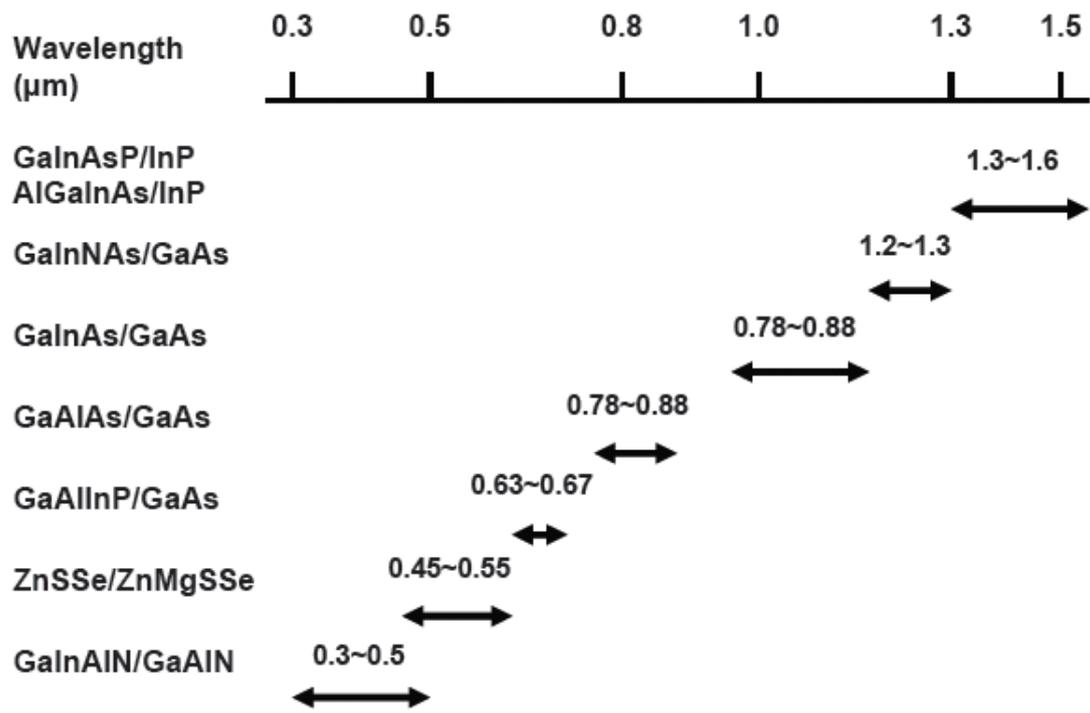


圖1-4 典型的面射型雷射

表二為不同波長下之半導體雷射材料的選擇，顯示基板 and 晶格常數有相對應的關係，而在設計 VCSEL 雷射元件有以下有幾個重點必須被考量到：

- (1) 共振腔和模態的設計。
- (2) 布拉格反射面(DBR)對數影響之鏡面反射比率。
- (3) 高溫高功率操作下之元件熱效應

次外，雷射元件若應用於光通訊時，材料的阻抗在傳輸速率上是很重要的因子。



表二 VCSEL在各波長下之材料選擇



1-3 VCSEL應用

VCSEL 應用在光連結方面，多模的面射型雷射因在光束中有好幾種橫向(transverse mode)模態，所以它的發散角會較單模之面射型雷射大，所以單模的面射型雷射會有較好的耦合效率，且通訊元件應用於光連結時，需要很多發光源，若發光源之發散角太大，與鄰近之發光源產生干擾，就會使資料在傳輸中發生錯誤，所以我們需要一個發散角小的發光源，而單模的VCSEL 就有此項優點，所以光傳輸之發光源必須使用單模VCSEL來製作。圖1-5為單模以及多模VCSEL 在資料傳輸時之示意圖。

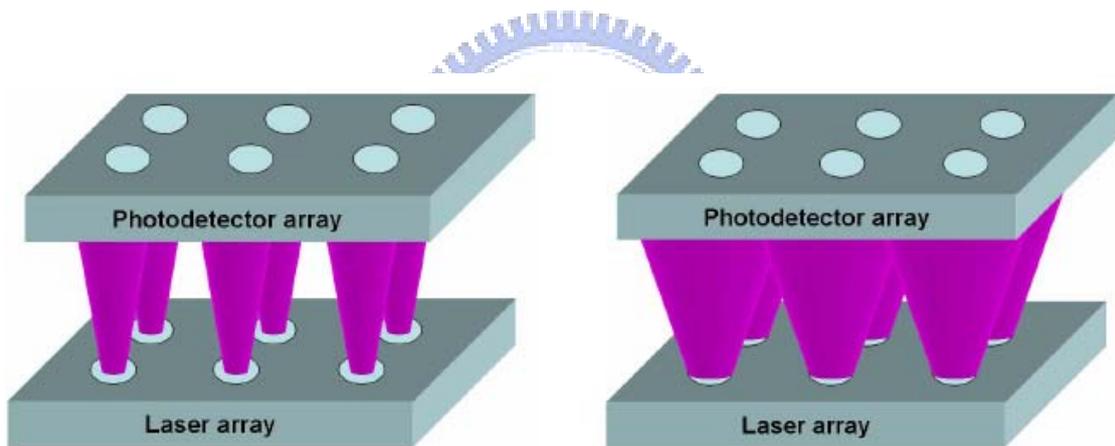


圖1-5 單模及多模VCSEL 對光二極體資料傳輸之示意圖

目前VCSEL的應用領域已涵蓋數據通訊、光列印機、光資訊產品、掃描器及光感測器等，如圖1-6，且已廣泛地使用在光纖區域網路之中[8]。在未來IT產業系統需要處理及傳輸更龐大的資料，則要有一個高速的處理晶片，其中Intel 10 GHz CPU發展時程，預期2007至2010年可商品化問世，如圖1-7。故在未來更高速的系統或晶片之間須有一個符合高速需求的傳輸媒

介來支援，因此以光學當作連接媒介想法被提出，架構藍圖如圖1-8[9]。

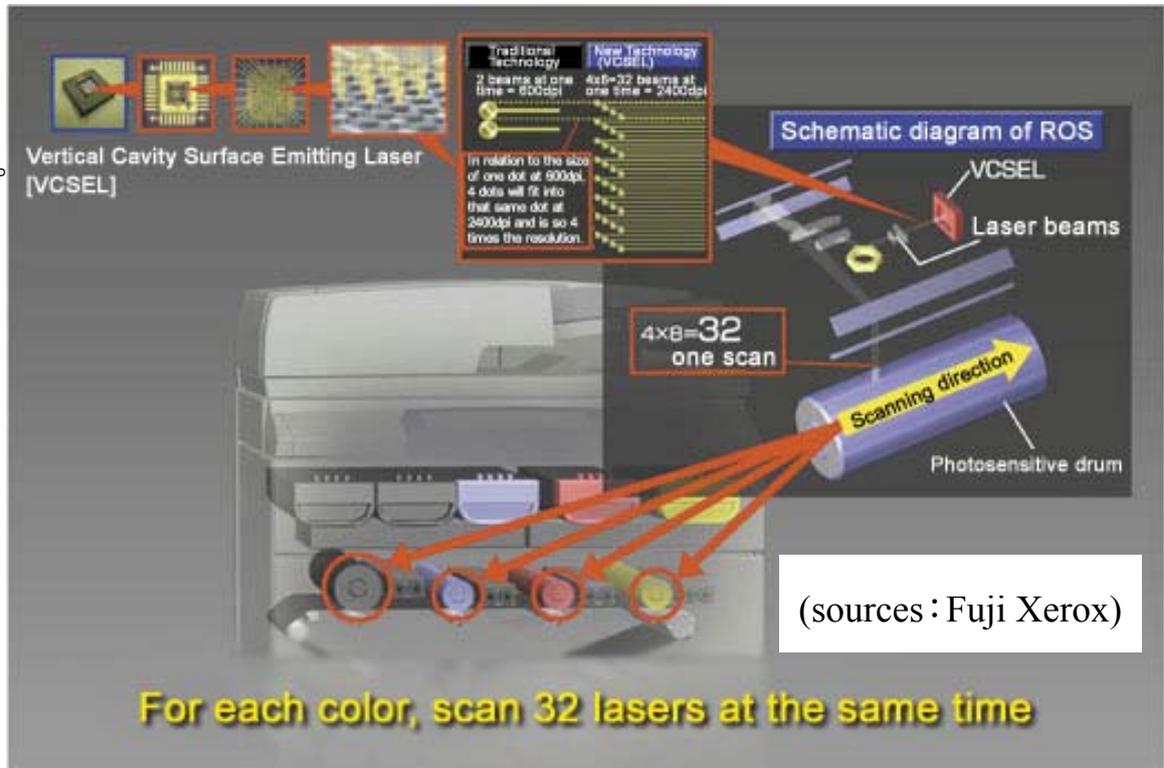
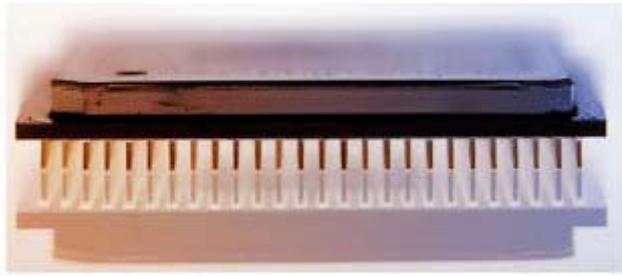


圖1-6 VCSEL 光學產品的基本應用



(sources : Intel)

圖1-7 Intel' s 10GHz Nehalem CPU



圖1-8 光連結科技未來藍圖

第二章 理論

本章節中，先介紹本實驗所採用的製程基本理論，以及面射型雷射的四種基本結構，鋅擴散、水氧化為本論文實驗的重點，且最後簡單的探討製成之後的VCSEL元件的光電特性。

2-1 面射型雷射的基本原理

面射型雷射有一個活化層(active layer)，活化層的增益係數為 γ 、厚度為 d ，活化層被一對DBR(distributed Bragg reflectors)像三明治一樣夾住，DBR 的反射率分別為 R_1 與 R_2 ，其有效距離為 L ，如圖2-1所示。

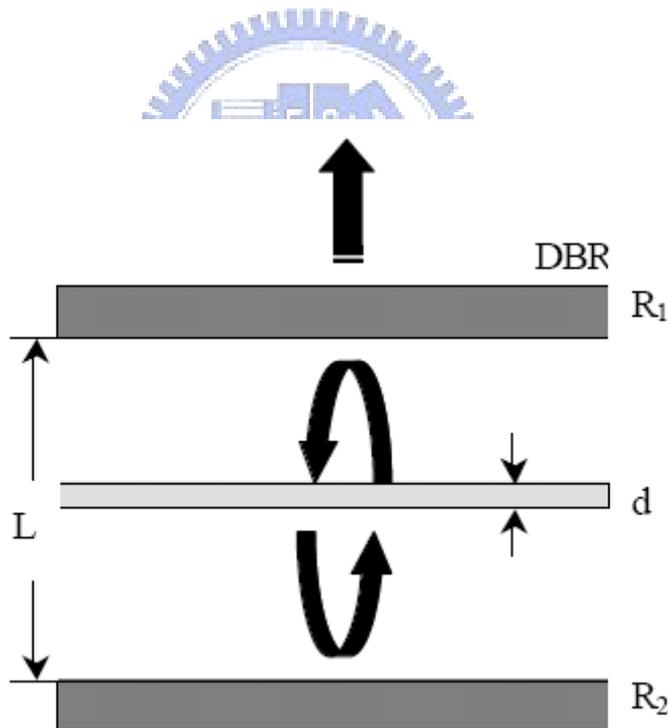


圖2-1 面射型雷射的結構

通常在一個Fabry-Perot 雷射，考慮在活化層中增益與損耗可得

$$R_1 R_2 \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (2nL) - j(\Phi_1 + \Phi_2) \right] \cdot \exp [2(\gamma - \alpha_i)L] = 1 \quad (2-1-1)$$

其中

R_1 和 R_2	兩個鏡子的反射率
γ	增益值(cm^{-1})
α_i	共振腔的全部損失
n	共振腔裡物質的折射率
L	有效共振腔長
Φ_1 、 Φ_2	鏡子的相位

在共振的情形下，也就是光在共振腔裡跑一圈回到原點的相位相同，在放大的共振腔中，共振的臨界點的條件為

$$R_1 R_2 \exp[2(\gamma_{th} - \alpha_i)L] = 1 \quad (2-1-2)$$

由2-1-2 式，臨界的增益係數可寫成

$$\gamma_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left\{ \frac{1}{R_1 R_2} \right\} \quad (2-1-3)$$

在面射型雷射的共振腔中，只有在活化層中有光放大的效應，故我們定義一個向量 Γ ，故2-2-3 可寫成下式

$$\Gamma \gamma_{th} = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left\{ \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right\} \quad (2-1-4)$$

Γ 是共振腔裡增益介質的場向量，且真正有效的增益區域並不包含全部的有效的共振腔長，真正有效的增益厚度為 d ，如圖2-2 所示。因此，臨界的條件需修改成下式

$$\Gamma \gamma_{th} d = \Gamma \pm \alpha_a d \pm \alpha_c (L-d) + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \quad (2-1-5)$$

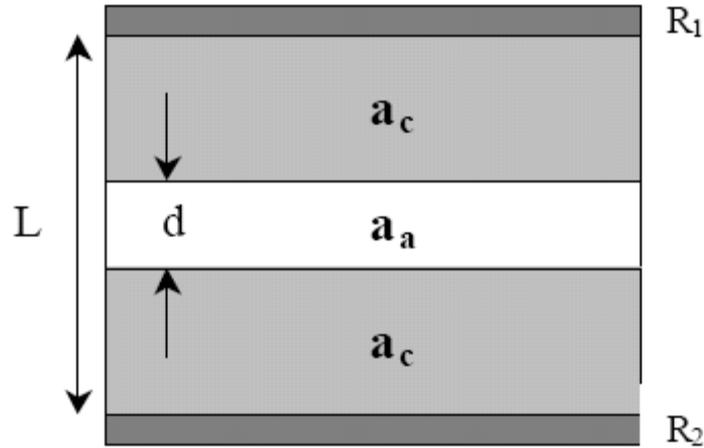


圖2-2 面射型雷射的概要圖

侷限係數為 $\Gamma = \Gamma_T + \Gamma_L$ ，其中 Γ_T 為縱軸方向的侷限分量，其值接近於1，而 Γ_L 是橫軸方向的侷限分量，其值為 $\Gamma_L = d/L$ 。

共振腔裡的全部損失可分為兩部分，一個在活化層， α_a ，另一個在共振腔裡除了活化層的區域， a_c ，(2-1-4)式經過以上的修正後，可寫成

$$\gamma_{th} = \alpha_a \frac{1}{\Gamma^2} \left[\alpha_c (1-\Gamma) + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right] \quad (2-1-6)$$

在GaAs-(Al,Ga)As 的物質中，若增益值跟注入的電子密度成正比，則

$$\gamma_p \sim A(N - N_{tr}) \quad (2-1-7)$$

其中 $A \sim 4 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 是GaAs-(Al,Ga)As 雷射的微分增益係數，且 $N_{tr} \sim 1.55 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 是增益與損失達到相同的電流密度，N是注

入的電流密度，振動的臨界電流密度可以寫成

$$J_{th} = \frac{qdN_{th}}{\tau_s} \quad (2-1-8)$$

其中 N_{th} : 臨界電流密度

q : 電子電量

τ_s : 電子的生命期

在這個例子中主要影響注入電流密度的是相對電子與電洞的結合，電子的生命期(lifetime)可寫成

$$\frac{1}{\tau_s} = BN_{th} \quad (2-1-9)$$

$B \sim 1.0 \times 10^{-10} \text{cm}^3 / \text{s}$ 為GaAs-(Al,Ga)As 的相對電子電洞結合係數

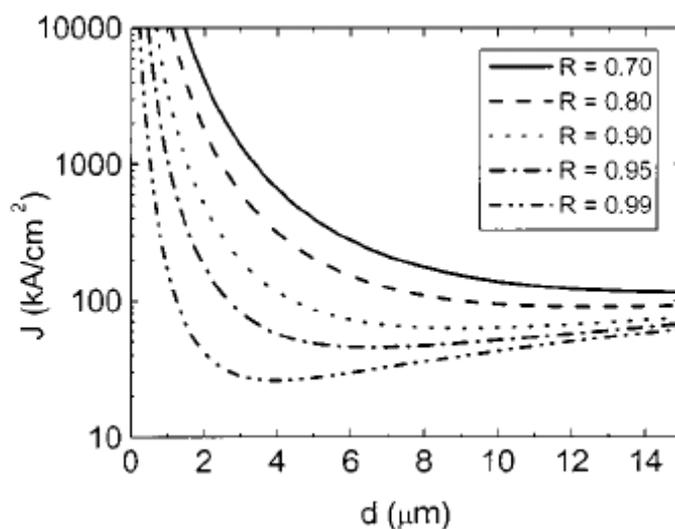


圖2-3 面射型雷射在不同反射率下之電流密度與增益厚度d之關係圖

結合(2-1-6) (2-1-7) (2-1-8) (2-1-9)式可得以下關係式

$$J_{th} = \frac{qdB}{A^2} \left[\alpha_a + AN + \frac{1}{\Gamma^2} \left\{ \alpha_c (1-\Gamma) + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) \right\} \right]^2$$

當有效共振腔長 $L=15\mu\text{m}$ ，在不同鏡面反射率之臨界電流密度與活化層厚度 d 的關係圖中清楚說明，如圖2-3 所示，若雷射元件要有低的臨界電流密度，需要有極短的共振腔以及薄的活化層，且鏡面反射率也要很高，最佳值為 $R = \sqrt{R_1 R_2} \geq 95\%$ ！

2-2 VCSEL選擇性水氧化理論

西元1990年，Dallesasse 等人發現AlAs 或AlGaAs 的自然氧化物是良好的絕緣體，而其氧化物 AlO_x 可由AlAs 或AlGaAs 至於高溫中通以水氣形成。而其他如AlGaInP、AlInAs、AlAsSb 等材料亦可以相同的水氧化方式得到高品質的氧化物。



氧化物的機制與氧化理論：

為了更詳細地描述氧化行為，便使用到Deal 和Grove 模型[10]

$$d_{ox}^2 + A d_{ox} = Bt \quad (2-2-1)$$

B 氧分子移動穿越氧化層的擴散常數

B/A 在被氧化介面上，材料的氧化速率常數；因氧化速率與水氣供給量有關，所以也包含水氣傳輸常數

◎於長時間的氧化實驗中，氧化深度與時間的關係為

$$d_{ox} = [Bt]^{1/2} \quad (2-2-2)$$

◎於短時間的氧化實驗，式(2-2)簡化為

$$d_{ox} = (B/A)t \quad (2-2-3)$$

所以由(2-2-2),(2-2-3)可得知：

若氧化率圖形與時間成拋物線分布，則氧化率受到氧化劑擴散行為所限制。

若是氧化率圖形與時間成直線分布，則氧化機制遵守(2-2-3)所描述，也可知氧化率受到反應速率所限制。

由許多的研究報告顯示[11]，VCSEL 內的AlAs 或高含Al 量的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 層氧化結果為：氧化率與時間成直線分布，且有孔隙的存在，也暗示著橫向氧化速率是為反應速率所主導，故線性分布的氧化現象可說是相依於反應速率。

選擇性水氧化型VCSEL 一般所採用的氧化層有兩個形式，一為100%的AlAs 氧化層材料，另一為摻入少量的Ga 原子之 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化層材料。其中AlAs 在空氣中氧化極為快速，所產生的氧化物成粉末狀，不穩定且特性差，但若在高溫的水氣中氧化則可以得到良好的氧化物 AlO_x 。

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的氧化速率與Al 的含量關係很大，稍微改變就可能產生很大的差異。因AlAs 難以控制，且製作出來的元件其生命期只有幾分鐘的操作時間，本實驗欲氧化層材料為 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ ，在AlAs 中摻入微量的Ga 使得製作出的元件可得到較長的操作時間，且氧化層和磊晶層之間的應變(strain)與缺陷(defect)可大幅地降低。[12]將 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 層暴露在 $350^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$ 中通以水蒸氣的環境中進行溼氧化製程，可以得到有好的機械強度、化學抗

性、絕緣性且低折射率的氧化層[13]。又因為製作VCSEL 需要多道的製程工作，亦需要使用到較高溫的沉積或蒸鍍，AlAs 氧化層超過100°C便會有再氧化的情況發生，而經過一些實驗報告指出： $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 材料便可避免掉此種情況，隨之而來的優點是可以做較高溫的快速退火。[14]

同一個元件上有著被氧化部分與未氧化部份，所以會有開口(Aperture)的出現，氧化侷限層的折射率約為1.6，而DBR 部分的折射率卻高達3.0 以上，所以會出現強烈的折射率差於共振腔與其鄰近區域間[15][16]，這也是氧化侷限型VCSEL 的另一項過人的優點，但是也因此如圖2-4 產生了共振腔模與氧化模同時出現[17]，也可能會互相耦合相互作用。故為了避面此一現象發生，通常氧化層成長在位於主動層上方 $\lambda/4$ 處，此處也是光模分布圖的節點位置，便可將氧化模的影響程度降至最低。

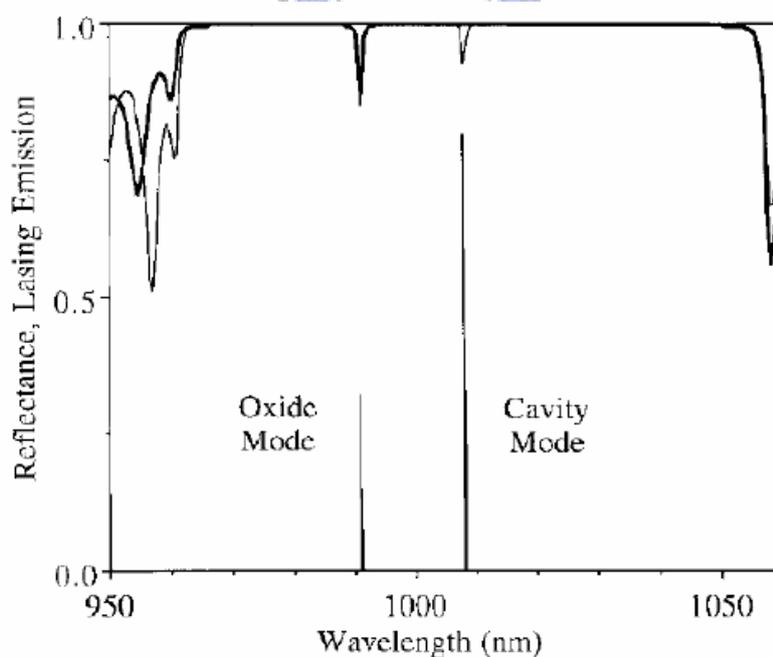


圖2-4. 氧化模與共振腔模同時出現互相影響

2-3 VCSE鋅擴散於DBR理論

鋅擴散於III-V 族而言是為p 型的擴散摻雜，在往年的研究報告中，使用p摻雜的目的是高濃度的p 摻雜可使得p-type DBR串聯電阻有效地降低，提高電洞濃度以增加電子電洞復合程度，因此可改良元件的特性。而由於近幾年磊晶技術成長快速，在磊晶時以漸變磊晶的技術，讓能帶圖不那麼尖銳，使得用p摻雜製程並不是那麼需要。而鋅擴散的另一個效果在VCSEL製程應用方面發現可以降低DBR的反射率，VCSEL中DBR的基本結構是成長明顯折射率差異的磊晶層，由於光由高折射率區域入射到低折射率區域會產生較多的反射，而重複的堆疊 $\lambda/4$ 厚度的磊晶層對，產生週期性的折射率變化，便可以達到接近100%的反射率。本實驗是用鋅擴散使得p-type DBR 內Al 原子與Ga 原子排列產生失序(Disorder)的現象，而此現象主要是因為摻雜引發失序(IID Impurity Induced Disorder) [18]，誘使得DBR 結構中的週期性產生混亂，如圖2-5所示，讓原本尖銳的反射率分布變得比較平滑，致使被鋅擴散p-type DBR 區域的反射率降低[19] [20] [21]，產生光的吸收層，經過鋅擴散部分便無法發出雷射，依此概念選擇性地對特定區域做鋅擴散便可以達到控制模態的效果。

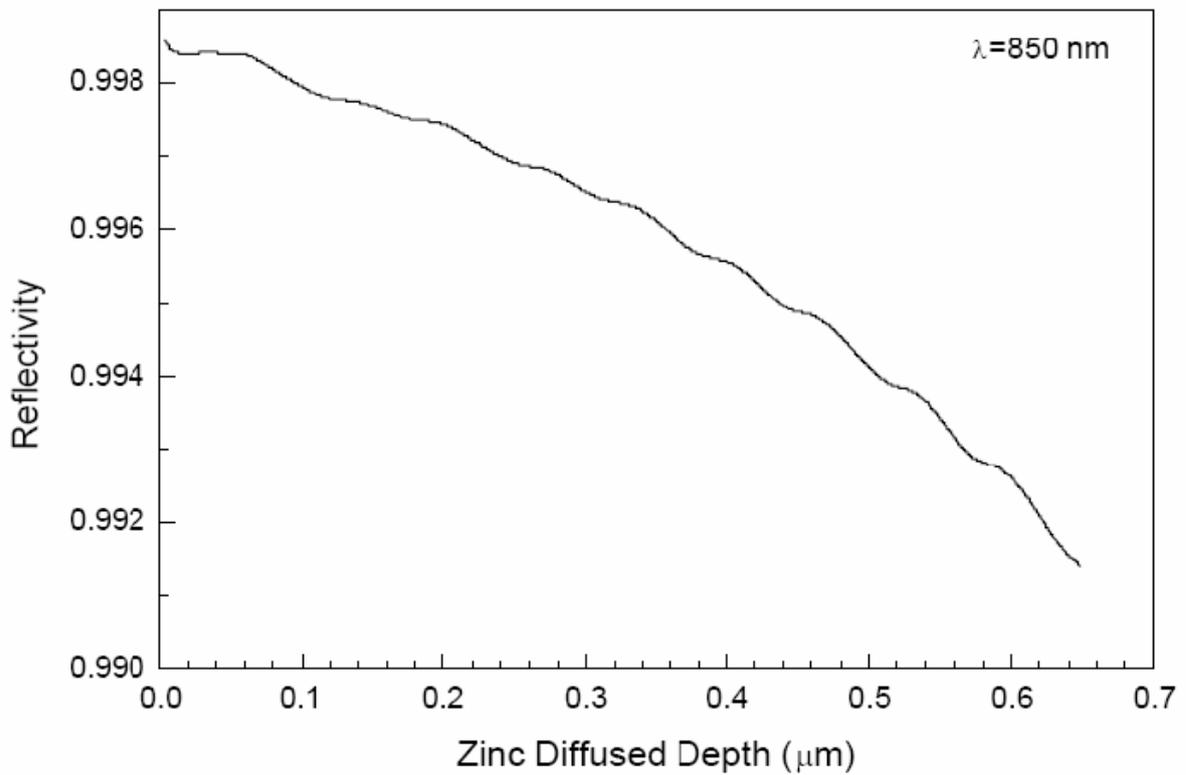


圖2-5 經過鋅擴散後的DBR 反射率與鋅擴散深度關係

而IID 也使得自由載子的吸收係數增加，讓光損耗更多，使得增益降低。我們便是以此概念，來讓VCSEL 主動層內產生的多模經過鋅擴散區域，如圖2-6所示一部分被吸收，一部分放射，藉以產生單一模態的雷射。

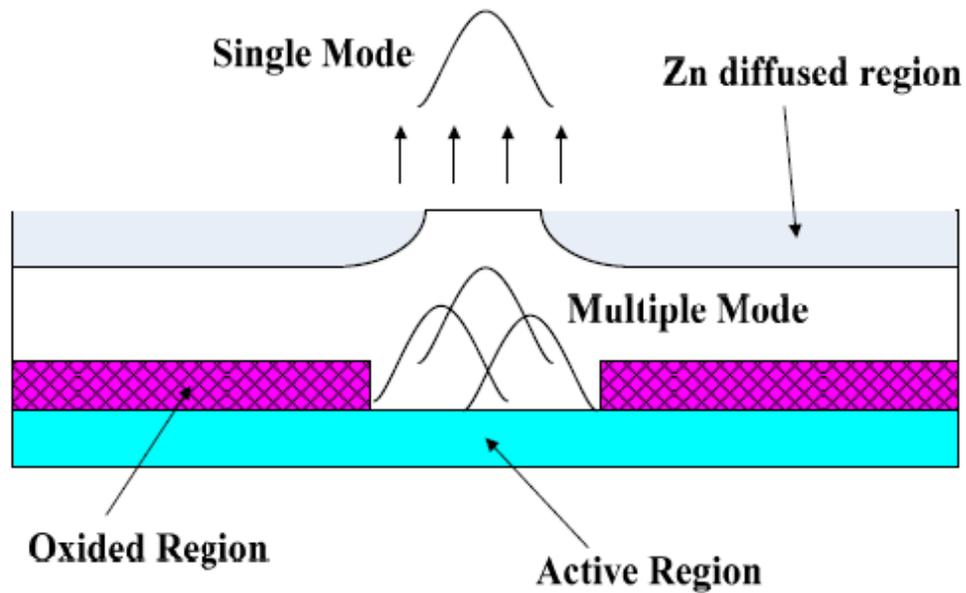


圖2-6 於共振腔結構中產生的多模與放射單模雷射光束示意圖

為了討論臨界增益對鋅擴散深度的關係，我們先以鋅擴散製程對自由載子吸收率的影響來做了解

自由載子吸收率公式：[22]

$$\alpha_{fc} = (\lambda_0^2 e^3 N_a) / [4 \pi^2 c^3 n \epsilon_0 (m h^*)^2 \mu h] \quad (2-3-1) \quad [23]$$

其中

α_{fc} : 被鋅擴散區域內的自由載子吸收係數

λ_0 : 為自由空間中的光波長

e : 一個電子電荷

N_a : 受體(accepter)的濃度，假設約為 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ [24]

c : 光速

n : 在半導體中的折射率

ϵ_0 : 自由空間中的介電常數

m_h^* : 電洞的有效質量

μ_h : 電洞的移動率

基於此式，可知自由載子吸收係數主要是由電洞的移動率 μ_h 所決定。所以，由圖2-7 由於P摻雜的效果與自由載子吸收的效應，兩個影響結合起來，可得臨界增益與鋅擴散深度的關係。

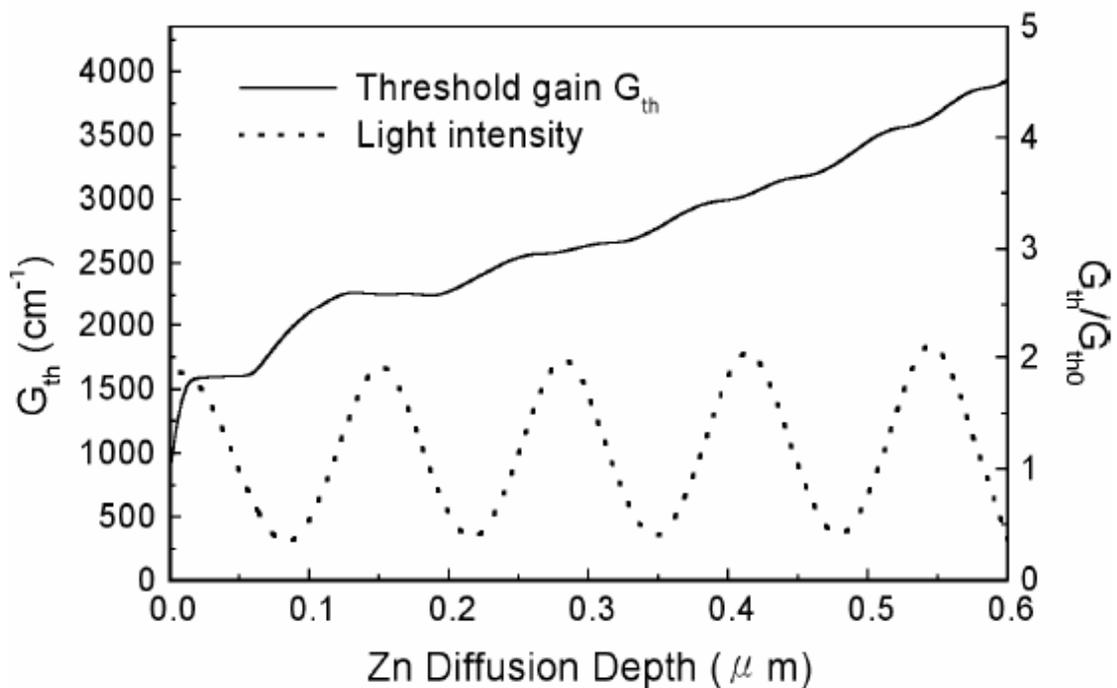


圖2-7 經過計算的臨界增益 G_{th} (實線)，是VCSEL 中擴散深度的函數。 G_{th}/G_0 為有鋅擴散部分之臨界增益與無鋅擴散部分臨界增益的比。光強度(虛線) 為駐波的形式。

可以觀察到在較接近表面的區域其臨界增益變化量非常急劇，但因為牽涉到要做到良好的吸收程度，多模的臨界增益至少要比單模的臨界增益

大兩倍以上，所以我們擴散深度延伸到超過 $1\ \mu\text{m}$ ，而因為單一基模幾乎都與 $5\times 5\ \mu\text{m}^2$ 的孔徑互相耦合，所以我們鋅擴散的發光孔徑也控制在 $5\ \mu\text{m}$ 直徑的圓形圖形[25]，以達到穩態的單模操作。本實驗以 Zn_3As_2 為擴散源，擴散溫度為 600°C ，在 10^{-6}Torr 真空度之下，蒸氣壓已達飽和，也因此可以抑制GaAs晶片中，As的揮發，防止於晶片中產生缺陷。

2-4 典型面射型雷射之介紹

要使得可以正常動作的基本條件就是要達到特定的電流侷限和侷限光，增加電流密度，以下是對於最典型的面射型雷射架構做介紹，包含以氧化方式及離子佈值製程來製作電流侷限區域。

2-4-1 氧化物侷限之面射型雷射

圖2-8 (a)為氧化型的面射型雷射的主要結構，而氧化型的面射型雷射主要結構是磊晶時在主動區鄰近的區域成長一層高Al成分之AlAs或 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ ，在蝕刻凸台之後將晶片放置於 $350^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$ 環境下，通入水氣，而得到一層氧化物，作為光以及電的侷限層[26]，而由於氧化物(Al-oxide)的低折射率[27]使的元件操作時會有折射率波導的現象產生，此現象使光侷限程度更好[26] [28]。

由晶片結構可以知道，氧化層位於主動區約 $0.15\ \mu\text{m}$ 上方，距離甚短，故更可以達到非常好的電流侷限程度，但因氧化製程必須蝕刻凸台結構，將AlAs或 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 層暴露出來以用來做橫向選擇性氧化，故電極接觸

程度較離子佈植方式來得低，所以散熱機制相對的較差，使得元件較離子佈植型VCSEL 更易發熱，也因此可靠度較低[29]。

水氧化製程產生氧化孔徑的影響有Al 含量的多少，或是製程當中時間、爐管溫度、爐管寬度、水氣溫度、氮氣帶水氣的流速等等因素。使得製程條件控制不易。

2-4-2 氧化物及鋅擴散侷限之面射型雷射

氧化物及鋅擴散侷限之面射型雷射是以鋅擴散讓DBR週期性產生混亂，致使被鋅擴散p-type DBR 區域的反射率降低，產生光的吸收層，經過鋅擴散部分便無法發出雷射，依此概念選擇性地對特定區域做鋅擴散活性層，然後再以水氧化製程作為電流的侷限層，如圖2-8 (b)所示。其優點是使串聯電阻降低並改善氧化面射型雷射聚熱的缺點

2-4-3 離子佈植方式之面射型雷射

在VCSEL 平面結構中要做到電流侷限的方法之一為使用離子佈植方式，使用離子佈植穿過上層DBR可使雷射共振腔周圍產生不導電的區域，而未佈植的地方為導電區，可讓注入電流達到更高的電流密度。

圖2-8 (c)是典型以離子佈植方式所製作而成的VCSEL 元件，通常所使用的離子有氫離子(H⁺)[30]，氧離子(O⁺)，矽離子(Si⁺)，氮離子(N⁺)等，將這些離子加速打入特定的區域，使得離子佈植所在的區域成為高電阻或近似為絕緣體，所以當給予電流時，電流將不流經過離子所佈植的區

域。

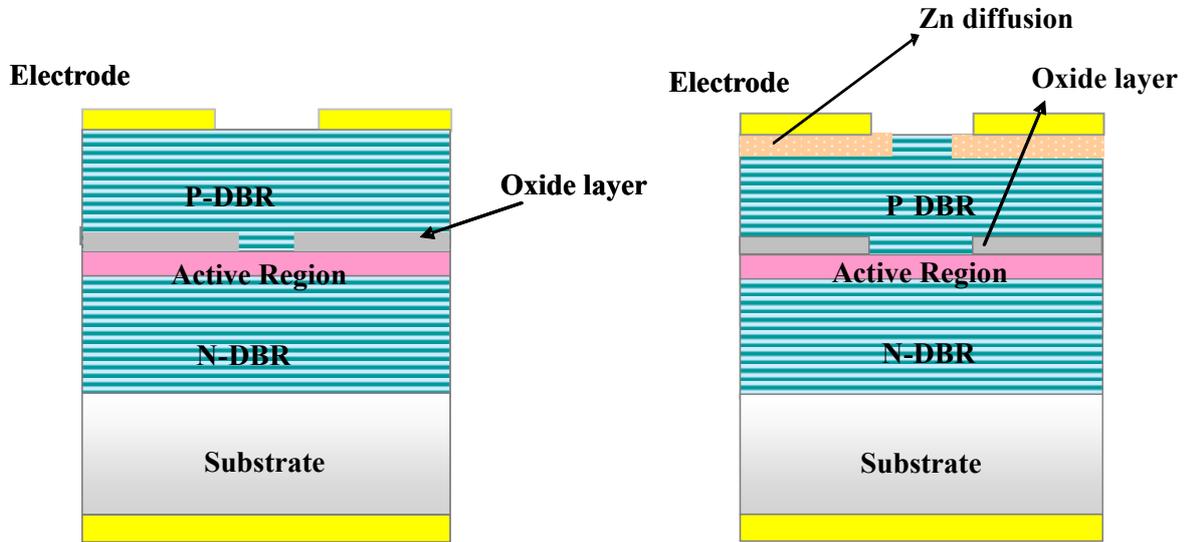
離子佈植方式VCSEL 主要為增益型波導結構(gain-guided) [31]，只能以電流侷限來產生雷射操作，通常為了避免因離子佈植製程於主動區產生損傷，所以離子佈植深度約為在主動區上面 $\sim 0.5 \mu\text{m}$ 處，也因此離子佈植區域與主動區有段距離，使得會有漏電流的產生。離子佈植可以直接穿透晶片表面到達所預定的位置，不必蝕刻凸台結構，故可以為完整的平面結構，與電極接觸面積較大，可以降低接觸電阻，使得散熱較好，且離子佈植製程之VCSEL 的優點是製程容易，條件易於控制，且再現性與可靠度高，由於沒有光侷限效果，故典型的離子佈植VCSEL其最大缺點便是光侷限太差。

2-4-4 蝕刻空氣台柱結構

蝕刻空氣台柱結構是最早使用的方法[32]，這種結構是用乾性蝕刻法製成，可以做成很小的直徑，如2-8 (d)像高台之形狀。蝕刻深度到活化層上方停止，這樣可使得電子與電洞在侷限的範圍裡面結合，而發出雷射光，這種結構只能侷限電流在縱向的流動，而不能侷限電流在橫向的流動，所以電流會往橫向擴散，但這種結構有很強的光導引作用，由於半導體與空氣有很大的反射率(index)差。

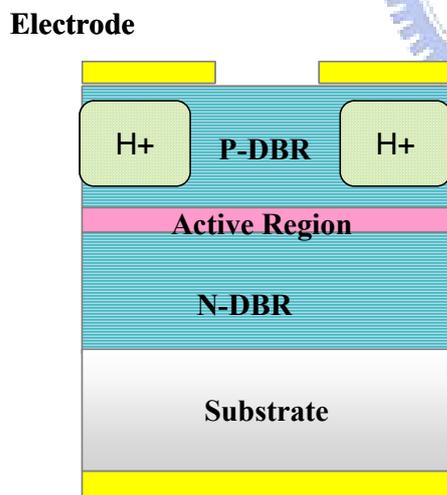
其反射率的差，就像光纖侷限光是相同的原理，中間的物質反射率較外環物質的反射率大，故光可以在中間的介質中，用全反射的方

式傳播，雖然這是最簡單製成的結構。然而由於小的面積和蝕刻造成的
不完美側面結構，導致光的繞射與散射嚴重，易造成大量的光子損失

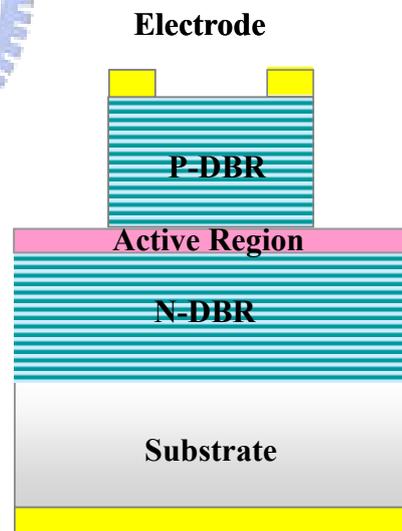


(a) Selective oxidation type

(b) Zn diffusion - oxidation



(c) roton - implant type



(d) Air - post type

圖 2-8 典型面射型雷射 (a) Selective oxidation (b) Zn diffusion - oxidation (c)

roton - implant (d) Air - post type

第三章 半導體製程及特性量測

本實驗藉由鋅擴散和水氧化技術，嘗試以不同的發光幾何孔徑，來達成高功率和單一空間模態的操作特性，在實驗上，主要設計並製作了兩種幾何圖形作為發光孔徑，分別是三圓形發光孔徑和花瓣狀的發光孔徑。從量測得到的特性上，三圓形的元件可達到6.1mW 的高功率。而花瓣狀的環型發光孔徑，也具有8.6mW 的高功率。這也證明了這種幾何圖形的發光孔徑，搭配上鋅擴散和水氧化技術，具有相當優異的特性。

3.1 VCSEL 磊晶結構

本實驗所採用的晶片是由歐洲IQE公司以金屬有機化學氣相沉積 (MOCVD)方式所成長的VCSEL 結構，Layer1 是GaAs 基板，Layer2~5 是N-type DBR;成長34對 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ ，Layer6~9 是共振腔的一部份，Layer10~12 是無摻雜的量子井結構，Layer13~16 是共振腔的一部份包含氧化層結構，Layer17~22 是P-type DBR; 成長22對 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ ，Layer23是歐姆接觸(Ohmic contact)層。

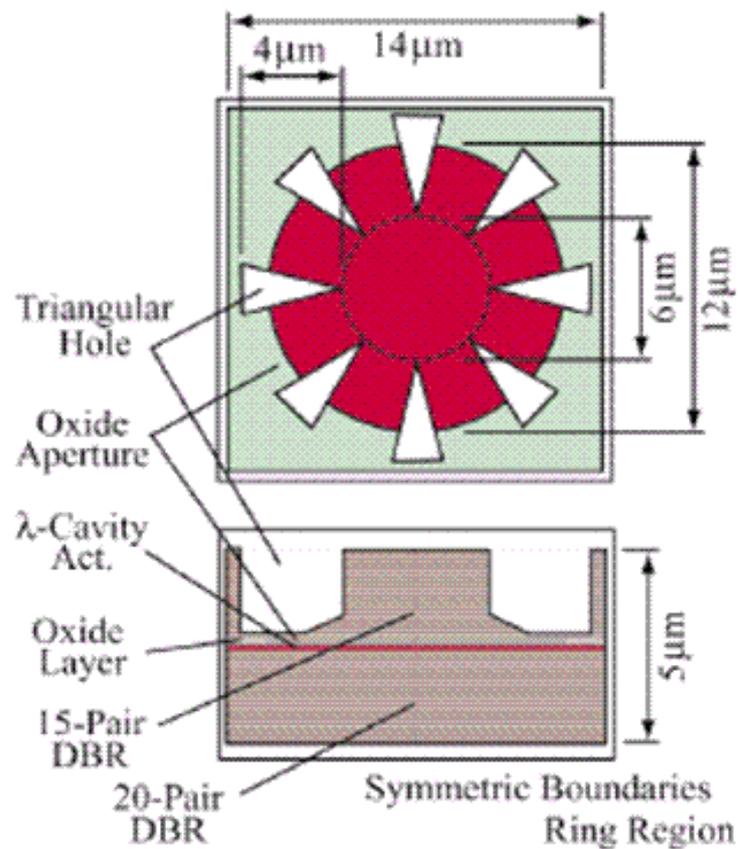
表三 IQE IEGENS-7-20 晶片之詳細資料

Materials Specifications for AlGaAs/GaAs VCSEL- 3" 2600

Layer	Material	Group	Repeat	Mole Fraction (x)		Mole Fraction (y)	Strain (%)	PL (nm)	Thickness (μm)	CV Level (cm-3)		Type	Dopant
				Start	Finish					Start	Finish		
27	GaAs								0.005	>1E19		P	Carbon
28	Al(x)GaAs			0.12					0.044	>1E19		P	Carbon
25	Al(x)GaAs			0.9	0.12				0.02	=6E18		P	Carbon
24	Al(x)GaAs	4	20	0.9					0.05	=3E18		P	Carbon
23	Al(x)GaAs	4	20	0.12	0.9				0.02	=4E18		P	Carbon
22	Al(x)GaAs	4	20	0.12					0.039	=3E18		P	Carbon
21	Al(x)GaAs	4	20	0.9	0.12				0.02	=6E18		P	Carbon
20	Al(x)GaAs	3	2	0.9					0.05	=2E18		P	Carbon
19	Al(x)GaAs	3	2	0.12	0.9				0.02	=2E18		P	Carbon
18	Al(x)GaAs	3	2	0.12					0.039	=2E18		P	Carbon
17	Al(x)GaAs	3	2	0.9	0.12				0.02	=2E18		P	Carbon
16	Al(x)GaAs			0.98					0.03	=2E18		P	Carbon
15	Al(x)GaAs			0.9					0.0305	=2E18		P	Carbon
14	Al(x)GaAs			0.3	0.6				0.067			U/D	None
13	Al(x)GaAs			0.3					0.02			U/D	None
12	GaAs						835		0.006			U/D	None
11	Al(x)GaAs	2	2	0.3					0.008			U/D	None
10	GaAs	2	2				835		0.006			U/D	None
9	Al(x)GaAs			0.3					0.02			U/D	None
8	Al(x)GaAs			0.6	0.3				0.067			U/D	None
7	Al(x)GaAs			0.9					0.06	=2E18		N	Silicon
6	Al(x)GaAs			0.12	0.9				0.02	=2E18		N	Silicon
5	Al(x)GaAs	1	34	0.12					0.039	=2E18		N	Silicon
4	Al(x)GaAs	1	34	0.9	0.12				0.02	=2E18		N	Silicon
3	Al(x)GaAs	1	34	0.9					0.05	=2E18		N	Silicon
2	Al(x)GaAs	1	34	0.12	0.9				0.02	=2E18		N	Silicon
1	GaAs								0.5	=3E18		N	Silicon
0	GaAs Silicon 3" 625um								See Substrate Specifications Table				

3.2 發光孔徑設計

日本 Furukawa 等人[33]於 2004 年發表了以三角形為基礎結構的高功率單模態 VCSEL。其結果顯示花型單模態是由同相位的多模態所構成，並且在遠場成一個高斯分佈，圖 3-1 顯示此元件遠場模態分布及測量結果顯示同相的花型多模態有高電流密度。其花型即類似此論文中所設計的花瓣發光孔徑陣列的概念，如圖 3-2。



(a)

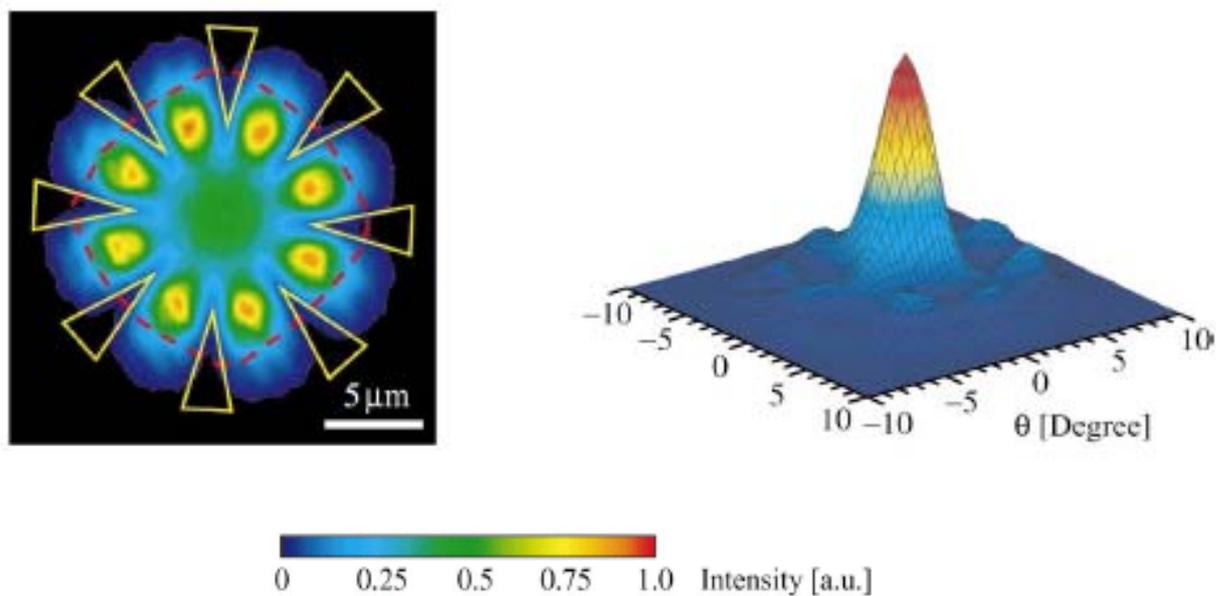


圖 3-1 Furukawa 所設計高功率單模態 VCSEL(a)元件尺寸及結構圖(b)近場

圖(c)遠場圖(黃色及紅色區塊分別為三角形及氧化區域的光強度)

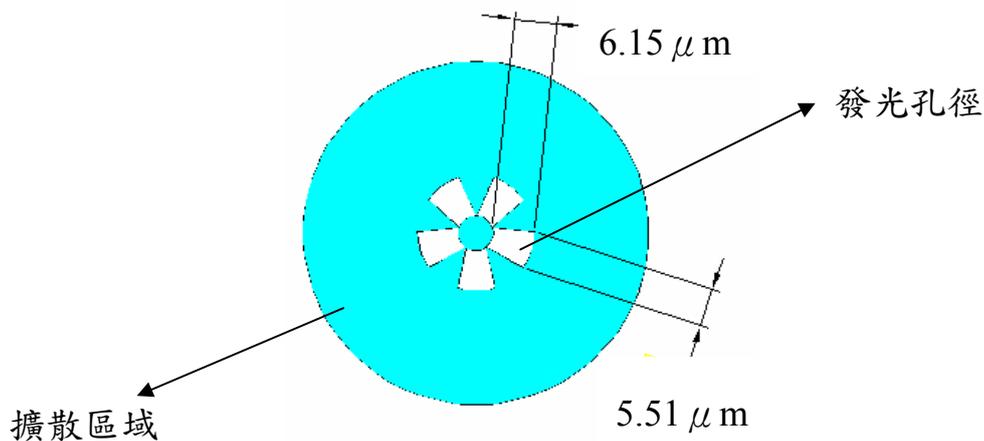


圖3-2 擴散元件之花瓣狀發光孔徑圖形

2001年由中央大學研究發現發光孔徑為 $5\mu\text{m}$ 時，其結果顯示 threshold 為 0.8mA ，模態抑制比例可達 40dB ，圖 3-3[34] [35] [36]，因而在此論文中以此孔徑尺寸設計了如圖 3-4 之三圓形的矩陣幾何圖形，來增加光取出效率並且和花瓣型出光結果作對照。

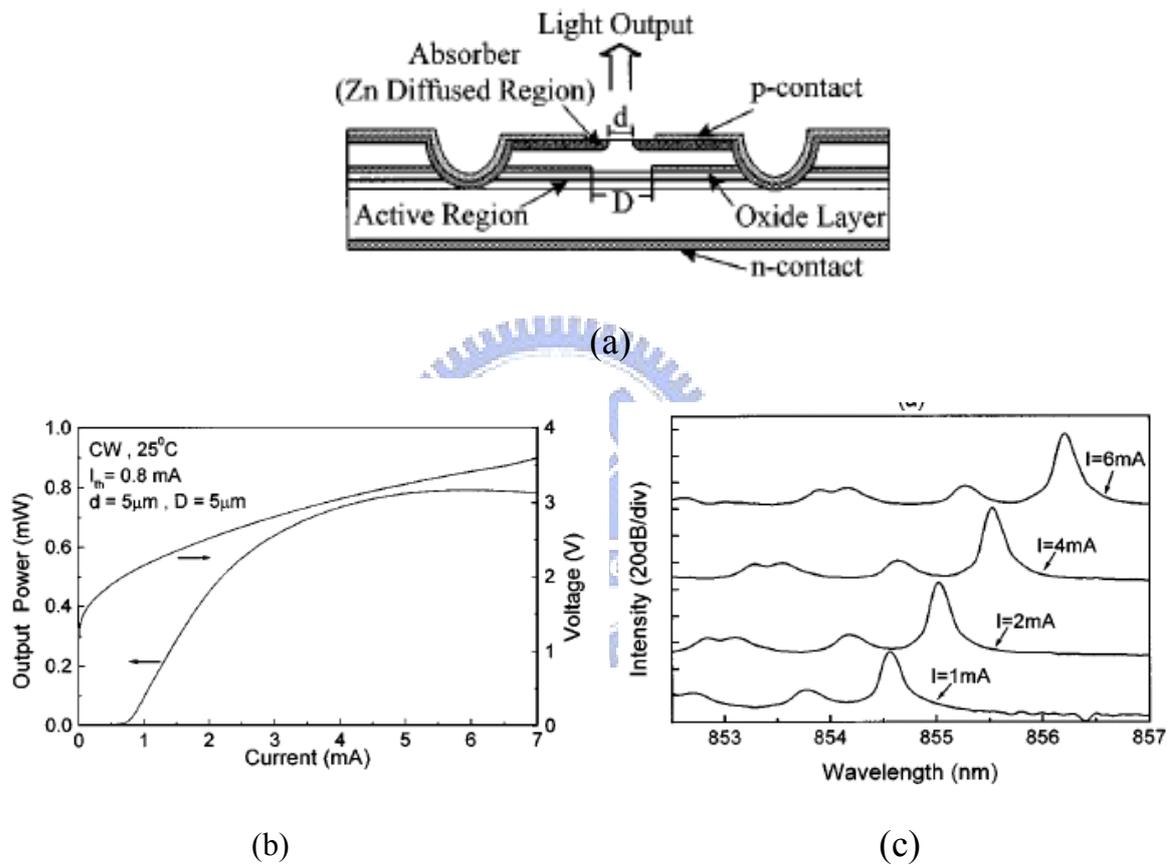


圖3-3 National Taiwan University所設計單模態VCSEL(a)元件結構圖(b)出光孔徑 $5\mu\text{m}$ 之L-I curve(c) 出光孔徑 $5\mu\text{m}$ 之頻譜圖

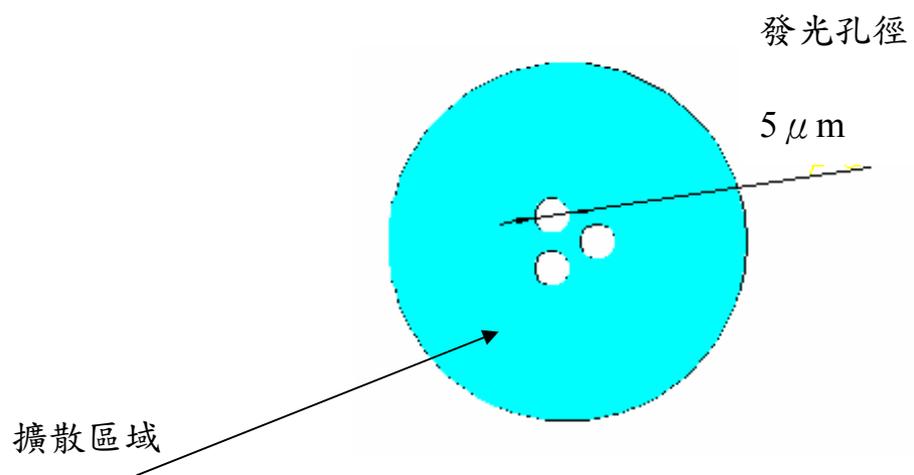
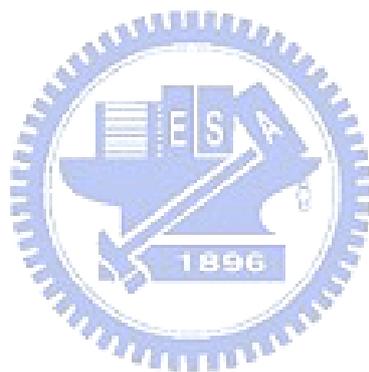


圖3-4 擴散元件之三圓形發光孔徑圖形



3.3 製程

3.3.1 VCSEL結構試片準備

1. 將 VCSEL 磊晶片置入 ACE 溶液中 5 分鐘。
2. 然後將 VCSEL 磊晶片置入 D.I water 溶液中 5 分鐘。
3. 自 D.I water 中將 VCSEL 磊晶片取出，以氮氣吹乾。

3.3.2 鋅擴散製程

1. PECVD成長 Si_3N_4 :

以化學氣相沉積法(CVD)在 300°C 於GaAs 晶片上如圖3-5成長一層

2000Å 的 SiO_2 。

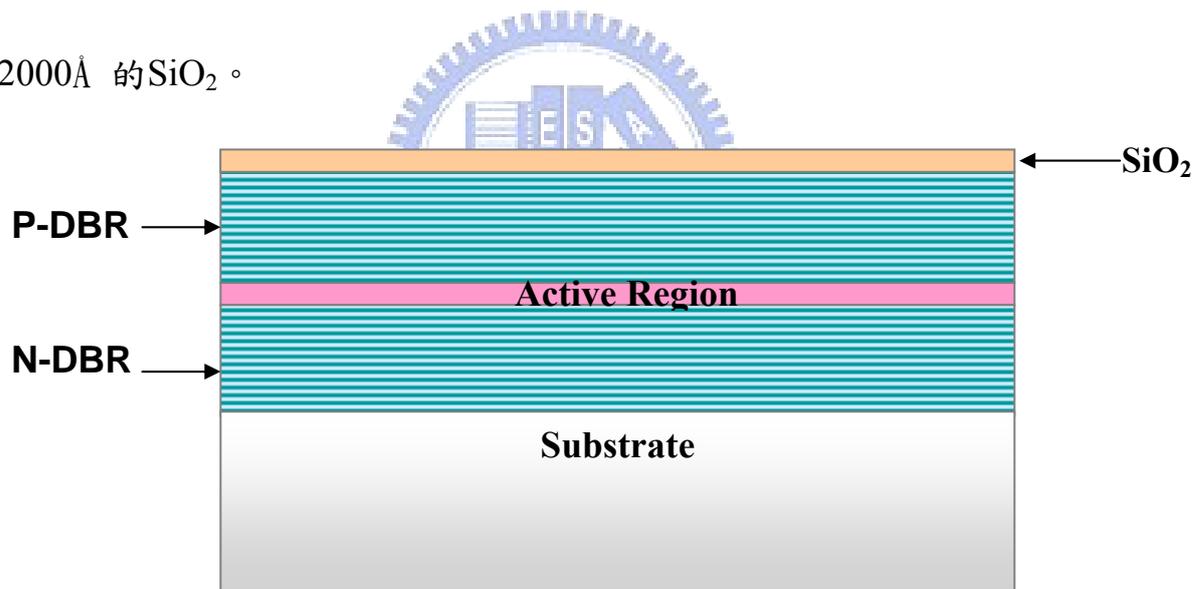


圖3-5 沉積一層2000Å 的 SiO_2 示意圖

2. 曝光顯影製程以形成鋅擴散的圖形：
 - a. VCSEL 磊晶片 spin (被覆) HMDS(hexamethyldisilazane，六甲基乙矽鉸) 3500 rpm，20秒，以增強光阻對 SiO_2 的黏著力
 - b. 旋塗AZ5214E正光阻4000 rpm，20 秒， 120°C 軟拷1分20 秒以去除光

阻水分，之後利用曝光機Qutel-7000機台對準後曝光 98 mW/cm^2 ，曝光完以AZ-300顯影液顯影約55秒。圖3-6為示意圖。

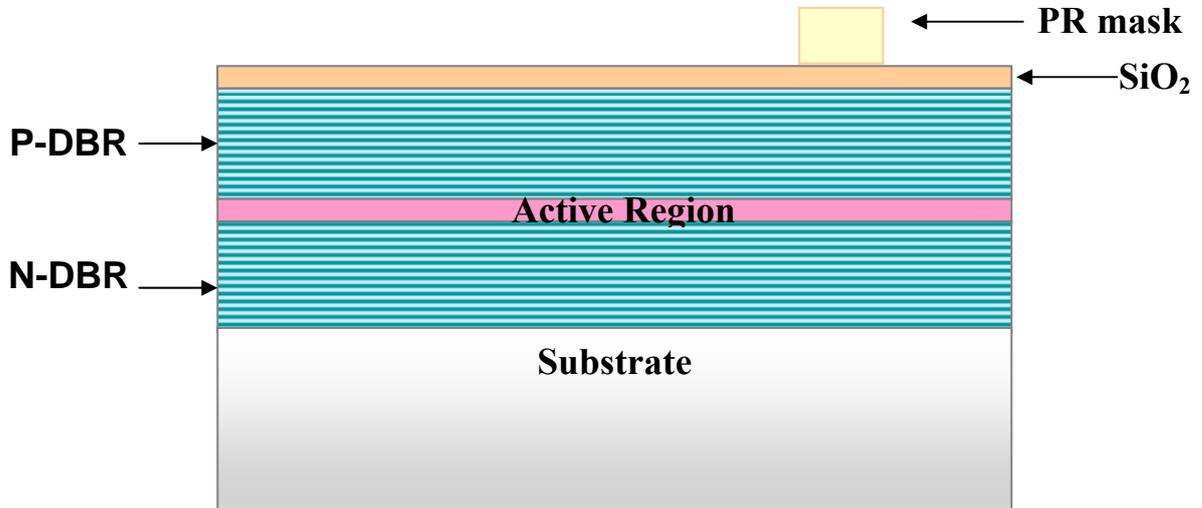


圖3-6 旋塗光阻定義出擴散區域示意圖

3. 蝕刻SiO₂

利用反應性離子蝕刻系統(Reactive Ion Etch, RIE)，去除定義之外的區域，如圖3-7 所示乾蝕刻暴露出來的SiO₂完的圖形。

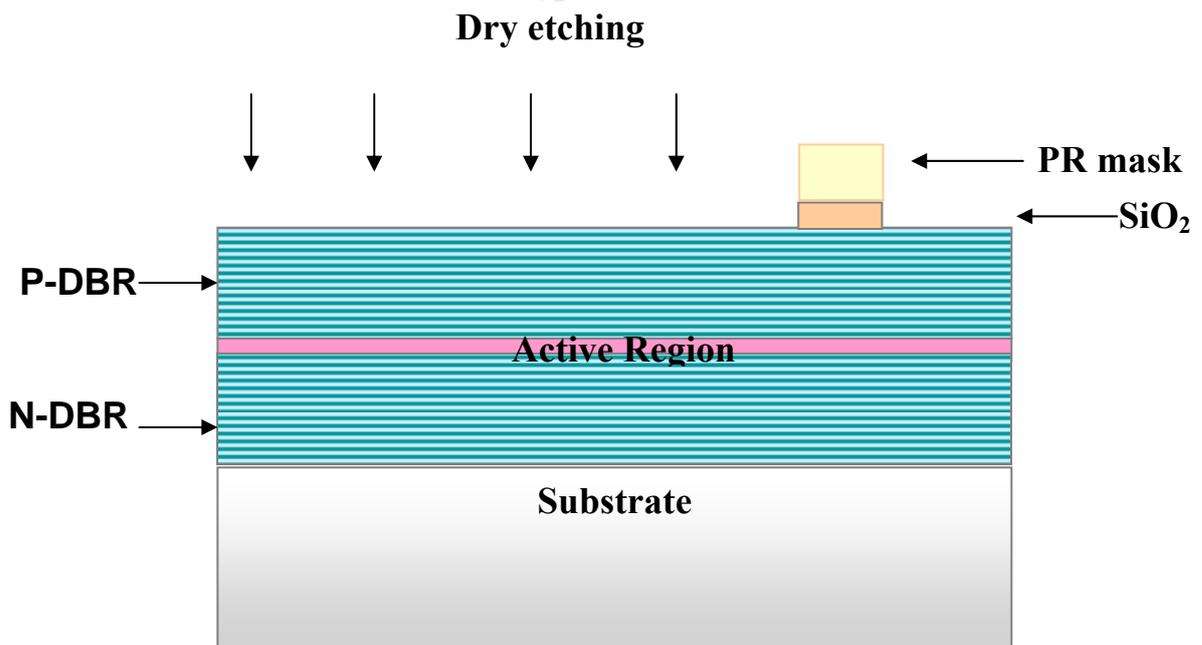


圖3-7 乾蝕刻完之圖形示意圖

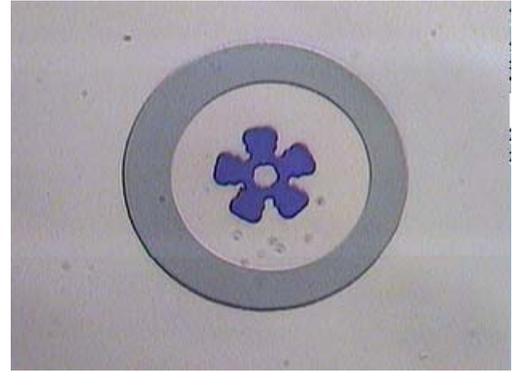
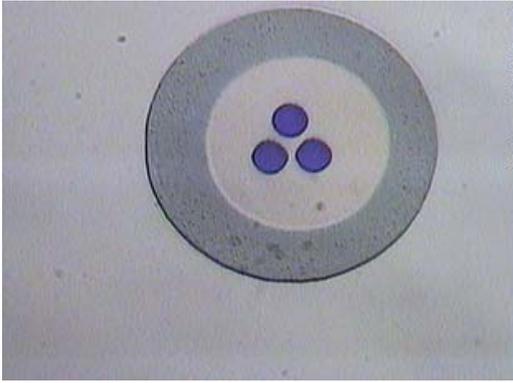


圖3-8 RIE蝕刻SiO₂完的實際圖形

4. 以丙酮去除晶片上的光阻

5. 封管製程

a. 將晶片與Zn₃As₂ 擴散源一併置入石英管中。

b. 以機械幫浦將石英管粗抽至 10^{-3} Torr 後，之後再同時由擴散幫浦 (Diffusion Pump) 細抽至 10^{-6} Torr 等級。

c. 以氫氧焰如圖3-9 將石英管封閉並旋斷以維持真空度。

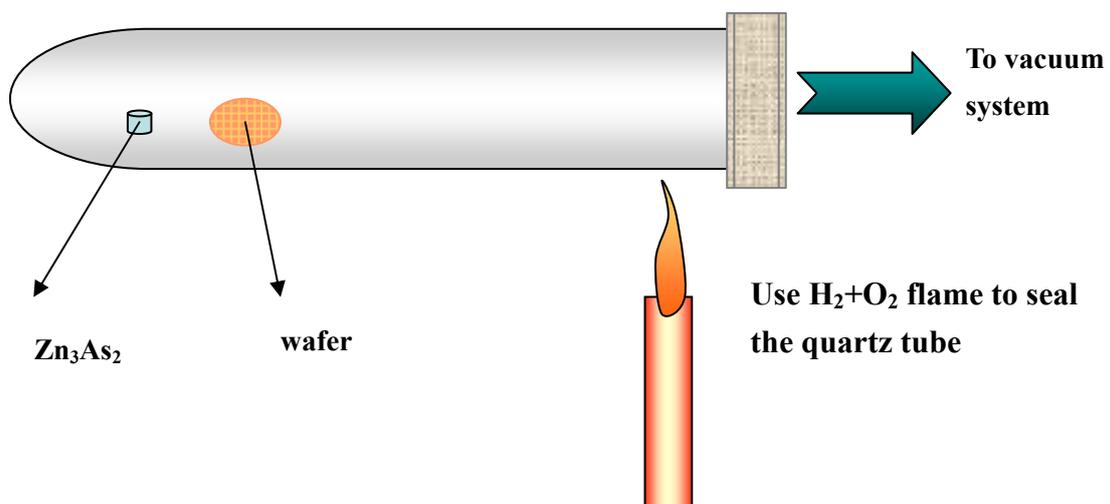


圖3-9 以氫氧焰封管示意

6. 擴散製程

將密封好之石英管放入高溫爐中推至爐心於 600°C 下擴散10及15分鐘，圖3-10為其示意圖。ECV分析結果如圖3-11、3-12 各約 $1\mu\text{m}$ 、 $1.4\mu\text{m}$ 的擴散深度。

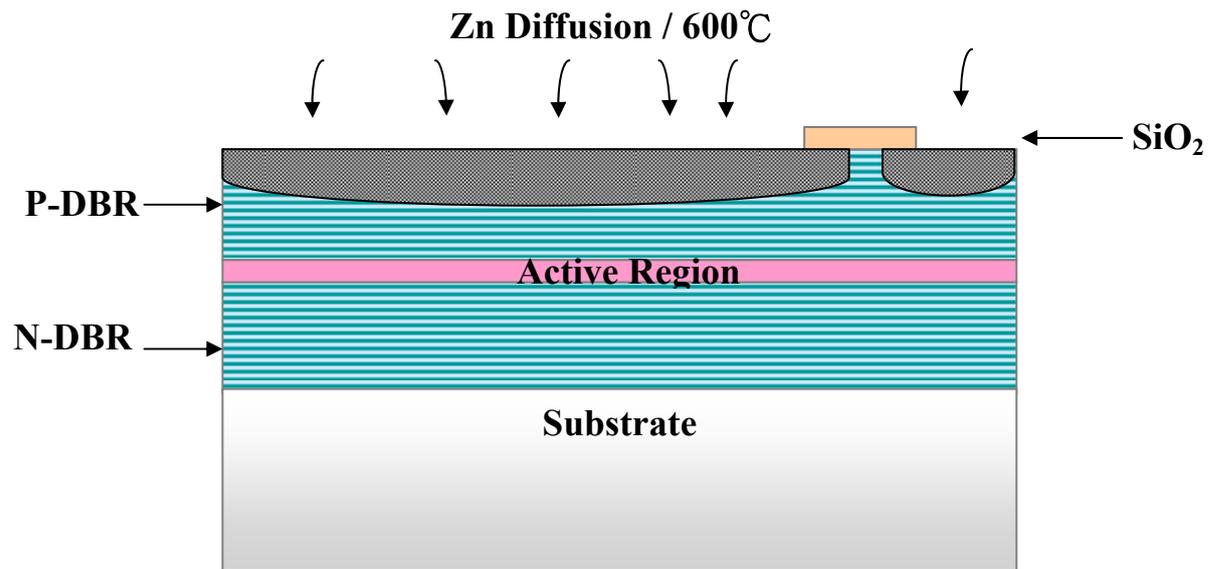


圖3-10 鋅擴散之示意圖

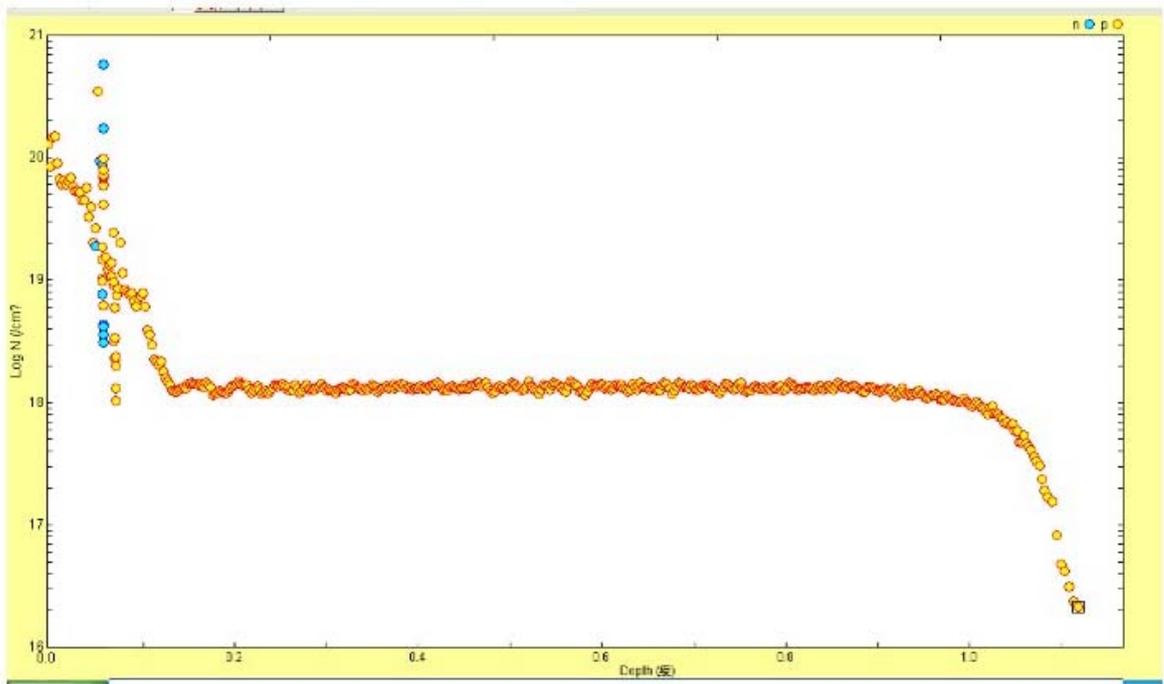


圖3-11 ECV所量測鋅擴散10分鐘之深度

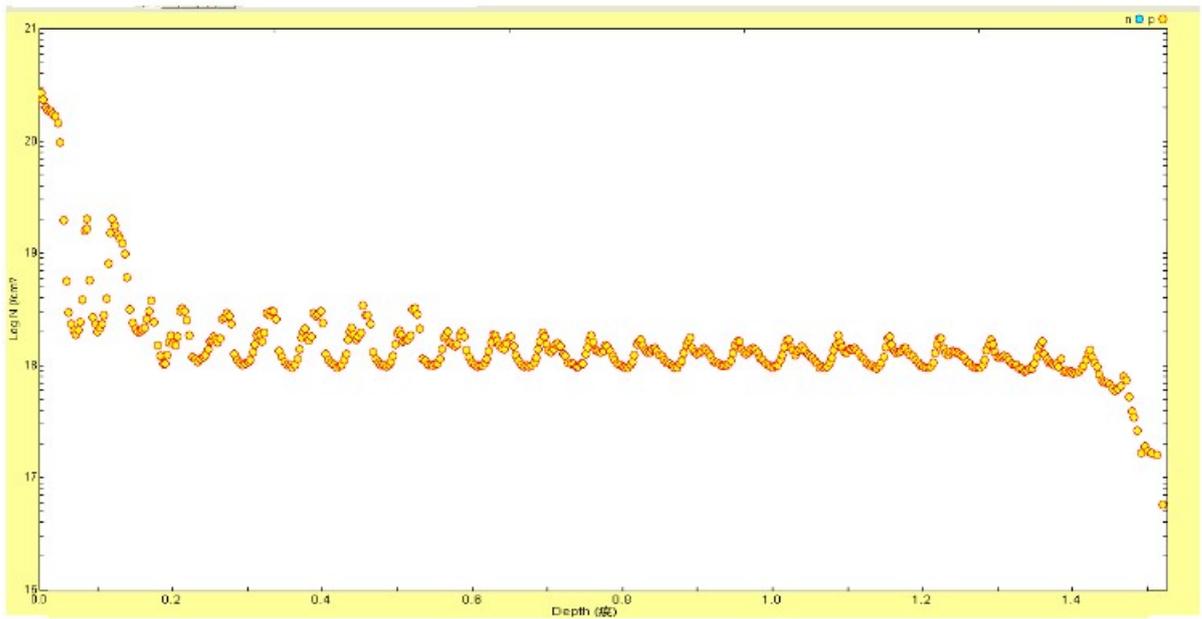


圖3-12 ECV所量測鋅擴散15分鐘之深度

7. 破真空與清洗

擴散完畢，將含有晶片與 Zn_3As_2 的石英管自高溫爐中取出，以D.I water cooling石英管冷卻致室溫後，以尖嘴鉗小心的將石英管夾破，取出晶片以丙酮、去離子水清洗。

3.3.3 濕氧化製程

1. 使用電漿輔助化學氣相沉積系統(Plasma enhanced chemical vapor

deposition, PECVD)沉積一層 2000\AA 的 Si_3N_4 ，示意圖如圖3-13 所示。

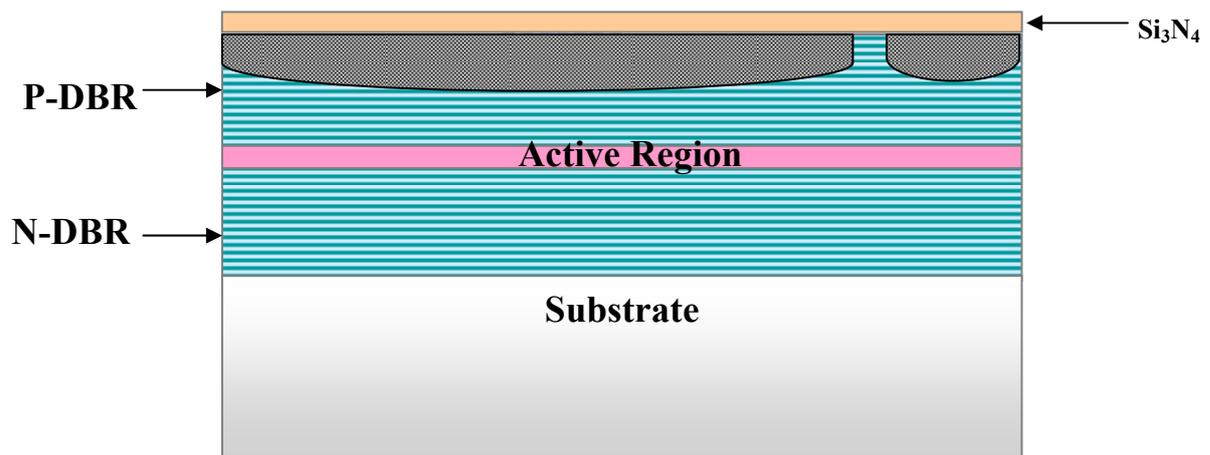


圖3-13 成長 Si_3N_4 介電層示意圖

2. 曝光顯影製程製作出水氧化所需之遮罩

- 將磊晶片 spin (被覆) AZ5214E 正光阻，經1分20秒軟烤去除光阻水份，以 Qutel-7000 曝光機曝光 98 mW/cm^2 ，使用 AZ-300 顯影液顯影 55 秒。
- 在顯微鏡下檢視磊晶片上之光阻是否顯影完全，若未顯影完全，則再置入 AZ-300 顯影液顯影 5 至 15 秒，然後置入 DI water 清洗，再以

氮氣吹乾。

c. 重覆步驟b步驟直至顯影完全。

3. 蝕刻 Si_3N_4

將 VCSEL 磊晶片置於反應性離子蝕刻系統(Reactive Ion Etch, RIE)，以蝕刻 Si_3N_4 薄膜，以IR終點偵測器(End Point Detection)監控蝕刻終點(2000Å)。

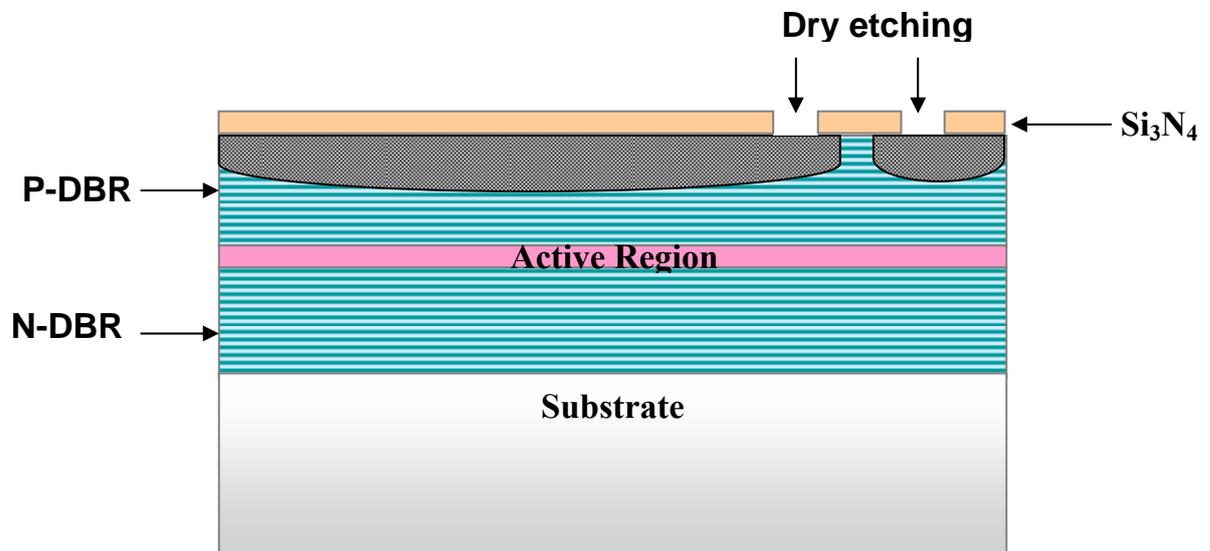


圖3-14 RIE蝕刻 Si_3N_4 示意圖

4. 以溼蝕刻產生凸台(mesa)

將 VCSEL 磊晶片置於 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 : \text{HBr} : \text{CH}_3\text{COOH}(4:3:4)$ 溶液中蝕刻致超過主動層，深度約 $4.5 \mu\text{m}$ 、時間約 1 分 15 秒，再將磊晶片置入 α -step 進行深度測量，若深度未達則繼續蝕刻直到 $4.5 \mu\text{m}$ ，最後以 DI water 清洗，再以氮氣吹乾。

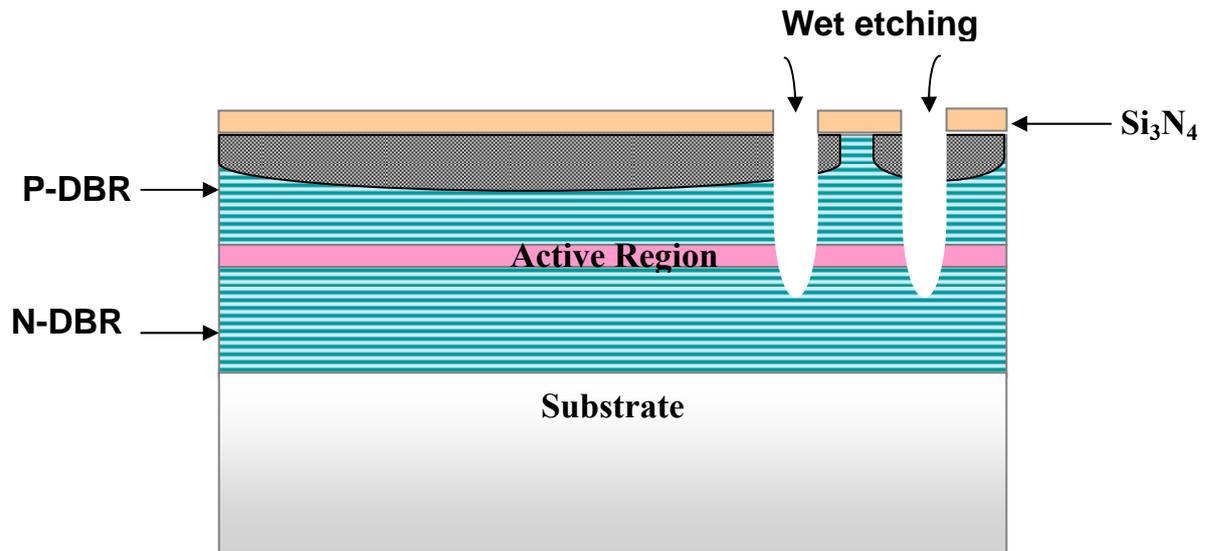


圖3-15 蝕刻GaAs 半導體部分示意圖

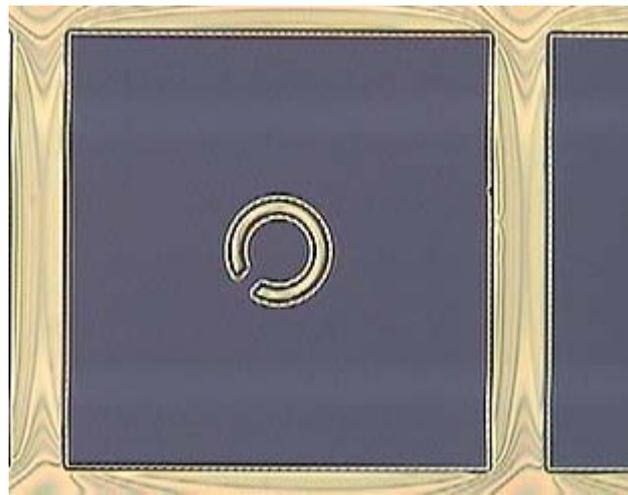


圖3-16 經過111 蝕刻之上視圖照片

5. 水蒸氣進行橫向氧化 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 層製程：

- a. 爐溫設定為 410°C 、將水注滿加熱瓶中，待水煮沸(100°C)後使通入 N_2 氣體($1\text{L}/\text{MIN}$)，並讓爐管穩定 1hr 以上，讓氧化爐管內水汽達到穩定飽和始開始氧化

- b. 將 VCSEL 磊晶片置於氧化爐管，先至於爐口 54cm 處遇熱 2min，此區溫度約 200°C
- c. 待 2min 後將晶片推入爐管中央(105cm)均溫區處，此均溫區有 30cm 長，此區爐溫平均 410±1°C
- d. 晶片在爐管中央(105cm)均溫處約氧化 40 分鐘。
- e. 待氧化時間到後，隨即關掉 N₂ 氣體並將晶片拉出至爐口 54cm 處遇冷 2min，此區溫度約 200°C。
- f. 將晶片置於有 IR 光源之 OM 下觀察氧化時間與孔徑之關係如圖

3-18。示意圖如圖 3-17 所示。

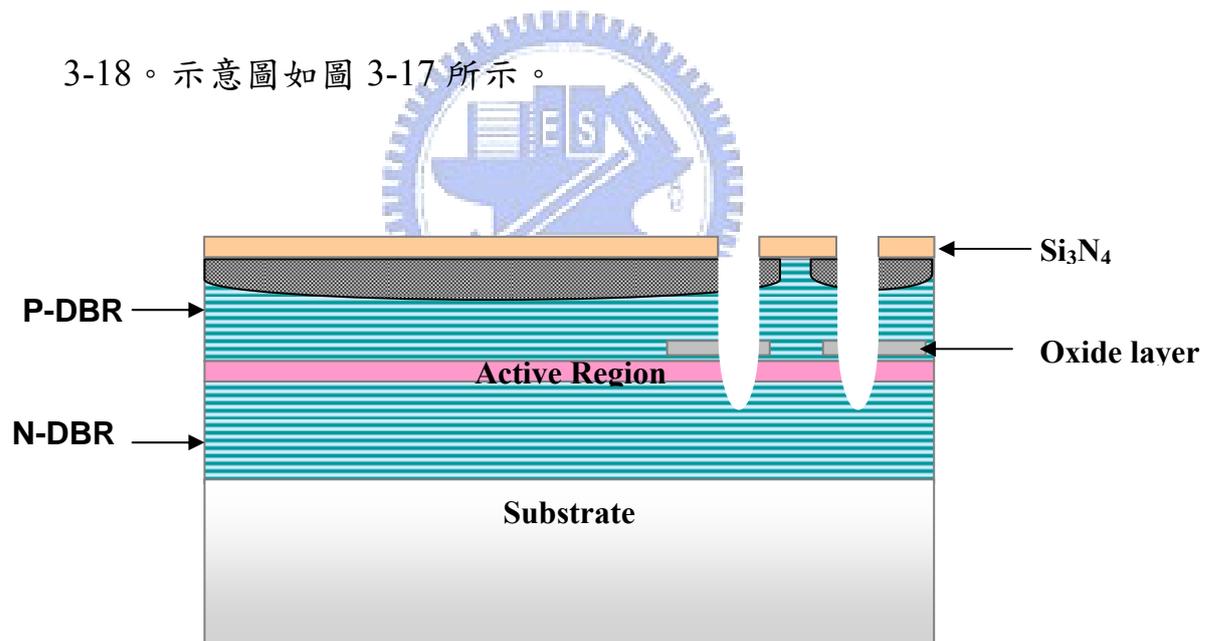


圖3-17 選擇性橫向氧化侷限製程示意圖

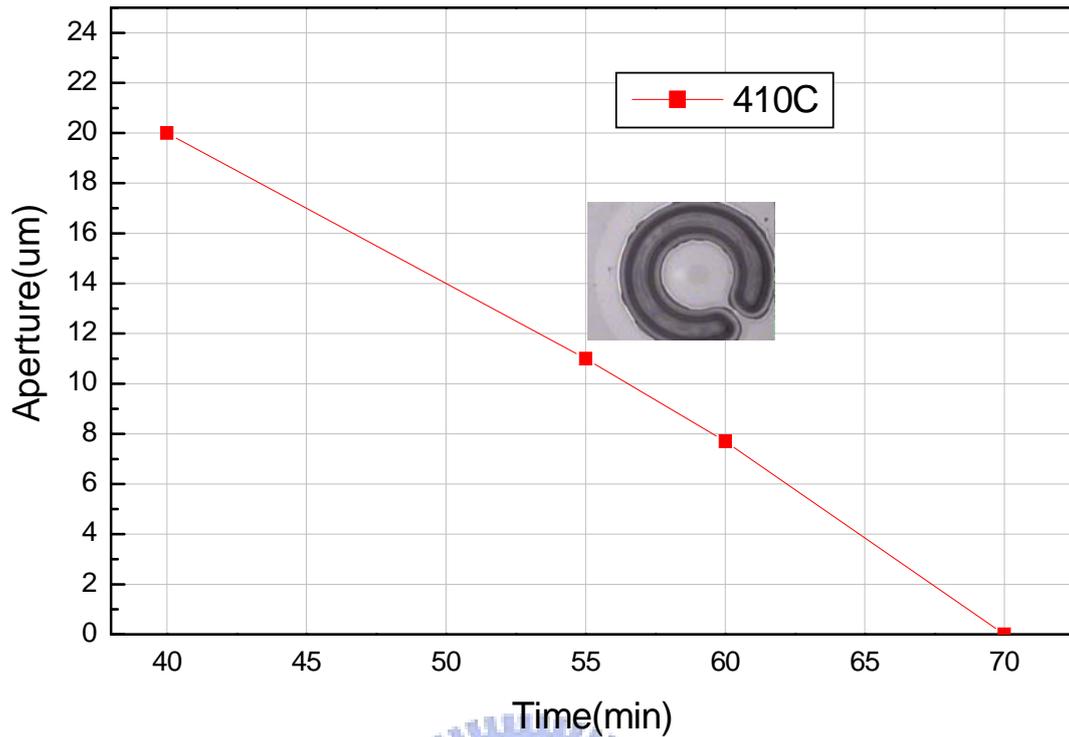


圖3-18 OM觀察到的氧化時間與孔徑之關係圖

3.3.4 製作 p-type 電極以及金屬回火

1. 蝕刻 Si_3N_4

將 VCSEL 磊晶片置於反應性離子蝕刻系統(Reactive Ion Etch, RIE)，以去除氧化後之晶片 Si_3N_4 薄膜，以IR終點偵測器(End Point Detection)監控蝕刻終點(2000Å)。

2. PECVD成長 SiO_2

使用電漿輔助化學氣相沉積系統(Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)沉積一層 3000Å 的 SiO_2 。

3. 曝光顯影製程製作出開窗所需之圖形

a. 將VCSEL 磊晶片旋塗負光阻L300-40，轉速為3500 rpm、20 秒，

經 Hot plant 軟烤 105°C、時間為 1 分 30 秒以去除水分。

b.以紫外光(UV365nm)曝光機對準曝光 flux 為 78 mW/cm²，以 AZ-300 顯影液顯影 1 分鐘，然後置入 DI water 清洗，再以氮氣吹乾。

4. RIE蝕刻SiO₂

將 VCSEL 磊晶片置於反應性離子蝕刻系統(Reactive Ion Etch, RIE)，以去除氧化後之晶片SiO₂薄膜，以IR終點偵測器(End Point Detection)監控蝕刻終點(3000Å)，如圖3-19乾蝕刻暴露出來的SiO₂。

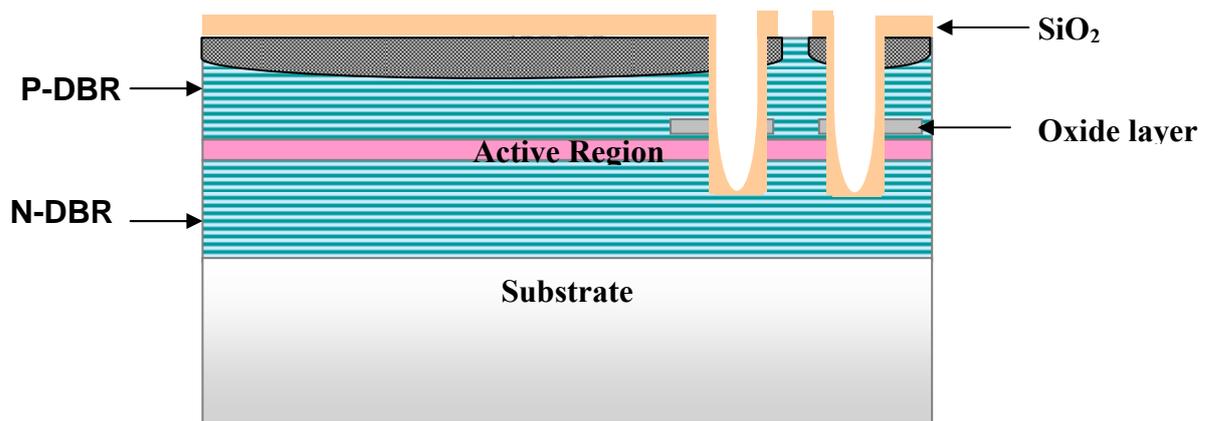


圖3-19 RIE蝕刻SiO₂層開窗示意圖

5. 曝光顯影製程製作出p型電極所需之圖形

a. 將VCSEL 磊晶片旋塗負光阻L300-40，轉速為3500 rpm、20 秒，

經 Hot plant 軟烤 105°C、時間為 1 分 30 秒以去除水分。

b.以紫外光(UV365nm)曝光機對準曝光 flux 為 78 mW/cm²，以 AZ-300

顯影液顯影 1 分鐘，然後置入 DI water 清洗，再以氮氣吹乾。

6. 將晶片以稀釋的HCl($\text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 20$)去除p區之氧化層。

7. 以濺鍍設備(Sputtering System)蒸鍍Ti/Pt/Au ($500\text{\AA} / 500\text{\AA} / 5000\text{\AA}$)金屬。

8. 以丙酮做Lift-off，完成p-type 金屬電極。

9. Annealing (退火)

將蒸鍍金屬及 lift-off 之 VCSEL 磊晶片置於RTA爐中 annealing 410°C

30秒，形成 p-type ohmic contact。如圖3-20所示。

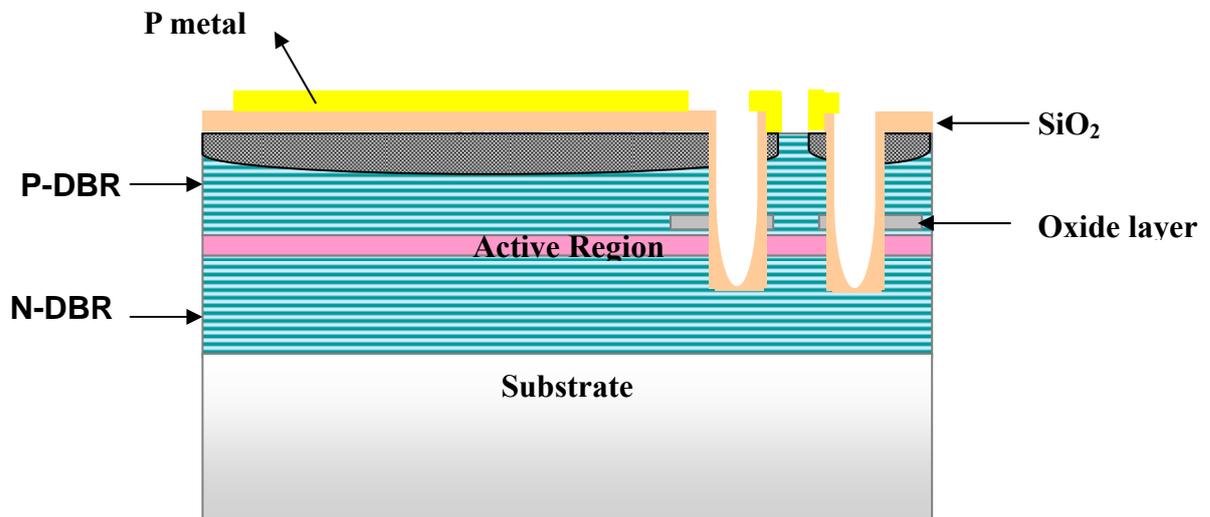


圖3-20 蒸鍍p-type 電極示意圖

3.3.5 製作 n-type 電極以及金屬回火

1. 晶片研磨

將 VCSEL 晶片置入研磨機，將原本厚度 $650\mu\text{m}$ 研磨至 $250\mu\text{m}$

($5\mu\text{m Al}_2\text{O}_3/40\text{ rpm}$)以降低電阻。

2. 金屬蒸鍍

a. 將 VCSEL 晶片置入稀鹽酸水(HCl : H₂O=1 : 4) 清洗 30 秒，再以 DI water 洗淨

b. 置入 Thermal 蒸鍍機，蒸鍍 AuGeNi/Au (1,800/4,000 Å)。

3. Annealing (退火)

將 VCSEL 磊晶片置於 RTA 爐中 annealing 380°C 30 秒，形成 n-type ohmic contact。如圖 3-21 所示。

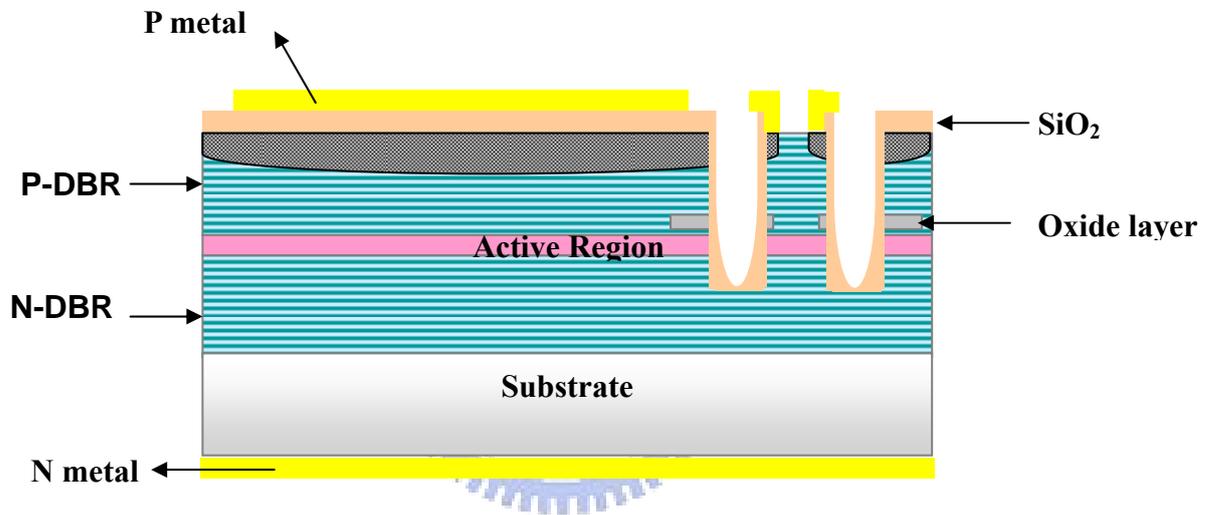
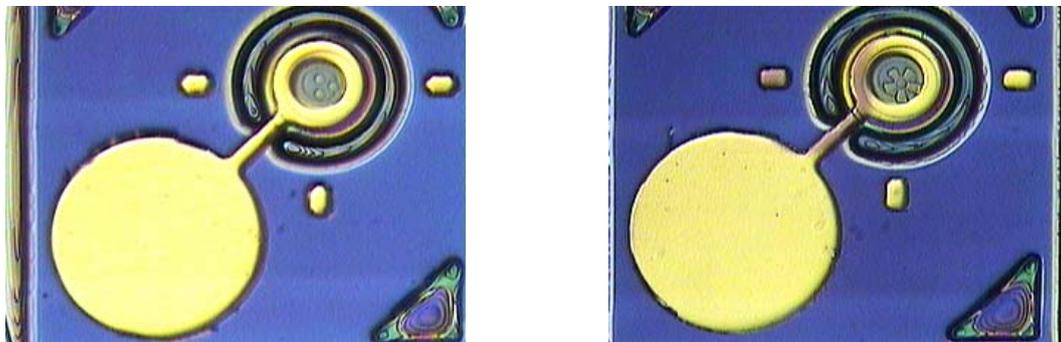


圖3-21 蒸鍍N-type 電極示意圖

4. 完整的氧化合併鋅擴散元件圖形照片如圖3-22 所示。



(a) 三圓形

(b) 花瓣形

圖3-22氧化型合併鋅擴散VCSEL元件(a)三圓形 (b)花瓣形

3.4 特性量測

3.4.1 L-I-V Curve 與光譜量測

置晶片於工作平台上，使用電腦來控制所有儀器的運作，包含量測與實驗數據的紀錄，以Keithley 238作為連續電流源，此電流源也可相對量測電流的電壓，量測雷射輸出的功率是經由積分球再送至Newport Model 1835-c來輸出訊號，最後經由電腦來控制量測可得精確的L-I-V Curve。

頻譜的量測類似電流對電壓（L-I）的量測系統，只是再多加上多模態光纖，此多模態光纖架在元件的發光窗口上，並把雷射光導入頻譜分析儀，總量測系統如圖3-23所示。

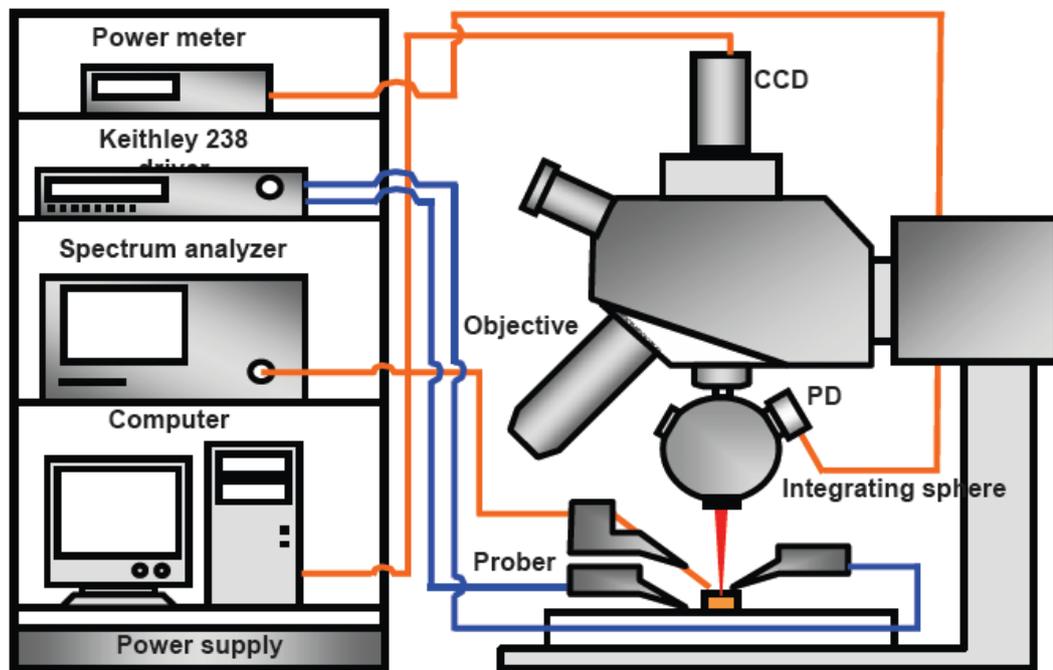


圖3-23 量測L-I-V Curve系統示意圖

3.5.2 近場模態測量

置晶片於工作平台上，以Keithley 238電流源透過探針輸入電流至晶片，待VCSEL 元件操作後，所激發的雷射光束會投影於屏幕上，由CCD 透過電腦即可擷取近場模態的影像，測系統如圖3-24所示。

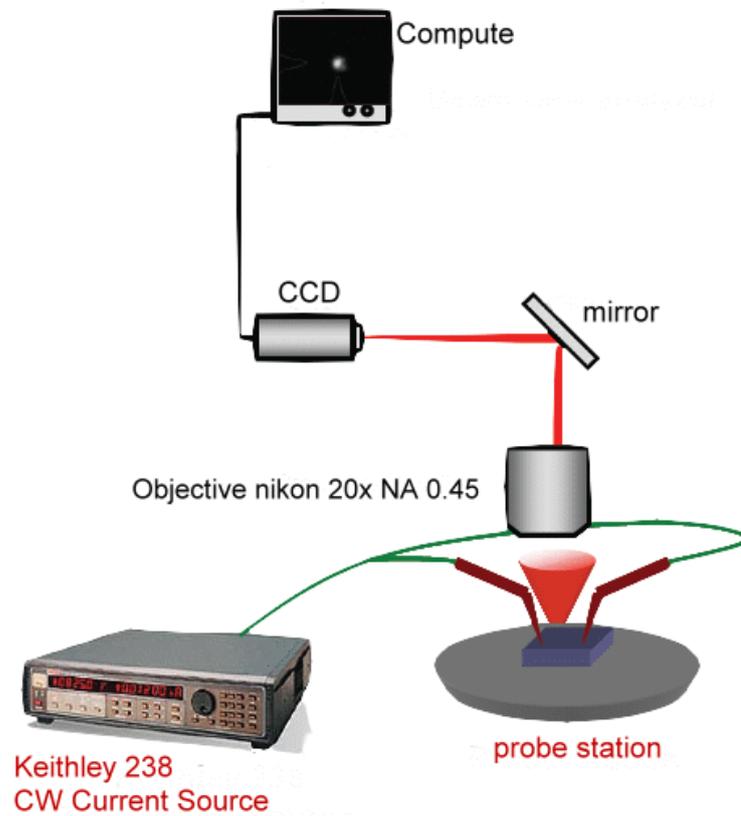


圖3-24 近場投影量測系統

第四章 結果與討論

4.1 氧化型 VCSEL 量測結果

4.1.1 電流電壓 I-V 曲線

圖4-1為單純氧化7.5 μm 及11 μm 的VCSEL 元件的I-V 曲線，由圖可以看到大約在1.4V時，元件開始動作，而操作電阻各為92 Ω 以及55 Ω 。

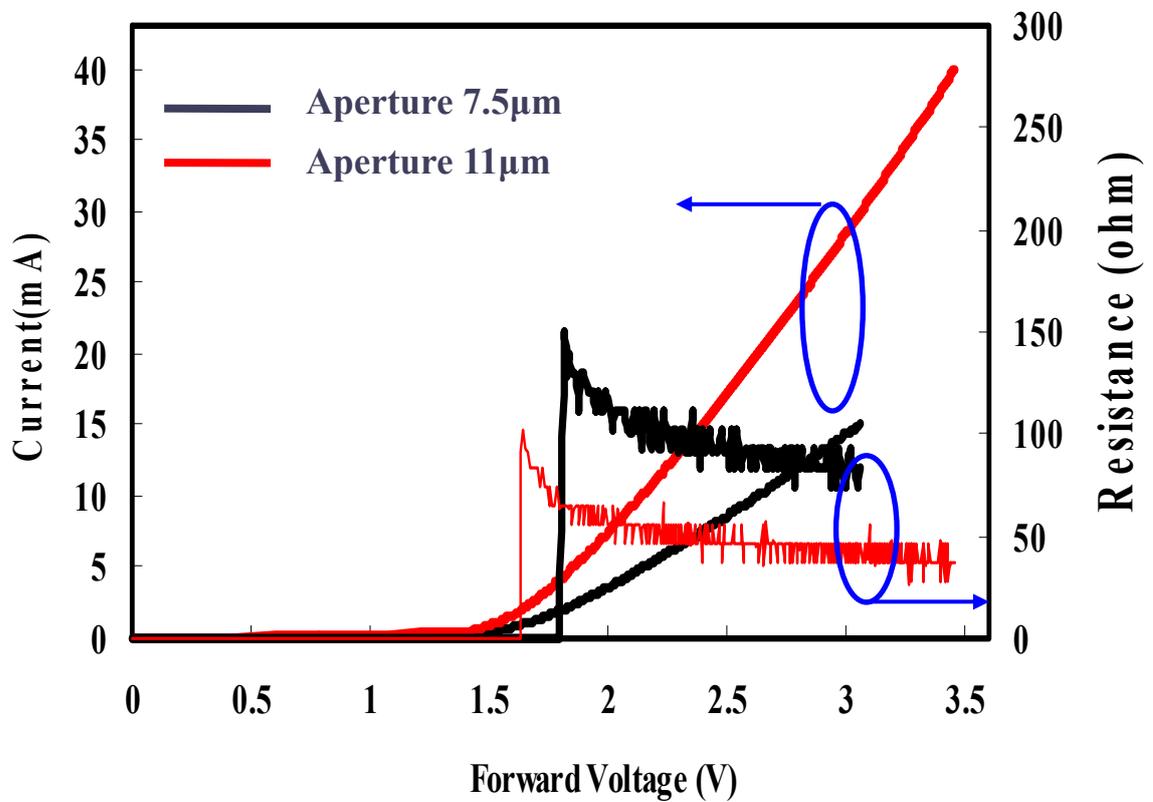


圖4- 1 I-V 特性曲線

為了能夠分析元件的特性，圖4-2 是元件幾何圖形以及幾何尺寸的介紹。我們的元件氧化孔徑(aperture)分別為 $7.5\ \mu\text{m}$ 及 $11\ \mu\text{m}$ ，而臺座的大小為 $43\ \mu\text{m}$ 。氧化孔徑的目的是侷限電流，而單純氧化型的元件則是同時做為光的侷限以及電流侷限。由圖4-2可以發現，在較大的氧化孔徑會有較小的操作電阻，那是因為較大的氧化孔徑會有較大的面積電流可以留過，而由方程式4-1 發現，有較大的面積會有較小的電阻。

$$R = \sigma \frac{A}{L} \quad (4-1)$$

4.1.2 輸出光功率對電流(L-I)曲線

我們看到圖4-2 為光功率對電流之曲線。氧化型元件依孔徑不同可得臨限電流為 $1.6\ \text{mA}$ ($7.5\ \mu\text{m}$)、 $2.7\ \text{mA}$ ($11\ \mu\text{m}$)，飽和功率約分別 $3.0\ \text{mW}$ 及 $4.3\ \text{mW}$ ，因此發現小的氧化孔徑始雖有低的臨界電流，但飽和電流卻也相對的低，從注入電流密度來討論的話發現；因為孔徑增大，相對的在主要發光層產生lasing 的面積也因為孔徑增大而增大，若對要達到lasing 的條件而言，需要一定的注入電流密度才能到達載子分佈反轉的話，那麼面積增大所造成的影響必然是增加臨界電流。

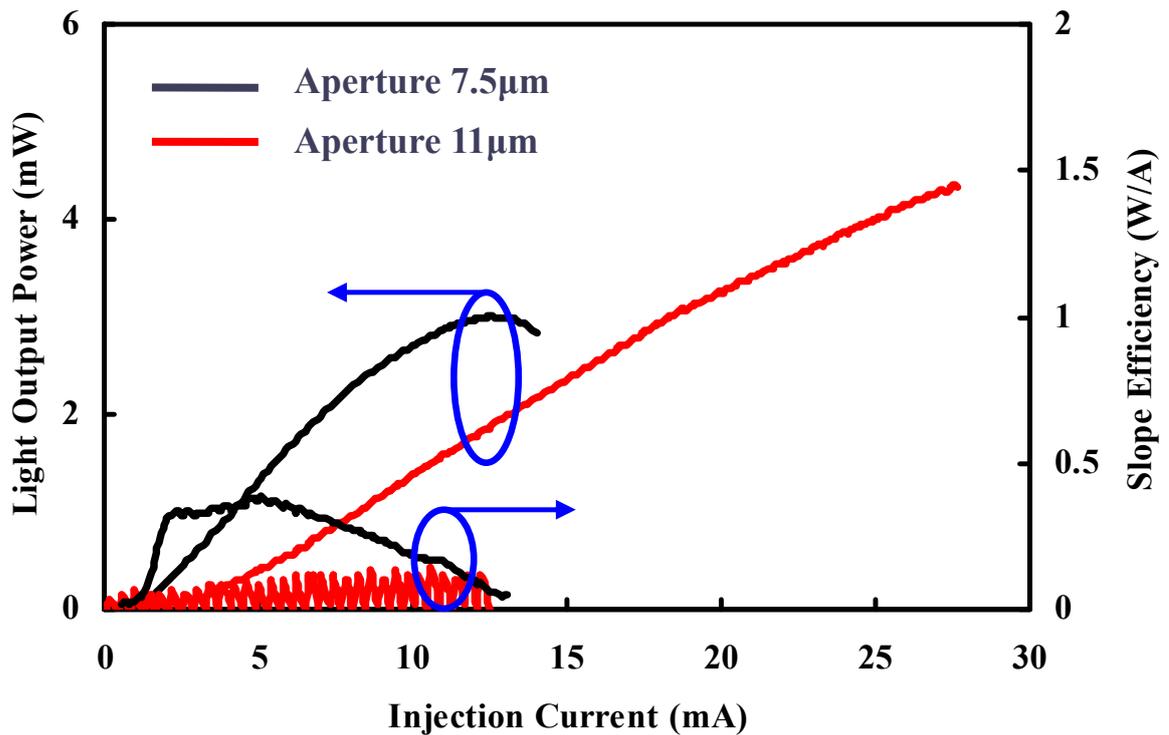


圖4-2 L-I 特性曲線

4.1.3 頻譜圖

圖4-3、4-4顯示出在不同輸入電流之下氧化型VCSEL之頻譜圖，每個頻譜分布圖的曲線峰值隨著電流增高，由於電流熱效應的關係，使得能隙 E_g 隨溫度增加而減小，讓峰值漸漸地往長波長移動。而由圖可知，在氧化孔徑 $11\mu\text{m}$ 的元件中，在低電流 4mA 的注入時，就已經有很多的模態產生。而氧化孔徑 $7\mu\text{m}$ 之頻譜圖與較大的氧化孔徑之頻譜比較，可以發現， $7\mu\text{m}$ 之頻譜圖在 7mA 時才有多模態產生，足以證明氧化孔徑越小才可以抑制邊模的產生。

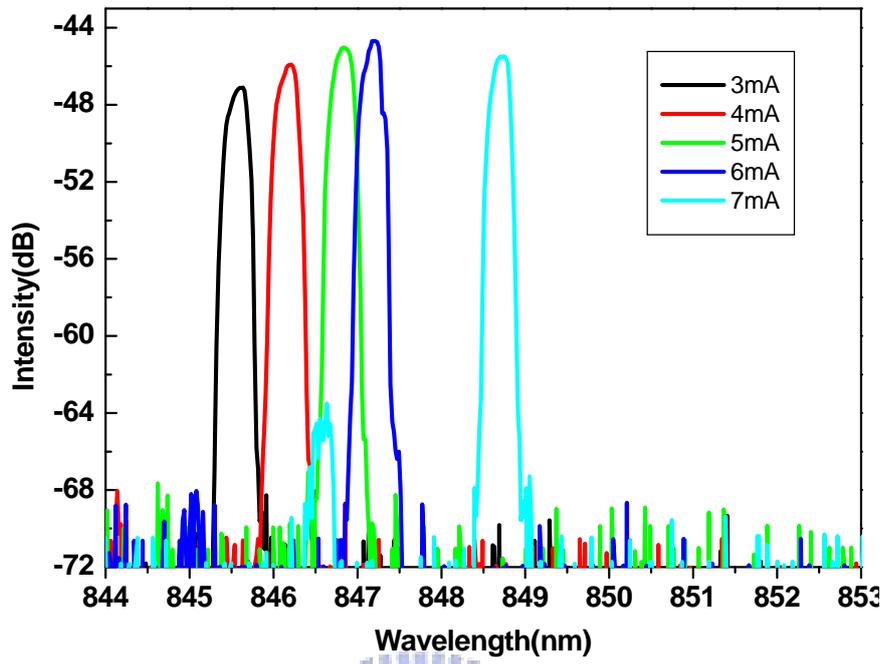


圖4-3 氧化孔徑7 μm 相對頻譜圖

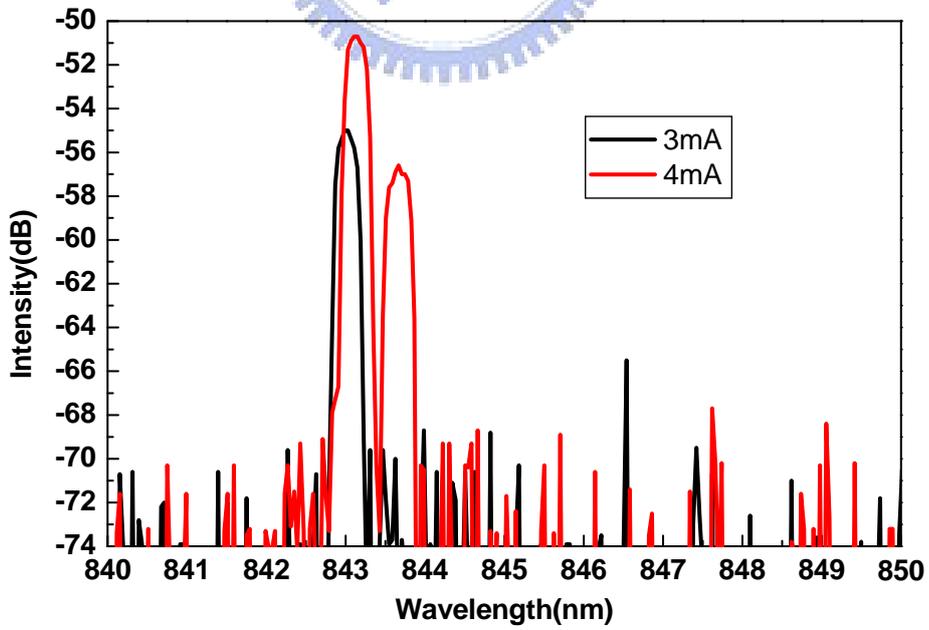
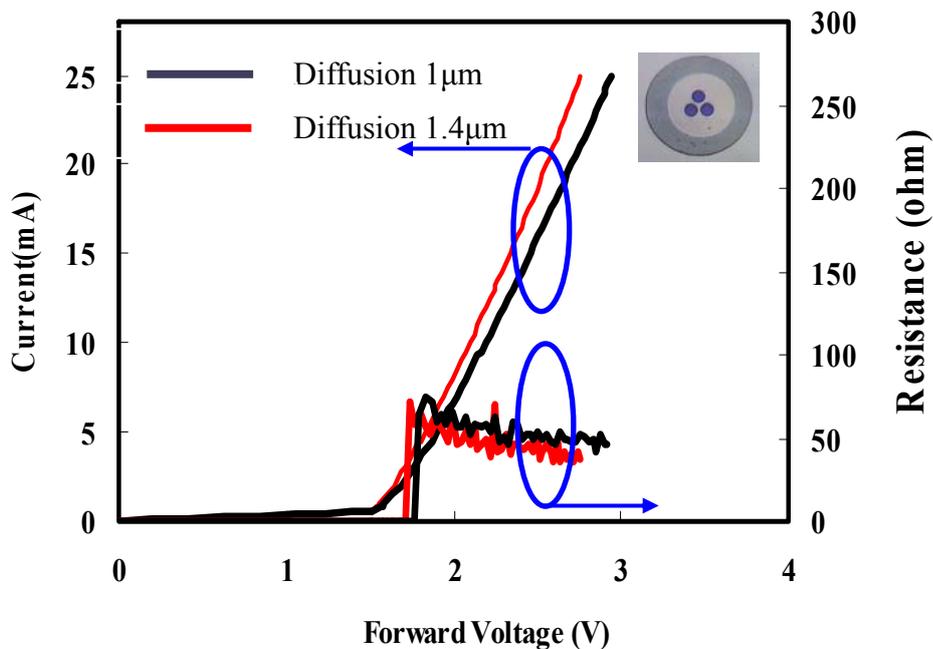


圖4-4 氧化孔徑11 μm 相對頻譜圖

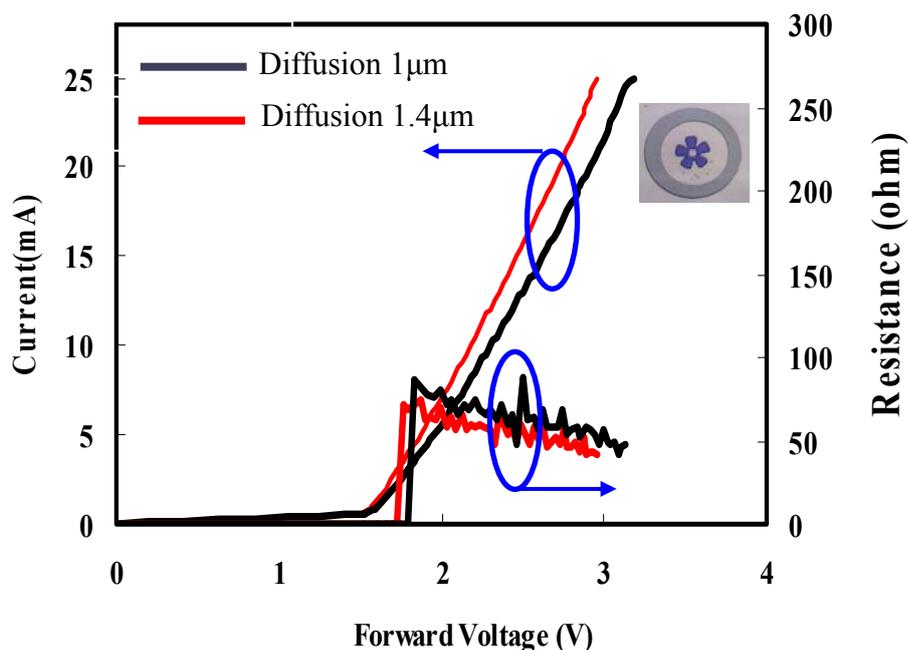
4.2 氧化型合併鋅擴散 VCSEL 量測結果

4.2.1 電流電壓 I-V 曲線

由頻譜結果發現單純氧化型(孔徑 $11\mu\text{m}$)的VCSEL 元件在小電流 4mA 時即有多模態產生，在此實驗中我們以相同氧化孔徑($11\mu\text{m}$)條件下，比較純氧化型VCSEL 元件之I-V 曲線，分析發現氧化型合併鋅擴散VCSEL 元件會有較小的電阻，再比較兩種鋅擴散幾何圖形在不同擴散深度下之差異性，得到如圖4-5的I-V 曲線，由圖可以看到大約在 1.5V 時，元件開始動作，其中可以發現不論何種擴散幾何圖形，皆顯示擴散深度 $1.4\mu\text{m}$ 有最小的電阻(如表四)，由此可推斷鋅擴散可以減小串聯電阻造成電阻降低，而擴散深度越深電阻越小，因此也提高外部效率。



(a)三圓形

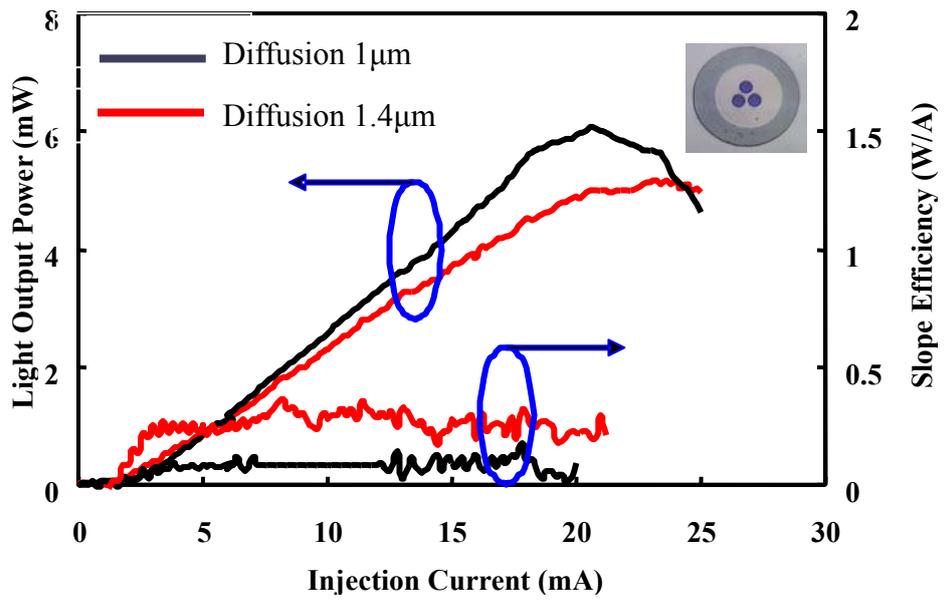


(b)花瓣形

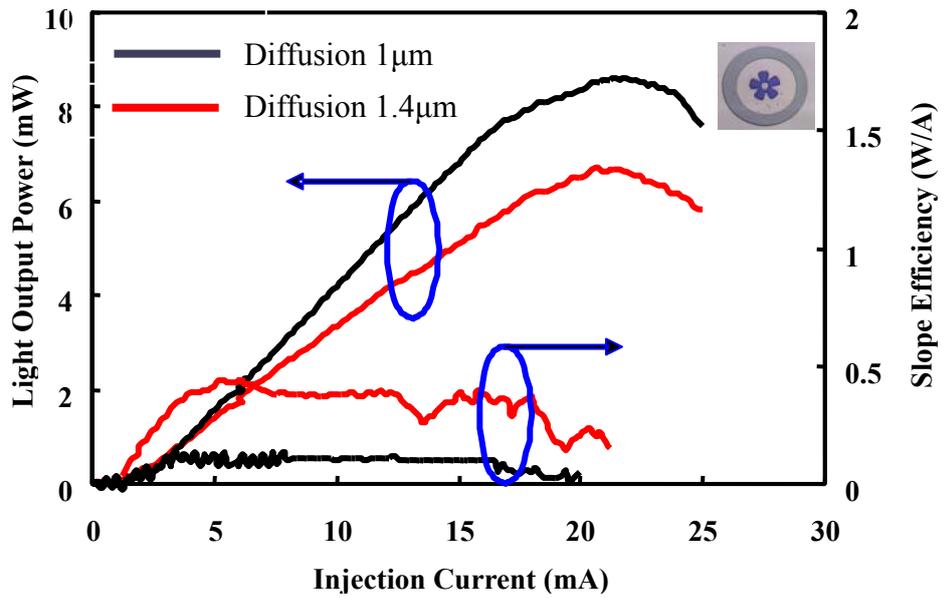
圖4-5 鋅擴散合併氧化孔徑 $11\mu\text{m}$ I-V 特性曲線 (a)三圓型(b)花瓣型

4-2-2 輸出光功率對電流(L-I)曲線

圖4-6為氧化型合併鋅擴散VCSEL 之光功率對電流曲線。可以發現，氧化型合併鋅擴散VCSEL比起氧化型VCSEL有較低的臨限電流(threshold current)及較高的斜度效率(Slope efficiency)，分析原因應該為鋅擴散p-type DBR 區域的時候致使反射率降低，而使得自由載子的吸收係數增加，讓光損耗更多，使得增益降低所致。且氧化型合併鋅擴散VCSEL 擁有較大的輸出功率，而花瓣形因為出光面積大相對於三圓形之擴散幾何圖形而有較大之輸出功率，但可以發現的是擴散深度越深其飽和功率較低，探究其原因為擴散不單只在縱向擴散，也會向側向擴散，所以造成出光面積減小。



(a)三圓形



(b)花瓣形

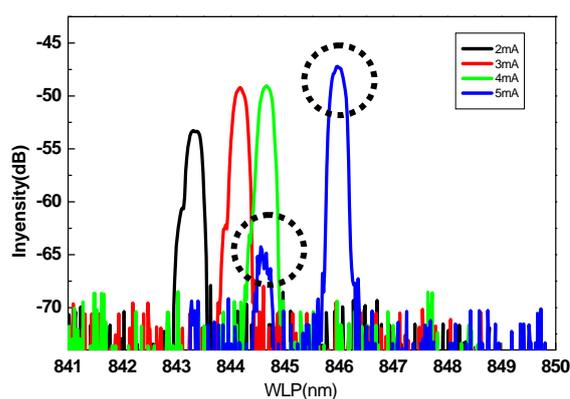
圖4-6 鋅擴散合併氧化孔徑11 μm L-I特性曲線 (a)三圓形 (b)花瓣形

擴散圖形	三圓形		花瓣形	
	1 μm	1.4 μm	1 μm	1.4 μm
擴散深度	1 μm	1.4 μm	1 μm	1.4 μm
R (Ω)	53	46	54	48
I _{th} (mA)	2	1.8	1.8	1.6
P _{max.} (mW)	6.1	5.2	8.6	6.7
Slope efficiency (W / A)	0.16	0.34	0.17	0.48

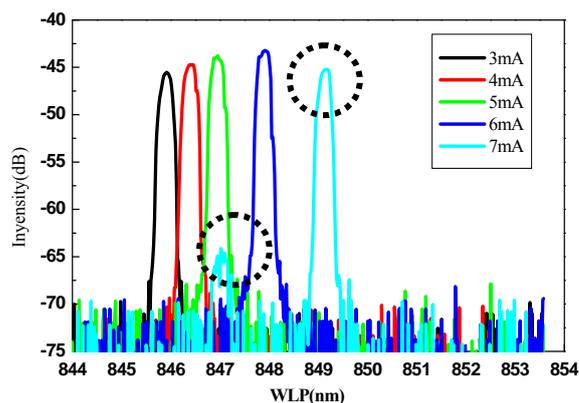
表四 擴散圖形與擴散深度VCSEL元件光電特性表

4-2-3 頻譜圖

圖4-7顯示出氧化型合併三圓形鋅擴散圖形VCSEL之頻譜圖，可以看見在高電流注入時，能隙 E_g 隨溫度增加而減小，讓峰值漸漸地往長波長移動。而由圖可知擴散1.4 μm VCSEL元件在(1~6mA)電流注入下，皆穩定維持單一模態 (single fundamental mode)，其中邊模抑制率 (SMSR) 約為30dB，。這可以證明，鋅擴散深度深能有效的抑制多模(multimode)的出現。



(a) 擴散 1 μm



(b) 擴散 1.4 μm

圖4-7 三圓形鋅擴散圖形合併氧化元件之相對頻譜圖 (a)1 μm (b) 1.4 μm

圖4-8顯示出氧化型合併花瓣形鋅擴散圖形VCSEL之頻譜圖，可以看見在高電流注入時，能隙 E_g 隨溫度增加而減小，讓峰值漸漸地往長波長移動。而由圖可知擴散 $1.4\mu\text{m}$ VCSEL元件在(1~8mA)電流注入下，皆穩定維持單一模態 (single fundamental mode)，其中邊模抑制率 (SMSR) 約為30dB，且比起三圓形鋅擴散圖形抑制多模(multimode)的效果更加。

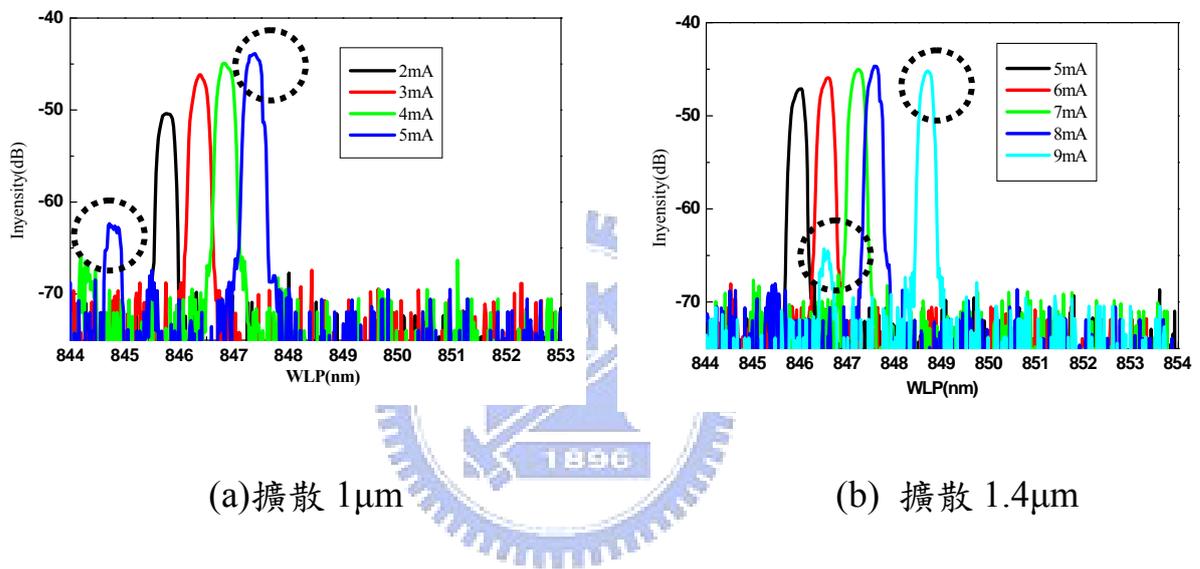


圖4-8 花瓣形鋅擴散圖形合併氧化元件之相對頻譜圖 (a) $1\mu\text{m}$ (b) $1.4\mu\text{m}$

4-2-4 近場 (Near field) 模態

在近場 (Near field) 模態中我們取擴散 $1.4\ \mu\text{m}$ 元件作分析可以發現，以鋅擴散之孔徑來控制發光區域的模態效果，可以發現三圓形VCSE從低電流至高電流操作下 ($1\text{mA}\sim 6\text{mA}$) 電流驅動下，顯現為空間中的一個圓形光點 (single spot)，而花瓣形VCSEL低電流時 ($1\text{mA}\sim 4\text{mA}$) 判斷中間為laser mode，而邊緣為led光源，至高電流操作時才顯現為為空間中的一個圓形光點 (single spot)。

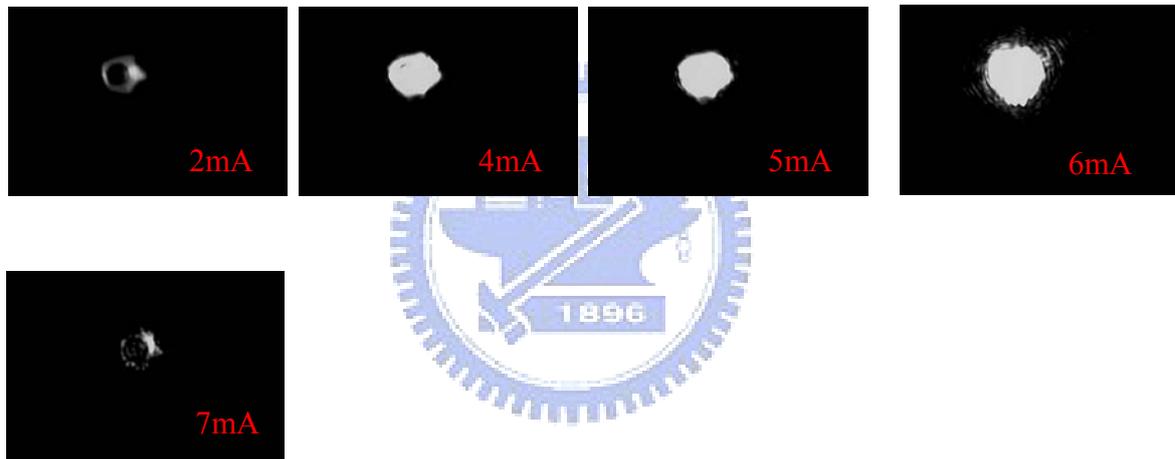


圖4-9 三圓形VCSE在 $1\text{mA}\sim 7\text{mA}$ 之近場模態

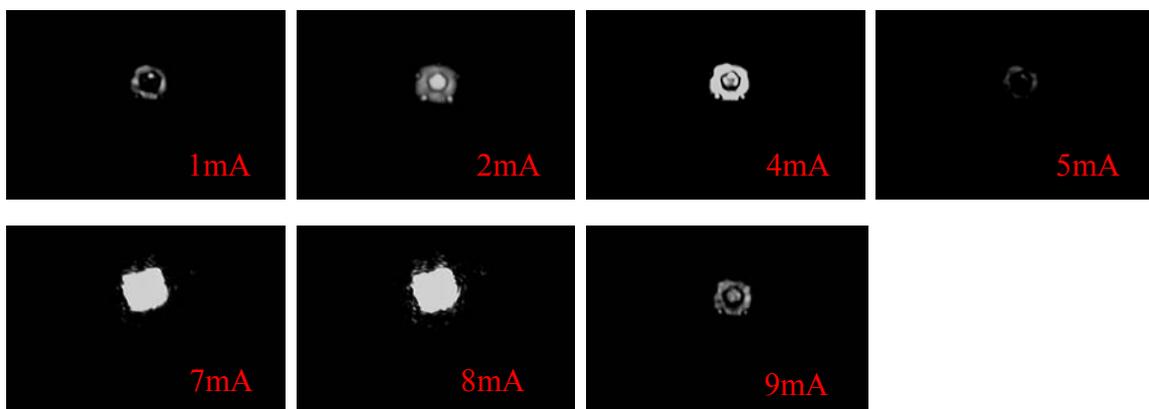


圖4-10 花瓣形VCSEL在 $1\text{mA}\sim 9\text{mA}$ 之近場模態

第五章 結論

我們證明以相同氧化孔徑($11\ \mu\text{m}$)但合併鋅擴散圖形製作的VCSEL，可以降低臨限電流，尤其花瓣型擴散圖層可以達到 1.6mA 低臨限電流並在 8mA 電流操作下仍可維持單模的特性，代表有著優異抑制邊模的效果。再來因鋅擴散加重了上層p-DBR 的摻雜濃度而有效降低串聯電阻，間接也降低了外部電路的RC常數。

我們比較兩種擴散深度 1 及 $1.4\ \mu\text{m}$ ，發現 $1.4\ \mu\text{m}$ 擴散深度其Slop efficiency及抑制邊模效果較佳，尤其是花瓣形擴散圖層Slop efficiency可達 $0.48\ \text{W/A}$ ，所以擴散不只讓電阻減小也提高了外部效率。

而在三圓形擴散圖層方面，元件之飽和功率不如花瓣圖形，可能是發光面積直接影響了元件發光效率，但如何維持高功率且單模態的特性，判斷日後在鋅擴散深度及擴散孔徑圖形為可持續研究的方向。

在未來實現光連結平行光傳輸用多維式陣列VCSEL，這樣的製作方法是非常有潛力去達到，但必須深入了解擴散圖形和高階光模態的關係，最佳的是以模擬軟體來預測鋅擴散及設計發光孔徑形狀來控制光模態，以形成較理想的單一圓形光點。

参考文献

- [1] Hiromi Otoma, Akemi Murakami, Yasuaki Kuwata, Nobuaki Ueki, Naotaka Mukoyama,” IEEE, pp. 80-85, 2006.
- [2] K. L. Lear and A. N. Al-Omari, “Progress and issues for high speed vertical cavity surface emitting lasers,” Proc. of SPIE, vol. 6484, pp. 64840J-1-64840J-12, 2007.
- [3] F. Mederer, I. Ecker, J. Joos, M. Kicherer, H. J . Unold, K. J. Ebeling, M. Grabherr, R. Jäger, R. King, and D. Weidenmann, “High Performance Selectively Oxidized VCSELs and Arrays for Parallel High-Speed 62 Optical Interconnects, ”IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. 24, pp. 442-449, Nov., 2001.
- [4] E. W. Young, K. D. Choquette, S. L. Chuang, K. M. Geib, A. J. Fischer, and A. A. Allerman, “Single-transverse-mode vertical-cavity lasers under continuous and pulsed operation,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, pp. 927-929, Sep., 2001.
- [5] A. Larsson, C. Carlsson, J. S. Gustavsson, Å. Haglund, P. Modh, and J. Bengtsson, “Direct high-frequency modulation of VCSELs and applications in fibre optic RF and microwave link.” New Journal of Physics 6, Nov. 2004. Invited paper.

- [6] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 18, pp.2329-2330,1979.
- [7] K. Iga, S. Ishikawa, S. Ohkouchi, and T. Nishimura, "Room-temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface-emitting injection laser," Appl. Phys. Lett., vol. 45, pp. 348-350, 1984.
- [8] Wenbin Jiang, Norton LJ, Kiely P, Schwartz DB, Gable B, Lebby M, Raskin G., Optical Engineering, vol.37, no.12, pp.3113-3118(1998)
- [9] NEIL SAVAGE, "Linking with Light," IEEE Spectrum, vol. 39, issue 8, Aug. 2002.
- [10] B. E. Deal and A. S. Grove, "General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon", J. Appl. Phys., Vol. 36, p. 3770, 1965.
- [11] M. Ochiai et al., Appl. Phys. Lett., 68, 1898.
- [12] Kent D. Choquette, K. L. Lear, R. P. Schneider, Jr., K. M. Geib, J. J. Figiel, and Robert Hull, "Fabrication and Performance of Selectively oxidized Vertical-Cavity Lasers" Photon. Tech. Lett. 7, 1237, 1995.
- [13] N. Hplonyak, Jr., and J. M. Dallesasse, USA Patent # 5,262,360 ,

- [14] K. D. Choquette, K. M. Geib, H. C. Chui, B. E. Hammons, H. Q. Hou, T. J. Drummond, and R. Hull, "Selective oxidation of buried AlGaAs versus AlAs layers," *Appl. Phys. Lett.* 69, 1935-1837, 1996.
- [15] K. L. Lear, R. P. Schneidner, Jr., K. D. Choquette, and S. P. Kilcoyne, "Index guiding dependent effects in implant and oxide confined vertical-cavity lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol 8, pp.740-742, 1996.
- [16] D. L. Huffaker, J. Shin, and D. G. Deppe, "Lasing characteristics of low threshold microcavity lasers using half-wave spacer layers and lateral index confinement." *Appl. Phys. Lett.*, 66, pp.1723-1725, 1995
- [17] K. D. Choquette, K. L. Lear, R. P. Schneider, Jr., and K. M. Geib, "Cavity characteristics of selectively oxidized vertical-cavity lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66, pp.3413-3415, 1995.
- [18] Nguyen Hong Ky, J. D., Ganiere, M. Gailhanou, B. Blanchard, L. Pavesi, G. Burri, D. Araujo and F. K. Reinhart "Self-interstitial mechanism for Zn diffusion-induced disordering of GaAs/Al_xGa_{1-x}As (x=0.1-1) multiple-quantum-well structures." *Journal of Applied Physics*, 73, pp3769-3781, 1993.

- [19] Van Vechten," Intermixing of an AlAs-GaAs superlattice by Zn diffusion " J. Appl. Phys.55, p.607, 1984
- [20] W. D. Laidig, N. Holonyak, Jr., M. D. Camras, K.Hess, J. J. Coleman, P. D. Dapkus, and J. Bardeen, "Disorder of an AlAs-GaAs superlattice by impurity diffusion" Appl.Phys.Lett.38,776, 1981.
- [21] I. Harrison, H. P. Ho, B. Tuck, M. Henini, and O. H. Hughes, "Zn diffusion-induced disorder in AlAs/GaAs superlattice"Semicond. Sci. Technol., 4, pp.841-846, 1989.
- [22] 陳志誠" 穩態單橫模和穩定極化的面射型雷射" 國立台灣大學電機工程學系博士論文 , 民國90 年
- [23] R. G. Hunsperger, Integrated Optics:Theory and Technology, Hong Kong, Springer-Verlag, 77, 1992.
- [24] S. K. Ageo, R. J. Roedel, N. Mellen, and J. S. Escher, Appl. Phys. Lett. 47, p.1193, 1985.
- [25] C. J. Chang-Hasnain, M. Orenstein, A. V. Lehmen, L. T.Florez, and J. P. Harbison, "Transverse mode characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers" Appl. Phys. Lett., vol. 57, pp.218-220, 1990.
- [26] K.L.Lear, K. D. Choquette, R. P. Schneider, Jr., and S. P. Kilcoyne, "Modal Analysis of a small surface emitting laser with a selectively

- [27] F. A. Kish, S. J. Caracci, N. Holonyak, Jr., J. M. Dallesasse, K. C. Hsieh, M. J. Ries, S. C. Smith, and R. D. Burnham, "Planar native-oxide index-guided $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum well heterostructure lasers." *Appl. Phys. Lett.*, 59, pp.1755-1757, 1991
- [28] D. L. Huffaker, J. Shin, and D. G. Deppe, "Lasing characteristics of low threshold microcavity lasers using half-wave spacer layers and lateral index confinement." *Appl. Phys. Lett.*, 66, pp.1723-1725, 1995
- [29] B. M. Hawkins, R. A. Hawthorne, III, J. K. Guenter, J. A. Tatum, and J. R. Biard, "Reliability of various size oxide aperture VCSELs," *Proc. Conf. 52nd Electronic Components and Technology.*, pp. 540-550, 2002.
- [30] Y. H. Lee, J. L. Jewell, B. Tell, K. F. Browen-Goebler, A. Sherer, J. P. Harbison, and L. T. Florez, *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 225-227, (1990)
- [31] Jean-Francois P. Seurin, Guobin Liu, and Shun Lien Chuang, Leo M. F. Chirovsky, W. S. Hobson, and J. Lopata, *Applied Physics Letters*, vol. 77, no. 23 pp. 3686-3688 (2000)
- [32] J. L. Jewell, A. Sherer, S. L. McCall, Y. H. Lee, S. Walker, J. P.

- [33] A. Furukawa, S. Sasaki, M. Hoshi, A. Matsuzono, K. Moritoh, and T. Baba, "High-power single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers with triangular holey structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, pp. 5161-5163, Nov., 2004.
- [34] Nguyen Hong Ky, J. D., Ganiere, M. Gailhanou, B. Blanchard, L. Pavesi, G. Burri, D. Araujo and F. K. Reinhart "Self-interstitial mechanism for Zn diffusion-induced disordering of GaAs/Al_xGa_{1-x}As (x=0.1-1) multiple-quantum-well structures." *Journal of Applied Physics*, 73, pp.3769-3781, 1993.
- [35] C. J. Chang-Hasnain, M. Orenstein, A. V. Lehmen, L. T. Florez, and J. P. Harbison, "Transverse mode characteristics of vertical cavity surface emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, pp. 218–220, 1990.
- [36] C. C. Chen, S. J. Liaw, and Y. J. Yang, "Stable single-mode operation of an 850 nm VCSEL with a higher-order mode absorber formed by shallow Zn diffusion," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 13, pp. 266-268, 2001.