

國 立 交 通 大 學  
光 電 工 程 研 究 所

碩士論文

氮化鎵面射型發光元件的製造與光  
學特性

**LIGHT CHARACTERISTIC AND  
FABRICATION OF GaN LIGHT  
EMITTING DEVICES**

研究生：謝永龍

指導教授：王興宗 教授

中華民國 九十三年 六月

# 氮化鎵面射型發光元件的製造與光學特性

研究生：謝永龍

指導教授：王興宗 教授  
郭浩中 教授

國立交通大學光電工程研究所

## 摘要

氮化鎵垂直共振腔發光元件(RCLED)由於磊晶技術上的困難，以致於難以獲得高品質的共振腔。本實驗室具有成長共振腔特性發光元件之技術，並進行元件光特性實驗及製程之研究。

本論文主要研究氮化鎵面射型發光元件之光激發特性及製程相關技術，第一部份將進行光激發特性實驗之研究，第二部份將實際製作 RCLED 並討論其特性，RCLED 元件設計為採用  $3\lambda$  微共振腔長，此設計能兼顧元件特性與製程之需求。元件結構上為採用目前最有機會成功製造藍光面射型發光元件的內部共振腔(Intra-cavity)形式的結構：下層 DBR 反射鏡採用氮化鋁(AlN)與氮化鎵(GaN)材料來成長，由於這兩材料的折射率差異較大，所以可以較少的磊晶層數，便可以達到高的反射率；上層介電質 DBR 採用二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)與二氧化鈦(TiO<sub>2</sub>)材料，這兩種材料由於蒸鍍技術成熟且可用在藍光波段，所以較易達到高反射率的目標。

在第一部份中，我們藉由光激發觀察到本實驗已可以將 DBR 的 dip 設計在 MQW 的發光波長上，計算出共振腔的品質因素 Q 為 113，output power 增加 1.6 倍。

在第二部份元件製程方面，由於採用內部微共振腔結構，所以在蝕刻深度的控制及電流侷限的設計上，都較一般發光元件困難。電激發面射型發光元件，其電激發波長位於 420 nm、半高寬為 4.3 nm。由實驗結果可知其發光波長已受到共振腔中光模態的限制。

# LIGHT CHARACTERISTIC AND FABRICATION OF GaN LIGHT EMITTING DEVICES

Student : Yong-long Hsieh

Advisor : Dr. Shing-Chung Wang

Dr. Hao-chung Kuo

Institute of Electro-Optical Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

GaN Vertical cavity light emitting diode (VCLED) acknowledged basic difficulty is in in-situ epitaxial growth technology to form high quality resonant cavity. Thanks to have the technology to grow light emitting device with resonant cavity characteristics so that we can study the exam for optical characteristics of the device and fabrication process of VCSEL-like device so as to accumulate the experience in GaN VCLED.

Fabrication process and technology of GaN surface light emitting devices and optical pumping were studied in this thesis. In the first section, exam for optical pumping will be done; in the second section, using real structure to make VCLED. A  $3\lambda$  micro-cavity structure adopted by above device design was considered both in devices characteristics and process needed. In the device structure, chosen the best one to achieve GaN VCSEL : intra- cavity structure with top dielectric DBR and bottom epi growth DBR. Device bottom DBR adopted AlN/GaN materials which can also reach high reflectivity under fewer DBR pairs due to higher index different between AlN and GaN. Device top DBR adopted SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> dielectric materials which already have good coating technology around 410 nm wavelength to reach high reflectivity more easily.

In the first section, by the exam of optical pumping , we observed the dip of DBR could be designed for VCSEL's EL wavelength, the quality factor "Q" is 113, and the status of power increasing was discovered.

In the second section for fabrication process of device, due to intra-cavity and micro-cavity, the fabrication process was more difficult than conventional light emitting device. The control of precise etching depth and the confined of current injection were needed. The EL wavelength of the GaN-based surface light emitting device was located at 420 nm with FWHM 4.3 nm. By increasing the injected current density, the EL wavelength has slightly red shift effect due to resonant cavity F-P dip.



## 誌 謝

兩年的碩士研究生涯，對於III-V材料與元件製程的知識從無到有，雖然辛苦但是心中仍有無限的感謝，首先要感謝指導老師王興宗教授對我的教導，讓我學習到做學問應有的態度與精神，接著要感謝郭浩中老師與林佳鋒與余長治等兩位博士後研究員的協助與指導，沒有老師與博士們的建議與指導方向，我的論文無法圓滿完成。

還有實驗室中的博士班的學長姊們，在實驗與課程知識上給予的熱忱指導，如張亞銜學長帶領我跑光激發的實驗在測量與儀器上的幫忙與協助；薛道鴻學長百忙之中仍私下帶我討論和指導，從碩一開始直到畢業論文的完成，蔡睿彥學長假即使日仍辛苦幫忙完成實驗的製程、賴芳儀學姊在機臺上的教導等，才能造就今日順利畢業的我。

感謝這幾年跟我一起努力的同學們，志強、俊毅、妙佳、偉倫與威佑，我們一直是好夥伴，不論是在生活上還是實驗中，在互相勉勵中我們也一路走完研究所兩年的路程。也很感謝學弟你們也在實驗上給予我很多幫助，沒有你們我的實驗不會如此順遂。

最後感謝家人給我的支援與關心，讓我能一一克服求學路程上的顛簸，希望我讓你們能感到一絲毫的驕傲！

謝謝大家!

永龍 於 92年6月17日

交通大學光電所

# 章 節 目 錄

	Page
第一章 序論	8
第二章 原理	16
2-1 Fabry-Perot 共振腔之原理與特性	16
2-1-1 共振腔之工作原理	16
2-1-2 Finesse 與品質因數參數	19
2-2 布拉格反射鏡之原理與特性	20
2-2-1 DBR 之工作原理	20
2-2-2 DBR 之穿透深度	22
2-2-3 DBR 之 Stop Band	23
第三章 VCLED 的光性量測	25
3.1 光激發試片的備製	25
3.1.1 MOCVD 成長 VCLED	25
3.1.2 E-gun 鍍介電質布拉格反射鏡	26
3.2 光激發螢光之量測系統與結果分析	26
3.2.1 光激發螢光之量測系統	26
3.2.2 光激發螢光之量測結果分析	27
3.3 光激發系統的架設與結果分析	27
3.3.1 光激發系統的架設	27
3.3.2 光激發結果分析	29
3.4 光激發下比較有無 DBR 的影響	30

第四章 面射型元件之分析與製程	31
4.1 面射型元件之製程	31
4.1.1 元件結構設計	31
4.1.2 樣品的事先準備	32
4.1.3 第一道製程程式	33
4.1.4 第二道製程程式	34
4.1.5 第三道製程程式	34
4.1.6 第四道製程程式	35
4.1.7 第五道製程程式	35
4.1.8 第六道製程程式	35
4.1.9 第七道製程程式	35
4.2 VCLED 電壓電流和光性系統量測	37
4.2.1 元件電壓電流測量系統簡介	37
4.2.2 元件電壓電流測量系統與結果分析	37
4.2.3 電激發螢光光譜之結果與分析	38
第五章 結論與展望	39
參考文獻	57

# 第一章 緒論

半導體發光元件發展已經有四十多年的歷史，由於其具有高耐震、壽命長、耗電量少、效率高、發熱少等優點，所以其應用範圍可遍及生活中的各項用品。除了充當一般的指示燈外，爲了實現全彩顯示器，光的三元色：紅色、綠色與藍色發光元件必須要能達到高亮度、高效率而且能大量生產，如此半導體材料的全彩顯示器才有可能被廣泛使用。其中高亮度、高效率的紅色發光元件可以藉由砷化鎵(GaAs)材料來達成。然而藍、綠光的發光元件還無法達到預期的目標，目前市面上的價格依然過高，而且效率與亮度方面，也還無法與砷化鎵材料的紅光發光元件來相比。

可實現藍光的發光元件的材料有氮化矽(SiC)、砷化鋅(ZnSe)與氮化鎵(GaN)，因爲 SiC 材料在半導體中爲間接能隙(Indirect Band-gap)，所以其發光效率不高。ZnSe 材料雖然與 GaN 同爲直接能隙(Direct Band-gap)的材料，然而 ZnSe 材料做成的元件大多成長於低溫的 300°C 下，當元件操作時因爲熱效應，使得元件的溫度趨近於成長溫度，這會影響了元件中材料的穩定性，造成元件的壽命不長。GaN 材料具有良好的光電特性，如高的電子飽和速度、高的熱傳導性與可做異質接面的結構等優點，因此自 1993 年 III-Nitrides 發光二極體被實現以來，GaN 材料的進展便十分迅速。

早期氮化鎵的瓶頸在於缺乏晶格常數(Lattice Constant)相匹配的基板(Substrate)可供磊晶，還有 P 型雜質無法有效地摻雜到 GaN 中，導致 P 型的 GaN 難以達成，所以進度遲緩。在 1983 年 S.Yoshida 發現利用 Sapphire 來成長 GaN 結晶其結果較好。之後 I.Akasaki 利用 Sapphire 上以約 600°C 的低溫，先成長一層薄的氮化鋁(AlN)當作緩衝層(Buffer Layer)，再成長 GaN 可以得到鏡面的品質。1991 年 S.Nakamura 改用非晶(amorphous)的 GaN 來當緩衝層，再成長 GaN 同樣可以得到鏡面般平坦的薄膜。至於 P 型的 GaN 進展部分，因爲氮空缺(Nitride Vacancy)的關係，使得材料本身呈現自然的 N 型，雖然 P 型雜質有鎂(Mg)、鉍



(Be)、鋅(Zn)、鎘(Cd)等元素可供選擇，然而這些雜質均無法有效地在 GaN 中活化，在 1989 年 S.Nakamura 發現在 700°C 下熱退火的方式，可以有效地打斷氫化鎂(Mg-H)中的化學鍵，使得 Mg 可以被活化，達到 P 型 GaN 的目的<sup>1</sup>。而關於藍光雷射的發展，則是在 1995 年 S.Nakamura 提出 InGaN 量子井(Quantum Well)的 LED，效能比雙異質接面的結構來的更好，在 1996 年發表了第一個以 GaN 量子井為結構，能在室溫下操作的邊射型藍光雷射元件(Edge Emitting Laser-EEL)，其操作模式為脈衝(Pulse)震盪，無法達成連續(CW)震盪的主要原因為在臨界電流(Threshold current)下產生雷射的電壓太大，以致於產生大量的熱。經過日亞公司在材料與電極接觸方面的改進，電壓逐漸減少下，在 1996 年，發表了可在室溫下連續震盪的藍光雷射元件，到了 1997 年連續的邊射型藍光雷射壽命已可達到一萬小時。藍光雷射的主要應用目前在於光儲存方面，由於單一光碟片中可儲存的資料量是依據其雷射光束在光碟塗料上所燒出的資料點，其大小在整個光碟塗料可容納的密度所決定的，藍光雷射由於其波長短，使得資料點相對的可以縮小，所以可以提升單一光碟片中的資料儲存量至 15 GBytes，為目前一般 VCD 格式 680 MBytes 的 22 倍，而為 DVD 格式 4.5 GBytes 的 3 倍左右。

III-Nitride 材料的邊射型雷射的結構是共振腔為水平方向，其長度約為數十  $\mu\text{m}$ ，雷射光由元件的側邊出光，然而邊射型雷射元件在製作上有幾項缺點，第一是 EEL 的元件結構共振腔長，在 GaN 磊晶上欠缺晶格常數(Lattice Constant)相匹配的基板下，存在有大量的晶格缺陷(defects)，因此當光在 EEL 內部共振腔來回震盪時其損耗過高，造成效能上提升不易。第二點是 EEL 的反射鏡製作問題，因為 III-Nitride 材料與 Sapphire 的劈裂面(Cleave Facet)有著 13°的差異，在角度不一致的情況之下，反射鏡的結構部分必須以蝕刻的方式獲得，而且若是蝕刻後不加以鍍膜，因為 III-Nitride 折射率為 2.2~2.7 之間，所以跟空氣自然產生的反射率約只有 20% 反射率過低，這使得 EEL 的反射鏡都必須以鍍膜的方式來提高反射率，而且因為要鍍在元件的邊緣，所以必須先將磊晶好的晶圓做切割，成為一個個獨立的元件，再將一個個的元件疊好附著在一起後送去鍍膜，也增加了

製程上的複雜度與成本。第三點為元件的測試方面，往往要到晶圓切割好且元件鍍完反射鏡後，才能做元件的測試，無法直接在晶圓上做元件測試。

垂直共振腔面射型雷射(Vertical Cavity Surface Emitting Laser-VCSEL) 與結構是垂直於晶圓表面的，1977 年由日本的 K.Iga 教授<sup>2</sup>所提出，其元件擁有 EEL 所缺乏或更多的優點，優點為：反射鏡是經由磊晶完成，不需要考慮劈裂面的問題；典型的垂直共振腔長約為數百 nm(一個波長)，共振腔與長晶方向平行，因此雷射結構可以在沒有晶格缺陷的位置生長，提高了元件的使用壽命；也改進了 EEL 因共振腔過長，以致於存在許多模態，造成光纖傳輸問題，VCSEL 經設計後可以達到單模態的光輸出；VCSEL 出光光束為圓形光束且發散角小，相較於 EEL 的橢圓形光束且發散角大，VCSEL 能與光纖有更好的耦合率，在光儲存應用上相較於 EEL，使用 VCSEL 也可以獲得更大的資料儲存量；元件製成完後可以在晶圓表面上直接測量不需切割，可節省成本；元件體積小，在相同大小的晶圓上可以製作更多的元件，降低成本；易做成一維或二維的雷射陣列，用於串接與並列式光纖，在應用上更廣且更佳；臨界電壓小約為幾 mA，元件操作時電流較小所以熱效應影響元件特性小，且適用於高頻操作。因為有這麼多優點，所以在藍光邊射型雷射已經被日亞公司成功量產的狀況之下，世界各地的研究團隊無不朝向藍光 VCSEL 研究發展中。

VCSEL 擁有以上許多優點，但是也相對的有其困難需要克服，最困難的部分就是形成共振腔的上層與下層反射鏡需要極高的反射率，因為 VCSEL 中主動層很薄，所以增益的路徑短，使得共振反射鏡的品質要求極高，需要達到 99 % 以上。在以 III-Nitride 為材料的元件製作中，目前反射鏡有兩類方式，第一類是直接採用金屬來當反射鏡，但是以金屬當反射鏡在藍光波長範圍的反射率無法達到 95% 以上，因此要製作 VCSEL 金屬反射鏡是無法使用的。第二類就是所謂的布拉格反射鏡(Bragg Reflection Mirror-DBR)，其原理是利用兩種折射率不同的材料，形成高、低折射率相間且厚度為四分之一波長的薄膜，詳細的原理將會在後面章節中提到。DBR 結構以材料上來說又分為兩種，一種為介電質材料，如二

氧化矽( $\text{SiO}_2$ )、二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )、二氧化鈺( $\text{HfO}_2$ )材料等，介電質因為是利用蒸鍍的方式來成長，所以很容易便可以找到兩種折射率差異大的材料來使用，但是介電質的反射鏡在製程上有其困難，將會在下一段落提及。第二種是直接採用利用折射率不同的兩種半導體化合物，以磊晶形成，也就是，然而磊晶時最重要是材料的晶格常數必須相近才有可能成長，晶格常數差異大即便會使得磊晶時產生裂痕(Crack)導致失敗，再者為兩種高、低折射率的差異值越大越好，才能以較少的層數達到高反射率的結果。藍光的垂直共振腔面射型雷射，到目前為止卻還沒有一個研究團隊有發表研發成功，世界各國中研究氮化鎵材料的研究團隊，也朝著藍光垂直共振腔面射型雷射的目標努力中，期刊論文中有發表結果的知名的研究團隊有美國 Brown 大學<sup>3,4,5,6</sup>、日本 Nagoya 理工學院<sup>7</sup>與 Tokyo 大學<sup>8</sup>、西班牙 Ciudad 大學<sup>9,10,11,12,13</sup>、愛爾蘭的 Trinity 大學<sup>14</sup>與 NMRC<sup>15,16</sup>、法國的 Sophia Antipolis 大學<sup>17</sup>與德國的 Hannover 大學<sup>18</sup>等，除了德國的文章中提及以電子束成功激發出雷射(激發性輻射)外，其餘因為未達雷射狀態，所以稱之為面射型發光元件(Surface Light Emitting Device)或是共振腔發光二極體 (Resonant Cavity Light Emitting Diodes-RCLED)。510 nm 綠光面射型發光元件可以運用在短距離的塑膠光纖(Plastic Optical Fiber-POF)傳輸中，而藍光的面射型發光元件目前尚未有明顯的用途，但是因為若是想要成功地製造出藍光垂直共振腔面射型雷射，面射型發光元件是必經的過程。

在 Nitride-based 的面射型元件的結構上可分為四類：

#### I. 以金屬反射鏡搭配半導體布拉格反射鏡之結構：

以金屬反射鏡搭配半導體布拉格反射鏡的面射型發光元件結構，如下圖 1a 所示。以金屬來當反射鏡，在短波長還會有嚴重的吸收問題，所以反射率並不高(<90%)。目前採用此結構的研究，都是直接以元件電極的金屬，直接來充當上層的反射鏡，而元件的下層反射鏡就以磊晶時直接成長，如此成本較為便宜且製成簡單，因為上層的金屬不透光，所以元件一定是向下出光，未避免基板的粗糙度

影響了出光的特性，多會將底部的基板再經過研磨刨亮的動作。

對於短距離傳輸用途的塑膠光纖，其損耗最低(~70dB/km)的波段在 510nm 與 570nm，以金屬當反射鏡的面射型發光元件，便可以發揮其作用。但這類型元件的缺點在於受限於金屬反射鏡的反射率，下層反射鏡的反射率更要小於金屬的反射率，所以元件共振腔的共振品質(Quality Factor)並不是很好，其出光特性受共振效應而增強的結果並沒有十分突出<sup>5,9-17</sup>，所以這類型的結構難以達到製作藍光垂直共振腔面射型雷射的目標。

## II.全以介電質布拉格反射鏡之結構：

全以介電質為材料形成布拉格反射鏡的面射型發光元件結構，如下圖 1b 所示。以介電質材料的布拉格反射鏡，因為材料的選擇性廣，所以容易找到折射率(Index)差異大的兩種材料來形成布拉格反射鏡，如此可以用較少的層數，就可以達到高反射率的結果，而且在短波長的應用中，二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)、二氧化鈦(TiO<sub>2</sub>)、二氧化鈺(HfO<sub>2</sub>)等材料在短波長範圍的吸收係數也不算大，以上兩種條件的搭配下，才能達到~ 99 %高反射率的結果。因為若是材料本身的吸收係數大，則不管如何去增加布拉格反射鏡的層數，都無法達到非常高的反射率結果，所以就無法應用於製作面射型發光元件或是垂直共振腔面射型雷射上。欲使用上下兩層皆介電質的布拉格反射鏡的方式需要兩種技術，1.附著(Bonding)的技術 2.雷射剝離(Laser Lift-Off)的技術。<sup>3,4</sup>

這樣的元件遇到的挑戰有五點，第一點就是將元件之量子井為氮化鎵銻(InGaN)與氮化鎵(GaN)形成的薄膜結構，藉由脈衝雷射(Pulsed Excimer Laser)將元件與基板接處部分的氮化鎵緩衝層(buffer layer)在瞬間加熱達到 1000°C 左右的高溫，以融溶在 Sapphire 與 GaN 接面處的 GaN 薄膜，達到雷射剝離的技術。由於到目前為止大面積的雷射剝離技術尚未完全成熟，所以這樣的元件還未能達到量產化。第二點是欲將薄膜附著於銅或矽基板上，以方便做雷射剝離，這附著的技術必須小心加熱的溫度太高可能會傷害到元件本身或是鍍好的介電質布拉格反射鏡，導致製程上的失敗，或是附著不好，使得薄膜在後來的製程之中有脫落

或是介面處有很多缺陷，影響了元件的特性。第三點是剝離後的薄膜表面平整度要好，雖然對於面射型發光元件來說，其表面粗糙度只會稍稍影響其出光的損耗。但是對於要做垂直共振腔面射型雷射元件來說，其平均表面粗糙度必須小於  $2 \sim 3 \text{ nm/cm}^2$  以下，方能符合雷射元件的要求。而第四是元件結構設計，元件結構若是設計的太薄，很容易就會在剝離的過程中碎裂，所以如此一來就必須增加元件的厚度，也就是增加了共振腔的腔長；但相對的元件共振腔腔長變長了，元件的可共振的模態會相對地靠近，也就是說難以達到單模態的共振輸出，使得元件的結果變差。第五點是介電質反射鏡的必須避開元件的電極部分，所以必須採用蝕刻或是剝離的技術，蝕刻的技術上因為材料不同，其被蝕刻速率也會不同，造成元件圖形無法掌控；剝離的技術上，如何可以獲得良好的剝離條件，也是必須克服的困難。最後為介電質之導熱性較差，使得元件的散熱性欠佳，元件操作時受溫度影響很大，所以即使是能成功製造出藍光垂直共振腔面射型發光元件，這樣的結構在高溫下操作特性也必定欠佳。

### III. 半導體布拉格反射鏡搭配介電質布拉格反射鏡之結構：

半導體布拉格反射鏡搭配介電質布拉格反射鏡的面射型發光元件結構，如下圖 1c 所示。這種結構的元件是目前最有希望達到藍光垂直共振腔面射型雷射的結構，然而這樣的結構仍然有些困難需要克服，像是在長晶機台中成長氮化鎵材料之布拉格反射鏡，所遇到的最大困難在於難以找到晶格常數較為匹配，且其折射率差異又較大的材料，目前最常採用的材料為氮化鎵鋁(AlGaIn)與氮化鎵(GaN)搭配，然而由於 AlGaIn 與 GaN 兩種材料之間的折射率差異值不大，使得以這兩種材料成長的 DBR 至少需要 50 對，也就是 100 層以上，才能達到 99% 的高反射率。而且在成長 DBR 時，兩種材料之間存在有因晶格常數不匹配所引起的應力，這應力必須適當地釋放，否則累積到一定量時會以破裂(Crack)的方式來釋放應力，這將導致薄膜的破裂，影響了整個樣品的完美<sup>5·6·18</sup>。

目前有研究團隊提出利用氮化鋁(AlN)材料作為應力釋放的機制，其方式為在成長布拉格反射鏡中每成長約 20 層，就插入一層 AlN 薄膜，這樣可以適當地

釋放應力，完成 100 層以上的複雜布拉格反射鏡磊晶程式，再之後才是成長 n 型氮化鎵層、主動層、p 型氮化鎵層。然而直接在長晶機台中成長布拉格反射鏡還有另一個要考慮的問題，因為折射率差異小，所以成長後其反射率的高反射區 (Stop Band) 相對的也很小，約為 10~20 nm。所以要形成有意義的共振腔，必須要磊晶出發光波長與布拉格反射鏡的高反射區相符合的量子井，也就是說量子井的能隙大小所發光波長必需精確控制，只要  $\text{In}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$  中 In 含量有稍微差異，發光波長便會有很大的改變；還有必須考慮到磊晶過程中產生的應力，也會產生壓電效應改變了電子在量子井中能帶躍遷的發光波長，所以活化層中應力考量也是磊晶時困難的部分。這種類型的元件其優點為：相較於上下均為介電質材料的元件來說，不需要雷射剝離技術，只要能控制好磊晶條件，下層布拉格反射鏡材料與材料的介面處品質較佳，也可以大面積製作元件，缺點為：尚須要拿出磊晶機台中再鍍膜介電質材料的上層布拉格反射鏡，無法一次完成。而且上層介電質不可導電，元件電流的注入必須避開介電質的部分，使得製程上必須考量而步驟繁雜，不穩定的變數增加。

#### IV. 全部以半導體布拉格反射鏡之結構：

因為磊晶技術上材料應力釋放問題還是目前最大的困難點，所以目前這類型的結構在研究領域上，只有德國的 Hannover 大學發表過全部經由磊晶機台磊晶而成的元件，然而因為布拉格反射鏡在導電性上有不良的問題，所以該團隊是利用電子束來激發元件，尚無法以電流灌入的方式達成。而且該元件是否會因材料間應力過大，產生裂痕影響了元件的品質，都是需要考慮的問題。以分子束磊晶機台(MBE)或是有機金屬化學氣相沈積機台(MOCVD)來說，光是要磊晶成功一個上層或是下層布拉格反射鏡就要花上許多時間，更何況是上下層均需採用布拉格反射鏡的元件，磊晶的耗時尤其以分子束磊晶機台更為嚴重，即使在技術上能成功地達成元件的製作，然而單以耗時的因素來說，也難以達到量產化<sup>18, 19</sup>。

除了利用注入電流的方式發光之外，我們還可以利用 photopumping 的方式來產生電子電洞對進而發光。在這篇論文的第一部份將使用 Photopumping 的方

法進行實驗，Photopumping 對於激發半導體雷射材料是一個獨特又方便的方法，要達到 Photopumping 有許多種方法：(1) 利用燈光照射一 junction 雷射 [37]；(2) 利用氣體雷射激發 [38]；(3) 利用固態雷射激發 [39]等方法，一般通常是利用高能量的雷射來達到 Photopumping 的目的。

本研究採取上面敘述中的第三種結構：以半導體布拉格反射鏡搭配介電質布拉格反射鏡的面射型發光元件為方向，也因為這是目前欲成功製作藍光 VCSEL 元件最可行的結構。雖然目前反射鏡之反射率未能達到 99%以上，因此不足以達到 VCSEL 元件的基本條件，但期望能在本研究中建立起氮化鎵垂直共振腔面射型雷射元件製程與經驗，之後能對於垂直共振腔面射型雷射元件的發展有所貢獻。

本論文中的第二章-原理，包含了 1. Fabry-Perot 共振腔之原理與特性 2. 布拉格反射鏡之原理與特性。第三章-VCLED 的光性量測和特性，其中包含 1. 試片的製作 2. PL 系統的架設和 PL 光譜圖 3. 光激發系統的架設和光激發 VCLED 後的激發性光譜 4. 光激發下比較有無 DBR 的影響。第四章-面射型元件之分析與製程，其中包含 1. 面射型元件之製程 2. VCLED 電壓電流和光性系統量測。第五章-結論與展望。

## 第二章 原理

本章中將會詳細介紹共振腔的特性與原理，還有用以表示共振腔品質的參數，接著介紹布拉格反射鏡(Distributed Bragg Reflector-DBR)的工作原理與常用的參數。

### 2-1 Fabry-Perot 共振腔的原理與特性

#### 2-1-1 共振腔之工作原理

共振腔的特性最早是由 Fabry 與 Perot 兩位學者所研究，所以稱之為 Fabry-Perot 共振腔或簡稱為 FP 共振腔。最簡單形式的光學共振腔即是由兩面平行的反射鏡所構成，當光在一共振腔中來回震盪，會有建設性干涉(Construction interference)與破壞性干涉(Destruction interference)兩種效應，如圖 2-1a 所示。當兩面鏡子(非為 DBR 結構)邊界處均為節點位置時，可形成駐波，即是建設性干涉，稱之為允許存在的光學模態(Allowed optical mode)或是穩定的光學模態(Stable optical mode)；若是不滿足這條件則成為破壞性的干涉，稱之為不允許存在的光學模態(Disallowed optical mode)或是衰減的光學模態(Attenuated optical mode)。

如下圖 2-1b 所示，存在由兩面平行反射鏡 M1、M2 所構成的共振腔，共振腔腔長為  $L_c$ ，且反射鏡 M1、M2 對於電場的反射係數各為  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$



2, 在共振腔外部存在有一個激發光源, 光源強度為  $I_i$ 、電場強度為  $E_i$ , 當光經由穿透進入共振腔後, 其光強度為  $I_0$ 、電場強度為  $E_0$ 。光在共振腔中震盪傳播時, 電場的相位的變化可用  $e^{(-jkL)}$  表示之, 其中  $k = \frac{2n\pi}{\lambda}$  為波數,  $n$  為共振腔內介質的折射率、 $\lambda$  為光在介質中的波長、 $L$  為光傳播的距離。當光完整來回共振腔一次所行走的距離為  $2Lc$ , 欲形成建設性干涉, 則必須滿足  $2k \times Lc = m \times 2\pi$ , 其中  $m$  為整數。將  $k = \frac{2n\pi}{\lambda}$  帶入上式, 可得共振腔的腔長必須滿足  $Lc = m \times \frac{\lambda}{2n}$ , 才能形成建設性的干涉; 相反地來說, 當存在一固定腔長的共振腔中, 只有滿足  $\lambda = \frac{2n \times Lc}{m}$  條件的波長, 才能在共振腔中形成共振。



考慮光在共振腔中來回震盪的情況, 當電場強度  $E_0$  的行進光, 行進到在 M1 反射鏡的邊界處尚未經過反射前, 電場強度為

$E_0 = E_0 \times e^{-jkLc}$ , 而剛經 M1 鏡子反射時, 反射光電場強度變為

$E_0^- = E_0 \Gamma_1 \times e^{-jkLc}$  並向左傳播, 再傳播至 M2 邊界處, 此時的電場強度為

$E_0^- = E_0 \Gamma_1 \times e^{-jk2Lc}$ , 剛經過 M2 反射的電場強度變為  $E_1^+ = E_0 \Gamma_1 \Gamma_2 \times e^{-jk2Lc}$  並

向右傳播, 令  $\theta = kLc = \frac{2n\pi}{\lambda} Lc$  帶入, 則所有經過共振腔來回反射之後,

在 M1 邊界處未經過反射的總電場強度為:

$$E_T^+ = \sum E_N^+ = E_0 \times e^{-j\theta} \{1 + \Gamma_1 \Gamma_2 \times e^{-j2\theta} + (\Gamma_1 \Gamma_2 \times e^{-j2\theta})^2 + \dots\}$$

$$= E_0 \times e^{-j\theta} \left[ \frac{1}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 \times e^{-j2\theta}} \right]$$

同理在 M2 邊界處未經過反射前的總電場強度為：

$$E_T^- = \sum E_N^- = \Gamma_1 \times e^{-j\theta} E_T^+ = E_0 \left[ \frac{\Gamma_1 \times e^{-j2\theta}}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 \times e^{-j2\theta}} \right]$$

光強度 I 與電場強度 E 的關係為  $I = \frac{E \cdot E^*}{2\eta}$ ，其中  $\eta$  為介電質係數，所

以在 M1 邊界處未經過反射的總光強度為：

$$\begin{aligned} I^+ &= \frac{|E_T^+|^2}{2\eta} = \frac{|E_0|^2}{2\eta} \left\{ \frac{1}{1 - \Gamma_1 \Gamma_2 \times e^{j2\theta} - (\Gamma_1 \Gamma_2 \times e^{-j2\theta}) + |\Gamma_1 \Gamma_2|^2} \right\} \\ &= I_0 \frac{1}{1 - 2|\Gamma_1 \Gamma_2|^2 \cos\theta + |\Gamma_1 \Gamma_2|^2} = I_0 \frac{1}{1 - 2|\Gamma_1 \Gamma_2|^2 [1 - 2\sin^2\theta] + |\Gamma_1 \Gamma_2|^2} \end{aligned}$$

假設電場的反射係數均為實數，則對於光強度的反射率  $R_{1,2} = |\Gamma_{1,2}|^2$ ，

將其帶入上式可得：
$$I^+ = \frac{E_0^2}{2\eta} \left\{ \frac{1}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2\theta} \right\}$$

對於處在共振腔 M1 外部的觀察者而言，觀察到的光即為光強總和  $I^+$

乘上 M1 的穿透率  $T_1 = 1 - R_1$ ，所以穿透的光強  $I_{tran} = T_1 \times I^+ = (1 - R_1) I^+$ ，

而共振腔外部激發光源的光強度為原先行進波  $I_0$  的  $1/T_2$  倍，

$$I_i = I_0 \times \frac{1}{T_2} = \frac{E_0^2}{2\eta} \times \frac{1}{1 - R_2}，所以穿透共振腔的穿透率$$

$$T(\theta) = \frac{I_{tran}}{I_i} = \left\{ \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2\theta} \right\}$$

當滿足共振腔的共振條件  $Lc = m \times \frac{\lambda}{2n}$  時，即  $\theta$  為  $0、\pi、2\pi \dots$  時，可

得到最大的穿透率為 
$$T_{Max} = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{(1 + \sqrt{R_1 R_2})^2} \quad 20$$

由上圖 2-1c 可以看出，當一個兩邊反射率相同的對稱共振腔，

其反射率越高，所得到的穿透率圖形半高寬越窄，也就是在共振腔外部所觀察到的光譜圖中，所得的半高寬越窄。若是兩邊反射率不相同的共振腔，滿足共振條件下的最大穿透率就無法到達 100%。當這兩面反射鏡之間的距離  $L_c$ ，與共振腔中光的波長  $\lambda$  長度相去不遠的狀況下 ( $L_c \sim \lambda$ )，稱之為微共振腔 (Micro-Cavity)，微共振腔中可透射出外部的波峰與波峰，因為腔長甚小所以相距甚遠，當應用於發光元件或是 VCSEL 中，造成光激發螢光的分佈與可穿透模態 (光模態) 相乘後產生單模輸出的效果，如圖 2-1d 所示。

### 2-1-2 Finesse 與品質因數參數

我們定義一個共振腔 Finesse 參數，其定義為由共振腔中穿透出來光的波長其波峰與另一個波峰之間的距離，除以其半高寬的比值

$$F = \frac{\text{Peak separation}}{\text{Peak width}} = \frac{\pi(R_1 R_2)^{1/4}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}}$$

當  $R_1$ 、 $R_2$  的值均趨近於 1 的狀況下，可以將  $(R_1 R_2)^{1/4}$  近似於 1 帶入，所以可得到  $F = \frac{\pi}{1 - \sqrt{R_1 R_2}}$ 。另一個更有物理意義的參數為共振腔的品質

因數  $Q$  (Quality factor) 來代表共振腔的品質高低，其定義為共振腔中穿透出來光的頻率除以其半高寬的比值。

$$Q = \frac{\text{Peak frequency}}{\text{Peak width}} = \frac{2nL_c}{\lambda} \times \frac{\pi(R_1 R_2)^{1/4}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}} = \frac{2nL_c}{\lambda} \times F$$

從物理的含意來說明，品質因數即是共振腔內儲存的總能量除以每一次損耗的能量比，所以品質因數越高表示共振腔的共振效果越好，也代表共振腔內可以儲存的能量越高。

## 2-2 布拉格反射鏡之原理與特性

### 2-2-1 DBR 之工作原理

布拉格反射鏡(Distributed Bragg Reflector-DBR)是藉由高低折射率交替且厚度為四分之一波長的薄膜，所排列形成的多層膜結構，如圖 2-2a 所示。

在選定薄膜材料時所必須考慮的兩種因素分別為：材料的透光波長區域與折射率的差異。其工作原理可先由光由空氣中，正向入射一個雙層的介質說明，假設入射介質的折射率分別為  $n_1$  與  $n_2$ ，經過介質介面反射後的電場總和，如下關係式：

$$\Gamma_1 = \frac{r_1 + r_0 e^{-j\Phi}}{1 + r_1 r_0 e^{-j\Phi}}$$

其中  $\Gamma_1$ ：為兩介面反射電的總和

$r_1$ 、 $r_0$ ：為由左方看兩介面的反射率

$\Phi$ ：為光在介質 1 中，來回傳輸(共兩倍介質 1 厚度)下所造成的相位偏移量

上式可與三角函數中  $\tanh(A+B) = \frac{\tanh A + \tanh B}{1 + \tanh A \tanh B}$  相比較。

若推廣到在入射介質與出射介質中，如圖 2-2a 般有 N-1 層介質薄膜，即是有 N 個介面存在，當光由一個低折射率的介質碰到高折射率介質的介面反射時，其相位會偏移 180° 可設  $r_0 = -|r_0|$ 、 $r_1 = |r_1|$  依此類推得且令  $r_i = \tanh(s_i)$ ，當介質每一層的厚度都剛好為波長的四分之一時，可得  $\Phi$  等於  $\pi$ ，對於電場來說反射波方向相反，必須加一個負號表示可知  $e^{-j\Phi} = -1$ ，則可得：

$$\Gamma_1 = \frac{|r_1| + |r_0|}{1 + |r_1||r_0|} = \frac{\tanh(s_1) + \tanh(s_0)}{1 + \tanh(s_1)\tanh(s_0)} = \tanh(s_1 + s_0)$$

$$\Gamma_2 = \frac{|r_2| + \Gamma_1}{1 + |r_2|\Gamma_1} = -\tanh(s_2 + s_1 + s_0)$$

經過 N 個介面後的總反射電場為

$$\Gamma_N = (-1)^{N+1} \tanh\left(\sum_{i=0}^N s_i\right)$$

且介面反射率  $|r_i| = \frac{n_{Hi} - n_{Li}}{n_{Hi} + n_{Li}} = \frac{1 - n_{Li}/n_{Hi}}{1 + n_{Li}/n_{Hi}} = \tanh(s_i)$

其中  $n_{Hi}$ 、 $n_{Li}$  分別代表高折射率與低折射率介質的折射率值

所以可得  $s_i = -\frac{1}{2} \log\left(\frac{n_{Li}}{n_{Hi}}\right)$  代回上式

$$\Gamma_N = \frac{1 - \prod_{i=0}^N \frac{n_{Li}}{n_{Hi}}}{1 + \prod_{i=0}^N \frac{n_{Li}}{n_{Hi}}} \Rightarrow R = |\Gamma_N|^2 = \left( \frac{1 - \prod_{i=0}^N \frac{n_{Li}}{n_{Hi}}}{1 + \prod_{i=0}^N \frac{n_{Li}}{n_{Hi}}} \right)^2$$

由上式我們可以得到當 DBR 層數越多時，其總反射率越趨近於 1；而且兩介質的折射率差異越多，得到高反射率的需要層數就越少，而且在每一層介面的反射光其電場相位是相同的，由干涉原理可知，每一道反射光會形成建設性干涉，其反射光強度與布拉格反射鏡層數的平方成正比，因此總反射率( $I_R/I_0$ )也會增加。

### 2-2-2 DBR 之穿透深度

一般金屬反射鏡的厚度通常與反射率高低沒有關係，光和金屬的作用可視為在金屬介面處。但是光與 DBR 的作用可視為光進入 DBR 中在每一個介面處反射疊加的結果，此現象也同樣由圖 2-2a 所示。DBR 可以假設有一虛構的『金屬面』存在，光在此之後就不存在於 DBR 之中，則由實際的 DBR 表面到此虛構的金屬介面的深度即定義為穿透深度(Penetration Depth)。電場穿透到 DBR 結構中的等效層數

$$m_{eff} \approx \frac{1}{2} \frac{n_H + n_L}{n_H - n_L} \tanh \left( 2m \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right)$$

因此滲透厚度  $L_{pen}$  為

$$L_{pen} = \frac{1}{2} m_{eff} (L_H + L_L)$$

其中  $m$  為 DBR 之層數， $L_H$ 、 $L_L$  為高低折射率介質之厚度<sup>21</sup>

### 2-2-3 DBR 之 Stop Band

DBR 與金屬反射鏡不同於的地方是，金屬反射鏡對於光的反射區域是廣泛的，而 DBR 因為是利用四分之一波長的厚度來形成反射機制，所以對於光的反射區域是有限區域的，DBR 的高反射區域範圍稱之為 Stop Band，其範圍的大小是由形成 DBR 的兩種材料折射率差異所決定的，可利用下面公式表示之：

$$\Delta\lambda_{stop\ band} = \frac{2\lambda_{Bragg}\Delta n}{\pi n_{eff}f}$$

$$n_{eff} = 2\left(\frac{1}{n_H} + \frac{1}{n_L}\right)^{-1}$$



### 第三章 VCLED 的光性量測

本章節分四個段落，第一段先說明製作光激發所使用的 RCLED 樣品的過程和方法並且測量其上下 DBR 的反射率，第二段針對樣品以 PL 系統瞭解其發光波長，第三段將使用 YVO<sub>4</sub> ( $\lambda=355$  nm) 更進一步觀察 Sample 所激發出來的波長，並比較有上 DBR 的 sample 和無上 DBR 的 sample 其光性變化。

在所有雷射中，半導體雷射是體積最小的一個，且是唯一利用直接注入電流的方式發生粒子數反轉而產生受激放射。除了利用注入電流的方式之外，我們還可以利用光子激發 (photopumping) 的方式來產生電子電洞對。光子激發對於激發半導體雷射材料是一個獨特又方便的方法，要達到光子激發有許多種方法：(1) 利用燈光照射一 junction 雷射 [37]；(2) 利用氣體雷射激發 [38]；(3) 利用固態雷射激發 [39] 等方法，一般通常是利用高能量的雷射來達到光子激發的目的。最常用來激發氮化銦鎂多重量子井材料的雷射有：YVO<sub>4</sub> ( $\lambda=355$  nm) Nd<sup>3+</sup>:YAG laser ( $\lambda=355$  nm) [40]、Nitrogen laser ( $\lambda=337.1$  nm) [41-43]。為了要研究半導體雷射的特性而使用高能量的氣體雷射照射材料，會使材料本身發熱，因此材料要相當薄，或是讓材料放在導熱性佳的環境中。



### 3.1 光激發試片的備製

#### 3.1.1 MOCVD 成長 VCLED

我們使用 Emcore 型號 D-75 的 MOCVD 系統，在兩吋的 sapphire 基板上成長 AlN/GaN DBRs，以 TMGa 與 TMAI 當鎵與鋁的有機分子源，以氨氣(NH<sub>3</sub>)當氮的分子源。進行磊晶之前必須先在氨氣環境下，先以高溫進行十分鐘去除氧化層動作，然後在低溫成長 30nm 厚度的氮化鎵緩衝層後，再成長 1 μm 厚的 GaN，至此完成準備成長 DBR 的基本結構。在成長 DBR 時反應腔內完全是處於氮氣的環境下，我們成長了 20 對的氮化鋁(AlN)與氮化鎵(GaN) DBR，N-type GaN，MQW 最後升高溫在 H<sub>2</sub> 的環境下成長 P-type GaN 完成長晶部分。詳細的磊晶條件請參考 H. H. Yao, C. F. Lin 於 2003 年 MRS 會議上之文章” MOCVD Growth of AlN/GaN DBR Structure under Various Ambient Conditions.”。圖 3.1a 為樣品經光學顯微鏡在放大率為 200 倍下所拍攝到的結果，可看到在顯微鏡拍攝的畫面區域中，樣品表面沒有裂痕的存在。

#### 3.1.2 E-gun 鍍介電質布拉格反射鏡

最後鍍上二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)與二氧化鈦(TiO<sub>2</sub>)的介電質布拉格反射鏡，品質好的鍍膜需要在高溫下(~100°C 以上)蒸鍍，蒸鍍上一共 4

對的  $\text{SiO}_2$  與  $\text{TiO}_2$ ，其厚度分別為 69.7 Å 與 42.4 Å，則介電質 DBR 總厚度約為 400 Å。在蒸鍍時放入另一個測試樣品，以測量蒸鍍完後的介電質布拉格反射鏡之反射率。

上層介電質布拉格反射鏡之反射率頻譜，如圖 3.1b 所示。反射率在波長為 458 nm 處之反射率為 98.5%，因為兩介電質材料的折射率差異大，所以所得的其 Stop Band 非常寬，約為 112 nm。這結果也符合了元件上層反射鏡的需要，在量子井的 458nm 發光波長。

下層 AlN/GaN 布拉格反射鏡之反射率頻譜，如圖 3.1c 所示。反射率在波長為 458 nm 處之反射率為 94%，

## 3.2 光激發螢光之量測系統與結果分析

### 3.2.1 光激發螢光之量測系統

首先先介紹我們所使用的光激發螢光系統，如圖 3-2a 所示，所使用的激發光源為 Melles Griot 公司所出產的 74 系列-連續藍光氦鎘雷射(Helium-Cadmium Laser)，其主要波長為 325 nm，無特殊極化方向的多模態雷射，雷射平均輸出功率為 35 mW，雷射光經由三面雷射反射鏡的反射後，以焦距為 5 公分的聚焦透鏡，正向聚焦到樣品上，經聚焦後的光點直徑約為 0.02 mm，樣品表面的功率密度可達  $6.5 \text{ W/cm}^2$ ，樣品被激發出的螢光同樣藉著此聚焦透鏡收光，與光譜儀入

光口前的另一個焦距為 15 公分的聚焦透鏡，形成共焦的光學路徑。

收光所使用的光譜儀的型號為 Jobin Yvon Triax-320 單光儀，內含三種光柵，其每釐米上的條紋密度分別為 1200、1800、300 條每單位釐米，由於條紋密度為 1200 的光柵較適用於藍光的量測範圍，所以在此採用條紋密度 1200 的光柵來量測實驗。為避免雷射被透鏡反射後的反射光直接入射到光譜儀中，我們在光譜儀入光口處放置一濾鏡，將波長為 360 nm 以下的光全部濾除，而光譜儀的出光口處採用電荷耦合元件(Charge Couple Device-CCD)來當光偵測器。

系統中入光口與出光口的狹縫寬度越寬，會使得系統解析度會下降，但是狹縫寬度太窄，則光訊號太弱導致雜訊相對掩蓋了訊號的光譜圖。在實驗中將入光口的狹縫寬度設為 0.1 mm，在此條件之下解析度約可達 1 Å。

### 3.2.2 光激發螢光之量測結果分析

由 PL 的頻譜可以瞭解 sample 的半高寬為 10.5nm，其 Q 值為 33，波長在 458nm，如圖 3.2b。在瞭解了 PL 後，便可以配合上下 DBR 的反射率，加以瞭解我們設計的 DBR dip 是否有在 MQW 的波長之中

## 3.3 光激發系統的架設與結果分析

### 3.3.1 光激發系統的架設

我們選擇  $\text{YVO}_4$  (355nm) 脈衝雷射為激發光源，收光所使用的光譜儀的型號為 Jobin Yvon Triax-320 單光儀，內含三種光柵，其每釐米上的條紋密度分別為 1200、1800、300 條每單位釐米，由於條紋密度為 1200 的光柵較適用於藍光的量測範圍，所以在此採用條紋密度 1200 的光柵來量測實驗。光譜儀的出光口處採用電荷耦合元件 (Charge Couple Device-CCD) 來當光偵測器。

系統中入光口與出光口的狹縫寬度越寬，會使得系統解析度會下降，但是狹縫寬度太窄，則光訊號太弱導致雜訊相對掩蓋了訊號的光譜圖。在實驗中將入光口的狹縫寬度設為 0.1 mm，在此條件之下解析度約可達 1 Å。



考慮到試片為面射型發光元件，可使用正打正收，斜打正收，側打正收，背打正收，正打被收等方法，

1. 正打正收必須考量到收光路徑的問題，必須在試片的前方加裝透鏡，以方便收光，相對的透鏡會使激發光源聚焦而毀壞介電質布拉格反射鏡。
2. 正打背收和背打正收都會有光被緩衝層 GaN 吸收的可能所以在估量注入的光激發能量時會有偏差。
3. 側打正收時必須將激發的能量藉由透鏡聚焦到，聚焦大小為數百個  $\mu\text{m}$  以符合試片側邊的厚度，但無法估算進入 MWQ 的光

激發能量。

在這些前提下我們選擇斜打正收。

考量實驗的過程需要有改變激發能量的機制，需要可調式的衰減片 (ND filter) 控制激發光源到試片的上的強度，能量偵測器 (power detector) 偵測激發光源到試片的上的強度。出此之外 Jobin-Yvon Triax 320 Spectrometer 的入光處需要點光源入射，因此需要有透鏡將試片上的激發光收集聚焦成點光源於是我們的架設如圖 3.3a，使用的過程有考慮到激發光源對介電質布拉格反射鏡會有反射，所以輸入的激發能量需要扣除此一反射。

### 3.3.2 光激發結果分析

一般以 MOCVD 成長發光結構，對 MQW 結構而言在同一個長晶條件下其發光波長會略微不同但差異並不大，為求準確在進行光激發實驗前，需先知道 MQW 的螢光波長 (PL) 在哪，由前一個實驗可知 MQW 的波長在 458nm，接下來便藉由光激發分析 RCLED sample。

以  $\text{YVO}_4$  (355nm) 脈衝雷射作改變激發能量實驗，可以發現和 PL 的波長一樣，由此可知此訊號為 MQW 的訊號，再將 DBR 的反射頻譜加入討論，如圖 3.3b，可以發現本實驗室已經可以將 DBR 的 dip 藉由長晶的技術，符合在 MQW 的發光波長中。在計算 Q 值發現，加上 DBR 後 Q 值增加，此增加直接反映在半高寬上從沒有上 DBR 的 10.5nm

到加上 DBR 後半高寬縮成 4nm。

### 3.4 光激發下比較有無 DBR 的影響

接著要將有上 DBR 和無上 DBR 的 sample 藉由 YVO<sub>4</sub> (355nm) 脈衝雷射的激發瞭解 DBR 是否有正常運作。

將有上 DBR 和無上 DBR 的 sample 放在光激發系統下藉由改變光激發的能量可以發現有上 DBR 的 sample 其輸出能量較無上 DBR 的多，這可以由 Q 值加以說明，Q 值代表的是共振腔的品質所以品質越高發光強度越強，由 sample 的比較可以很明顯發現 Q 值大的其發光強度越強，經計算有上 DBR 比無上 DBR 的 sample 大概增加 1.6 倍，同時發現有上 DPR 的 sample 和無上 DPR 的 sample 都具有在光激發光源產生波長半高寬變窄和強度變強的現象。如圖 3.3C(a)(b) 接下來沒有 DBR 的 Q 值，經過計算發現 Q 值為 33，於是我們瞭解到在加上 DBR 後 Q 值會上升，所以臨界電流會下降，經過實驗發現如圖 3.4b 有上 DBR 的比沒有上 DBR 的臨界電流還低，如此我們的到證明。證明我們成功製造 VCLED，使用 AlN/GaN 下 DBR 和 介電質 DBR，波長在 458nm，元件的 Q 值為 113，同時觀察到 MQW 有激發性放射的現象臨界電流為 1 MW/cm<sup>2</sup> 再加上介電質 DBR 臨界電流會下降到 0.8MW/cm<sup>2</sup>

## 第四章 面射型元件之分析與製程

在本章中，先介紹整個面射型發光元件的製程流程，再介紹元件的量測和分析。

### 4.1 面射型元件之製程<sup>30、31</sup>

#### 4.1.1 元件結構設計

相較於 GaAs 元件可直接由基板導電，所以 n 型電極直接鍍在基板底部即可，如圖 4.1a 所示。然而氮化鎵元件是成長於不導電的 Sapphire 基板上，所以元件的製作與 GaAs 不同，必須以 Intra-Cavity 的結構，如圖 4.1b 所示，Intra-Cavity 的製程必須先蝕刻到元件的 N 型層，再將 N 型電極鍍於所蝕刻的區域，元件的 P 型電極則是鍍於元件出光口的四周，詳細的製程步驟將會於後面章節敘述。

以 VCSEL 來說， $1\lambda$  (一個波長) 的微共振腔結構，能保證其雷射光輸出為單模模態，但是這樣的微共振腔存在著製程上蝕刻深度難以精準掌控的問題；相反地若是共振腔的腔長太長，則會失去 VCSEL 雷射光單模態輸出的優勢，也就是說失去微共振腔的意義。所以我們在此設計中心波長  $\lambda$  為 440 nm，元件微共振腔的腔長為  $3\lambda$ ，在這樣的條件下共振腔中可存在的光模態之間距約為 68.3 nm，這樣的模態間距在 InGaN 量子井的發光增益曲線下，亦可以達到單一模態的輸出。

在製程上預計欲蝕刻到 n 型材料層的深度為  $0.3\ \mu\text{m}$ ，的樣品底部的反射鏡採用在 MOCVD 中直接成長 20 對的 AlN/GaN DBR 結構，元件上層的反射鏡採用以介電質的  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  DBR 結構，之所以採用  $\text{SiO}_2$  與  $\text{TiO}_2$  這兩種材料的理由為：1. 兩種材料的透光波域範圍廣，在 410 nm 的短波長波段其吸收係數也不高。2. 兩者的折射率差異較大，約可達到 0.92，由前述的 DBR 理論中可知，在這樣的折射率差異下，可以在較少的 DBR 層數之下，便可達到高反射率的結果。3. 這兩種材料廣為一般鏡片鍍膜所使用，所以材料特性穩定。

元件的電流侷限是利用電漿增強式化學氣相沈積機台(PECVD)成長 2000 Å 厚度的  $\text{SiO}_2$  隔離層 (passivation)，使得 P 型電極與樣品的接觸只侷限於出光口的四周，會需要到 2000 Å 的厚度，是為了避免因為隔離層在太薄的情況下，在高電流下容易被電流貫穿，導致電流侷限的失敗。元件的 P 型電極金屬為 Ni/Au 各為 300/4000 Å，所以需要鍍到 4000 Å 是為了需要跨過 3000 Å 的  $\text{SiO}_2$  隔離層，以讓電流能流入元件。元件的 N 型電極金屬採用的金屬為 Ti/Al/Ni/Au，其厚度各為 150/2200/300/4000 Å。

#### 4.1.2 樣品的事先準備

在樣品做製程之前必須先經過初步清洗，初步清洗的步驟為：I.



以丙酮(ACE)浸泡並放在超音波震盪器之中震盪五分鐘，以去除表面的污染物。II. 將樣品自 ACE 拿出，以氮氣槍吹乾後，放置到去離子水(DI-water)中沖洗五分鐘。III. 將樣品自 DI-water 拿出，同樣以氮氣槍吹乾後，再浸泡到乙醇(IPA)中並放在超音波震盪器之中震盪五分鐘，藉以去除樣品表面殘餘的 ACE。IV. 再將樣品同樣以氮氣槍吹乾後，放置到 DI-water 中沖洗五分鐘，最後氮氣槍吹乾完成初步清洗的步驟。這裡氮化鎵並不需要像矽晶圓一樣，在初步清洗中使用酸或鹼的溶液來去除氧化層，其原因在於氮化鎵本身材料較為穩定，不容易與空氣中的氧作用，所以可以省略去氧化層的步驟。而且經過 IPA 清洗後還需要再放置到 D-I Water 中沖洗的原因為：雖然 IPA 同時具備可溶有機與親水性，在業界大量生產時通常藉由大量地 IPA 沖洗同時去除 ACE 與樣品表面的殘餘水分子。但是我們實驗中 IPA 清理時並非為大量沖洗，而是放在燒杯中以少量的 IPA 去除 ACE，所以為避免燒杯中少量的 IPA 尚含有 ACE 殘餘，所以最後還需要經過 D-I Water 沖洗。初步清洗完後，未避免樣品表面殘留水分子影響了光阻塗佈後黃光製程的穩定性，需先將樣品放置於 120°C 的加熱臺上，烘烤(Hard bake)十分鐘，將樣品表面殘留的水分子去除乾淨。

#### 4.1.3 第一道製程程式

第一道製程目的要將每個元件的大小定義出來，在光阻顯影出元

件的圖案後，欲以感應耦合電漿蝕刻系統(ICP-RIE)來蝕刻元件，而且鎳金屬阻擋蝕刻的效果比光阻來的好，所以採用鎳金屬來當阻擋層。利用電子蒸鍍機機台(E-gun)將鎳金屬(Nickel)蒸鍍於樣品上，其厚度約為 2000 Å。蒸鍍完的樣品再置於 ACE 中，利用剝離的方式(Lift-off)去除我們不需要的鎳金屬區域。

#### 4.1.4 第二道製程程式

第二道製程我們以 ICP-RIE 來蝕刻樣品到 n 型氮化鎵層。最後再以硝酸( $\text{HNO}_3$ )清洗掉樣品表面的鎳金屬。

#### 4.1.5 第三道製程程式



第三道製程目的是要做出用來侷限電流的二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )介電質隔離層，先將樣品表面全部利用電漿輔助化學氣相沈積 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition - PECVD) 沈積二氧化矽薄膜厚度為 2000 Å。以 BOE 溶液做濕蝕刻(Wet Etching)去二氧化矽。需要做介電質的原因在於：氮化鎵發光元件的 p 型氮化鎵其鎂摻雜濃度不容易提升，所以電流擴散的能力相對的不佳，尤其在較小孔徑的元件出光口。如果不做先介電質隔離層，而使得電流由 p 型電極直接垂直灌入主動層後，所發出的光容易被 p 型自己的電極金屬所阻擋。因此先以二氧化矽成長在樣品表面，且元件中間出光孔徑左右較 p 型

電極大上  $5\mu\text{m}$ ，讓 p 型電極以環形的電極接觸 p 型的氮化鎵表面注入電流。

#### 4.1.6 第四道製程程式

第四道製程目的是在元件的出光口處蒸鍍上薄薄的透明電極，以幫助電流能均勻地注入元件中，採用的金屬為鎳(Nickel)金屬與金(Golden)金屬。以電子蒸鍍機機台蒸鍍鎳(Nickel)金屬與金(Golden)金屬，其厚度各  $50\text{ \AA}$ 。

#### 4.1.7 第五道製程程式

第五道製程目的是要蒸鍍上元件的 n 型電極金屬，以電子蒸鍍機機台蒸鍍鈦(Titanium)金屬與鋁(Aluminum)金屬，其厚度分別為  $150\text{ \AA}$  與  $2200\text{ \AA}$



#### 4.1.8 第六道製程程式

第六道製程目的是蒸鍍上 P 型電極。除了原先 P 型電極的位置之外，之前已經蒸鍍好 Ti/Al  $150/2200\text{ \AA}$  的 N 型電極位置，在此道製程也同樣一起再蒸鍍上鎳(Nickel)金屬與金(Golden)金屬，這樣的製程目的是為了以後需要將元件打線時，兩個電極均有厚的金可以使用，利用光阻顯影出電極的區域後，以電子蒸鍍機機台蒸鍍鎳(Nickel)金屬與金(Golden)金屬，其厚度分別為  $300\text{ \AA}$  與  $4000\text{ \AA}$ 。最後再將

整個樣品以 530°C 氮氣環境下，熱退火 5 分鐘，讓 n 型與 p 型電極的金屬形成合金，降低電阻值。

#### 4.1.9 第七道製程程式

最後第七道製程目的是欲鍍上二氧化矽(SiO<sub>2</sub>)與二氧化鈦(TiO<sub>2</sub>)的介電質布拉格反射鏡蒸鍍上一共 4 對的 SiO<sub>2</sub> 與 TiO<sub>2</sub>，其厚度分別為 69.7 Å 與 42.4 Å，則介電質 DBR 總厚度約為 400 Å，尺寸大小為 40 μm 大小的圓形。上層介電質布拉格反射鏡之反射率頻譜，如圖 4.1c 所示。反射率在波長為 443 nm 處之反射率為 98%，因為兩介電質材料的折射率差異大，所以所得的其 Stop Band 非常寬，約為 112 nm。這結果也符合了元件上層反射鏡的需要，在量子井的 443 nm 發光波長，元件下層反射鏡之反射率約為 94%、上層反射鏡之反射率約為 98.5%，整個面射型發光元件的製程十分成功。製程流程如圖 4.1d。

圖 4.1e(a)為元件完成的示意圖，圖 4.1e(b)為元件在掃描式電子顯微鏡下，倍率為 400 與 4500 中拍攝到的完整元件圖形與元件出光孔區域的圖形，由於上層的 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 介電質布拉格反射鏡厚度很薄，約只有 200 Å，而在出光口的 P 型電極厚度高達 4000 Å，所以由掃描式電子顯微鏡下無法觀察到上層反射鏡的外貌。然而因為 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 反射鏡在光學顯微鏡下可看到不同於元件表面的顏色，可

用來判斷是否有介電質反射鏡的存在。

## 4.2 VCLED 電壓電流和光性系統量測

### 4.2.1 元件電壓電流測量系統簡介

元件的電激發螢光量測系統，如圖 4.2a 所示。使用的數位電源供應器型號為 Keithley 公司出產的 Model-238，提供的電流電壓為連續輸出，與電腦連結後可儀控元件之電壓電流量測。系統的光學顯微鏡也與電腦連結，可做即時影像擷取，使用物鏡倍率為 20 倍，目鏡為 10 倍，除了觀察探針是否正確點於元件的電極上，也可利用紫外光功率偵測器收取樣品電激發的輸出功率，或是經由  $100\ \mu\text{m}$  直徑之光纖將元件之電激發螢光，導入 Jobin Yvon Triax-320 單光儀中，分析其光譜，單光儀使用的光柵與之前光激發螢光相同條文密度同為  $1200\ \text{g}/\text{mm}$ ，入光口狹縫寬度亦為  $0.1\ \text{mm}$ ，解析度可達  $1\ \text{\AA}$ ，再同樣以 CCD 收取光譜。

### 4.2.2 元件電壓電流測量系統與結果分析

量測結果計算可得元件的電阻值約為  $612\ \Omega$  如圖 4.2b，與一般 LED 相比，可以看到較高的起始電壓與串聯電阻值，電阻值如此高的主要原因為 1. 元件電流注入的面積為出光口，其面積約為  $300\ \mu\text{m}^2$  大小，與 LED 元件面積為  $300*300\ \mu\text{m}^2$  相比，高電阻是可以預期的結

果。

2. 元件在經過 ICP-RIE 蝕刻手續 N-type 的厚度為  $0.18\ \mu\text{m}$  這和一般 LED 元件的  $1\ \mu\text{m}$  有 5 倍的差距，高電阻是可以預期的結果。

#### 4.2.3 電激發螢光光譜之結果與分析

分析製作好的元件在有上 DBR 的 sample 和無上 DBR 的 sample 下比較其變化電流，可以發現有 DBR 的 sample 其發光強度較無上 DBR 的 sample 足足多了兩倍如圖 4.2c，這也說明 Q 值越大輸出能量越大。


圖 4.2d 是電激發螢光光譜，圖中可發現波長  $422.1\text{nm}$  為主要的波長。



最後一章-結論與展望，將針對本實驗所獲得的結果作一個條列式的整理與討論，並提出在氮化鎵面射型發光元件的製作上，還依然有些存在的議題需要克服，才能有機會達到氮化鎵垂直共振腔面射型藍光雷射的誕生。

## 第五章 結論與展望

經由以上的研究，我們已經獲得了以下的重要結果：

1. 欲成功達成氮化鎵藍光垂直共振腔面射型雷射或是面射型發光元件，第一個關鍵點是半導體材料之布拉格反射鏡的成長技術。在 AlN/GaN 材料的 DBR 中，除了提高 DBR 的反射率到 99% 以上，已達到 VCSEL 元件的反射鏡需求這項議題外，如何克服兩材料晶格常數差異大，產生之應力造成樣品的裂痕，是元件能成功被製作的基礎。本實驗元件下層的 AlN/GaN 布拉格反射鏡在波長 458 nm 下，反射率可達 94%。
2. 如何設計面射型發光元件的共振腔腔長，同時兼顧製程上的可行性與元件的特性結果，是 VCSEL 能成功的重要議題。目前世界上各團隊的研究結果多主張以  $3\lambda$  的共振腔長來製作元件，而且樣品的腔長成長是必須精確控制，已確保元件共振腔中的光模態與量子井發光波長相符合，元件才能有好的特性。
3. DBR 的高反射區要符合 InGaN 量子井發光波長是第三個重要的議題，本實驗室已從光激發的觀點瞭解，本實驗室已有能力將 DBR 的高反射區符合 InGaN 量子井發光波長。
4. 氮化鎵面射型元件因為 Sapphire 基板無法導電，所以元件必須做

成內部共振腔(Intra-cavity)的形式，在  $3\lambda$  的微共振腔元件中，N 型 GaN 層厚度很薄( $\sim 0.15\ \mu\text{m}$ )的狀況下，如何精確控制蝕刻的深度與蝕刻的均勻度，是元件能否製程成功的重要關卡。

5. 製作成功的面射型發光元件其電激發螢光波長位於 420 nm，且半高寬只有 4.38 nm，實驗所獲得的共振腔品質因數 Q 為 113，元件的電阻值為 612 歐姆，啟動電壓為 3.2 伏，其上 DBR 為 4 pair 的  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  其下為 20 pair 的 AlN/GaN 而個別反射率為 94%和 98%。

最後針對本實驗製作的元件，其電阻值  $612\ \Omega$  過高、電流擴散不夠均勻、電激發螢光的光譜其半高寬為 4.38 nm、共振腔 Q 值 113 都還需要再改進，才有可能往氮化鎵垂直共振腔面射型雷射的成功之路邁進，在此也提出幾點可以改進的方向：

1. 在電阻值改進方面：除了致力於材料中摻雜載子的活化比率，已降低材料的阻抗外，增加 P 型電極與元件的接觸面積亦可以有效降低元件的阻值，然而若是在沒有其他電流侷限的方式之下，元件的能量轉換效率會很低，原因為大部分的出光都被電極給擋住了。若欲以離子佈植的方式來侷限電流，在微共振腔的結構之下，如何精準控制離子佈植的深度，是需要克服的。至於氧化的製程技術，在氮化鎵材料方面目前技術上還尚未成熟。



2. 電流均勻擴散改進方面：如何將電流均勻擴散到元件的出光口中，使元件出光均勻而且又要避免影響到上層的反射率是尚待克服的議題，在這個議題上已經有團隊提出以穿透式接面層(Tunnel junction)的  $p^{++}/n^{++}$  的磊晶形式形式，達成電流均勻擴散的目的，由於 P 型 GaN 之電流傳導性欠佳，且 P 型電極製作後其電阻值也甚大，所以採用此結構除了可以使得電流在  $n^{++}$  層下便可以均勻擴散外，又可以避開 P 型電極採用 N 型電極且減少元件串聯電阻值，然而採用此結構會使得元件的起始電壓增加約 1 V 左右，以供電子克服穿透能障。



3. 在電激發螢光的半高寬與元件共振腔 Q 值改進方面：除了提高元件下層 AlN/GaN DBR 反射率外，由於上層介電質的布拉格反射鏡之反射率可較容易提升，增加介電質鍍膜的對數到 6 或 7 層，便可以提升反射率到約 99%，所以整個元件的出光方向為往 Sapphire 基板面出光，以這樣的結構當然需要對 Sapphire 基板做刨亮的動作，如此便可以在現有的技術之上再提升共振腔的 Q 值。至於元件 P 型氮化鎵層因為鎂的摻雜造成的不平整，則較難以估計其對 Q 值的影響，但是同樣的對於氮化鎵垂直共振腔面射型雷射來說，元件表面與介電質反射鏡之界面的粗糙度，也需要小於  $2 \text{ nm/cm}^2$ ，雷射元件方有可能成功。

在本論文的研究討論與製程上經驗的累積，期望對於氮化鎵藍光垂直共振腔面射型雷射的元件製作上有所貢獻，使得 VCSEL 這樣特性良好的元件能早日問世，並量產化來造福人類的生活。



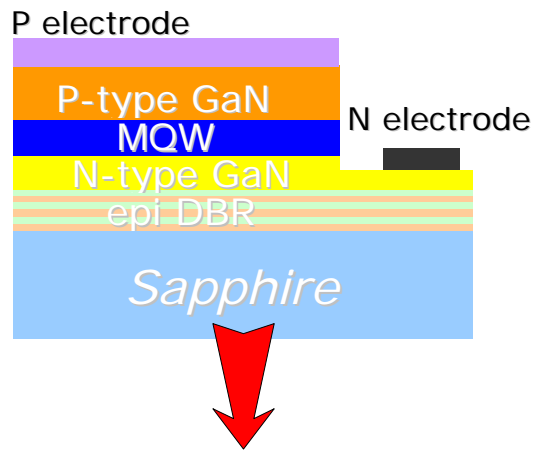


圖 1a 以金屬反射鏡搭配半導體布拉格反射鏡元件示意圖

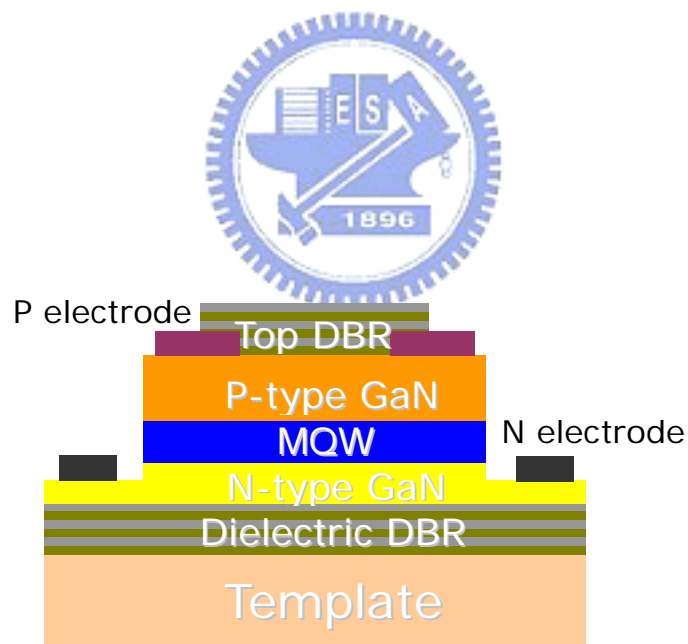


圖 1b 全為介電質材料布拉格反射鏡元件示意圖

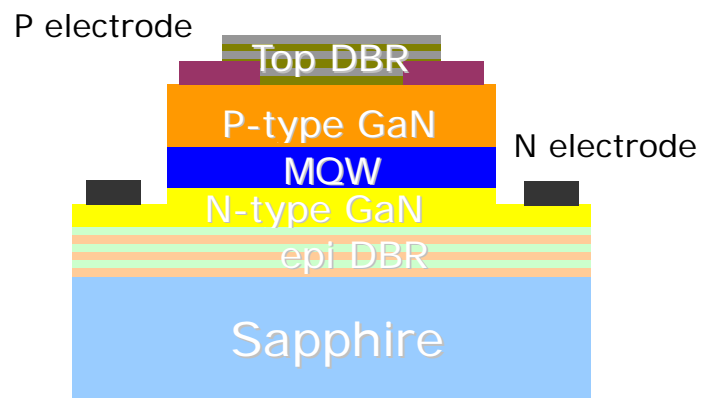


圖 1c 半導體搭配介電質布拉格反射鏡的元件示意圖



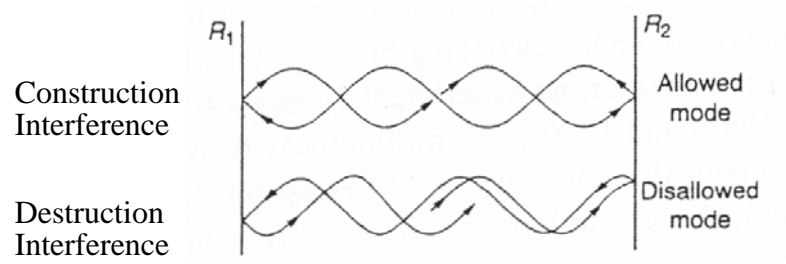


圖 2-1a 建設性與破壞性干涉示意圖

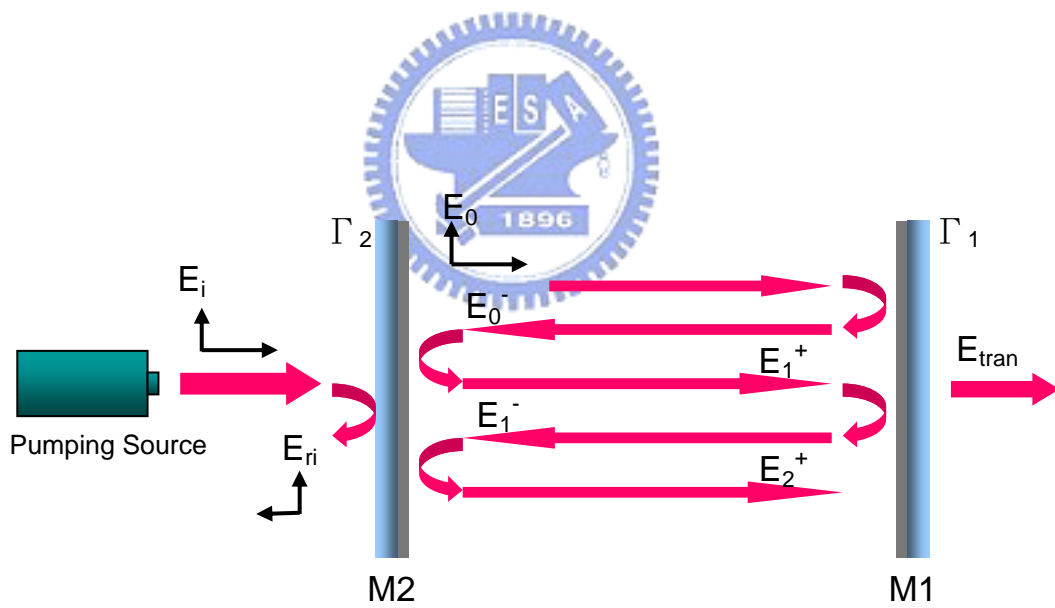


圖 2-1b 光學共振腔示意圖

### Transmission

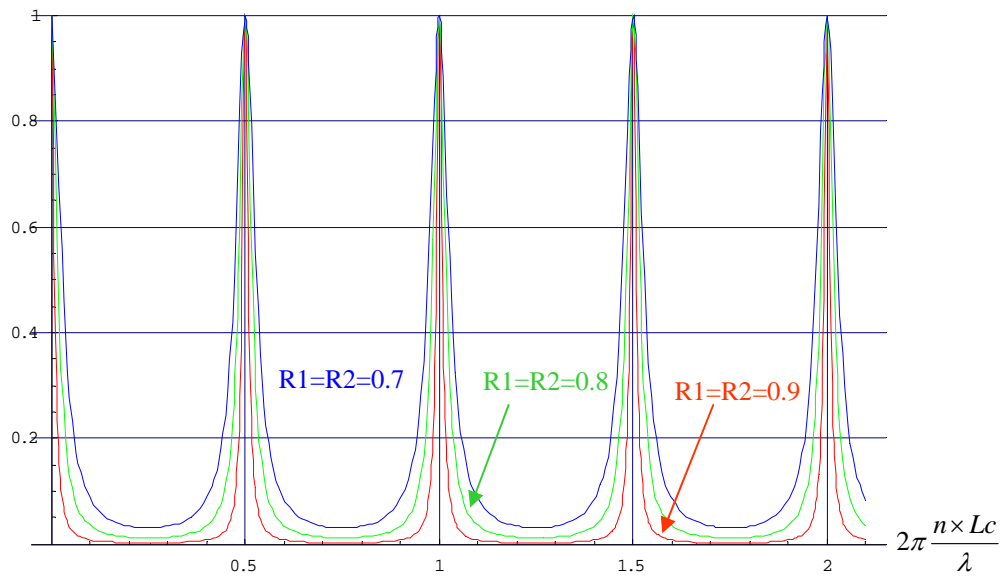


圖 2-1c 對稱共振腔中穿透率與反射率之關係圖

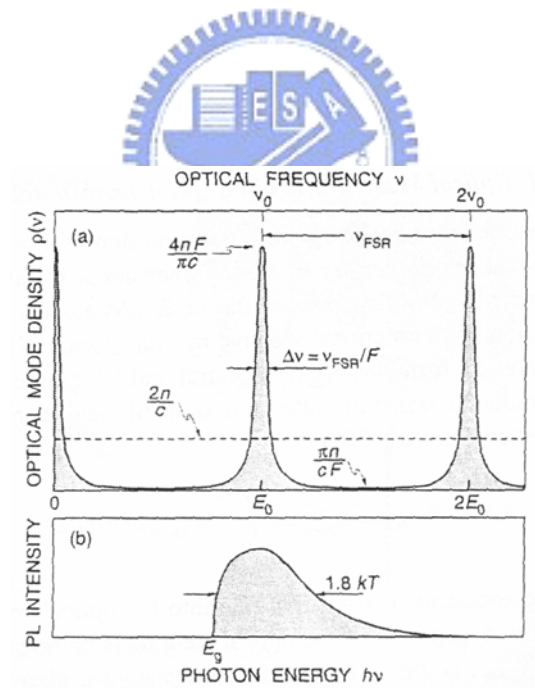


圖 2-1d 光模態與光激發螢光光譜圖

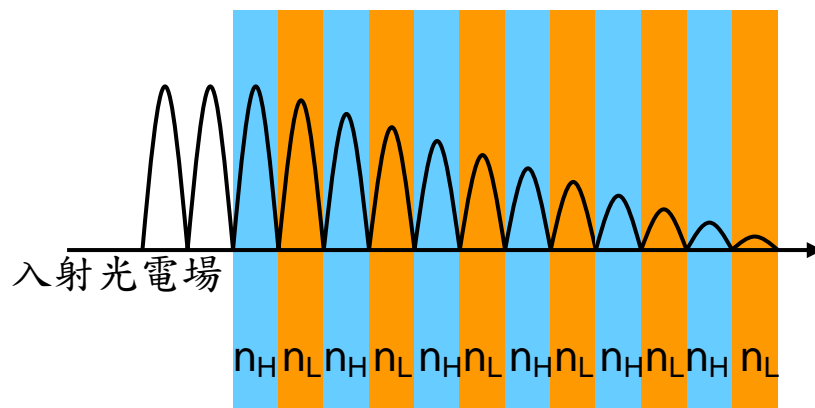


圖 2-2a 布拉格反射鏡示意圖



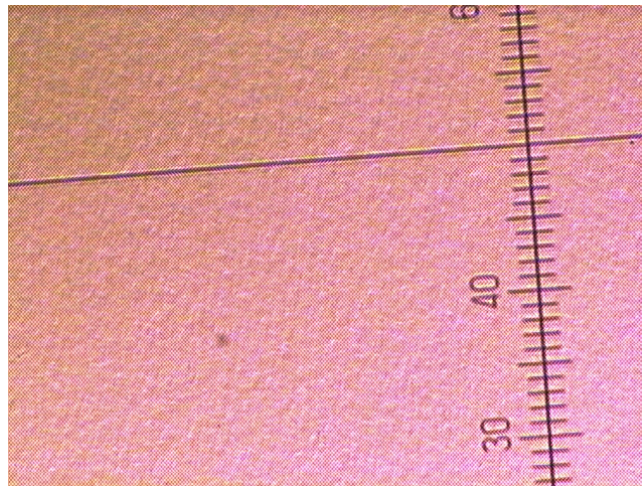


圖 3.1a 樣品表面之光學顯微鏡照面

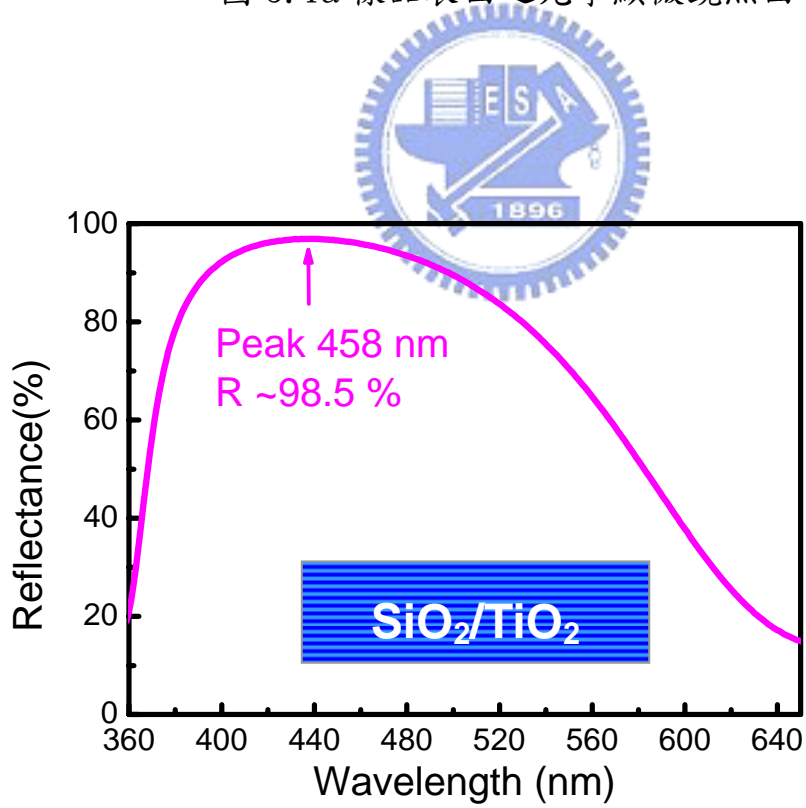


圖 3.1b  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  介電質布拉格反射鏡之反射率頻譜



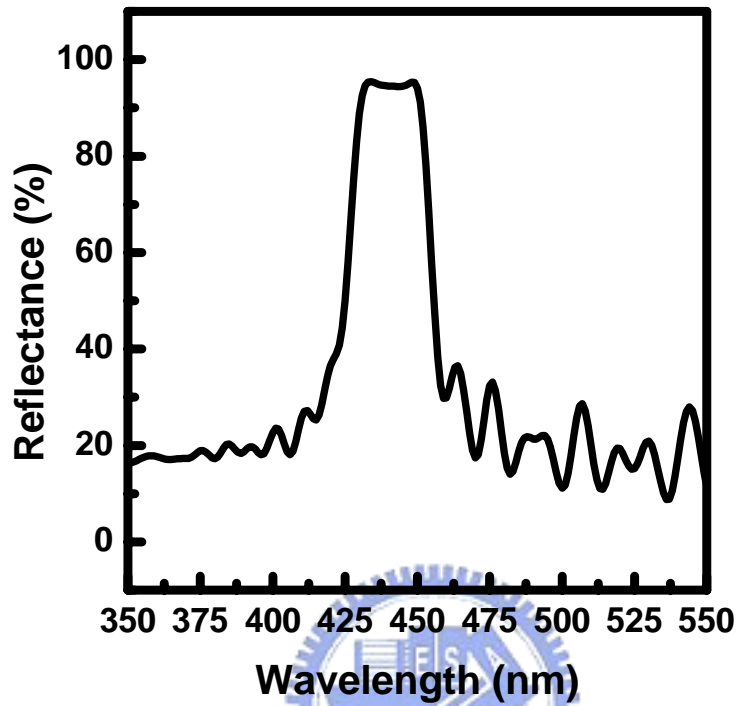


圖 3.1C AlN/GaN 布拉格反射鏡之反射率頻譜

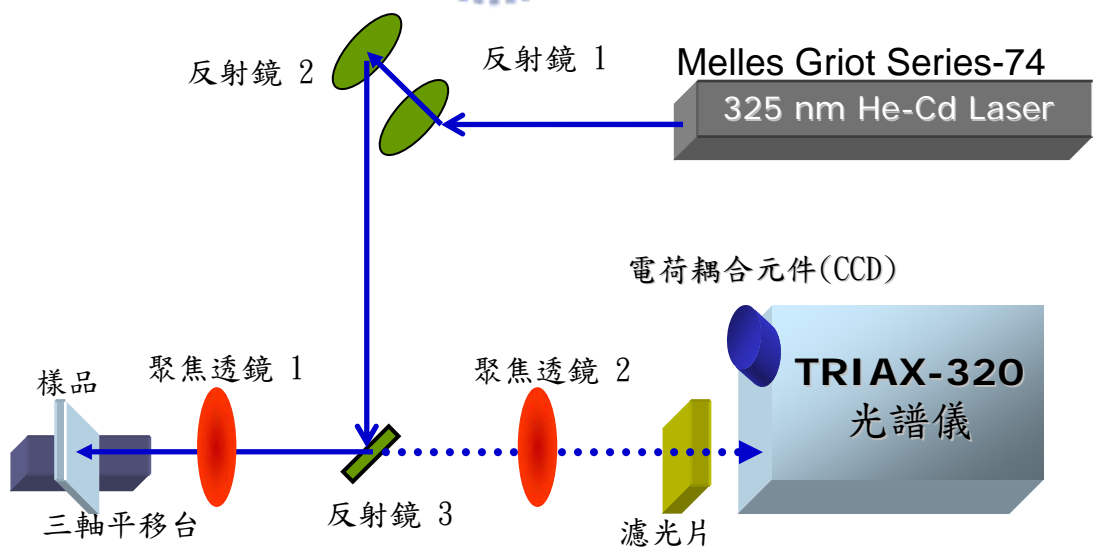


圖 3-2a 光激發螢光系統示意圖

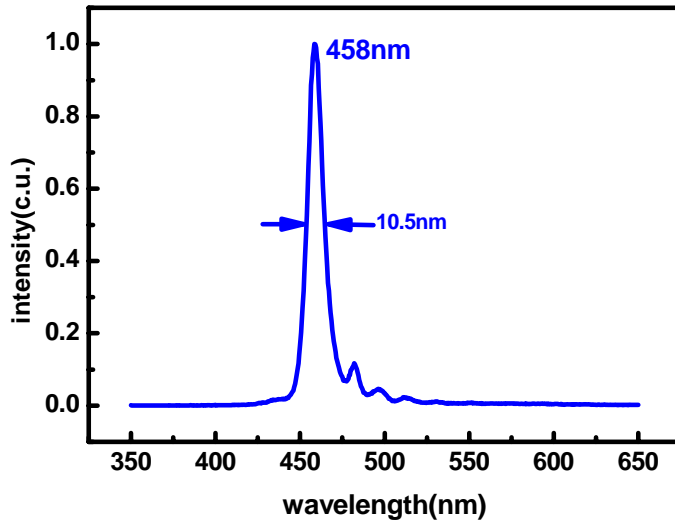


圖 3.2b MQW 的 PL 頻譜圖

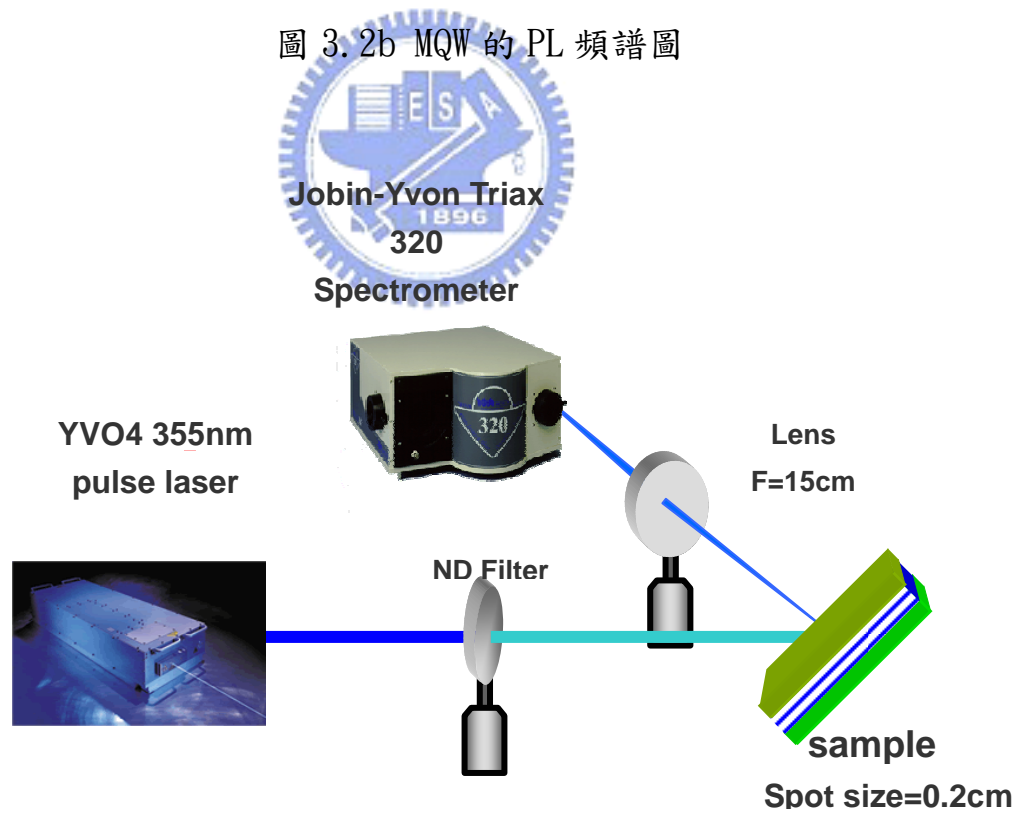


圖 3.3a 光激發系統的架設

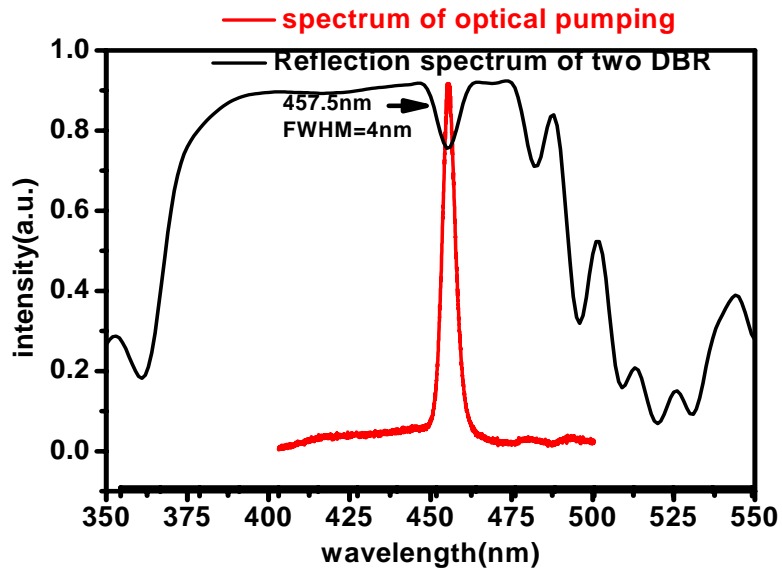


圖 3.3b MQW 的發光波長正好在反射率的 Dip

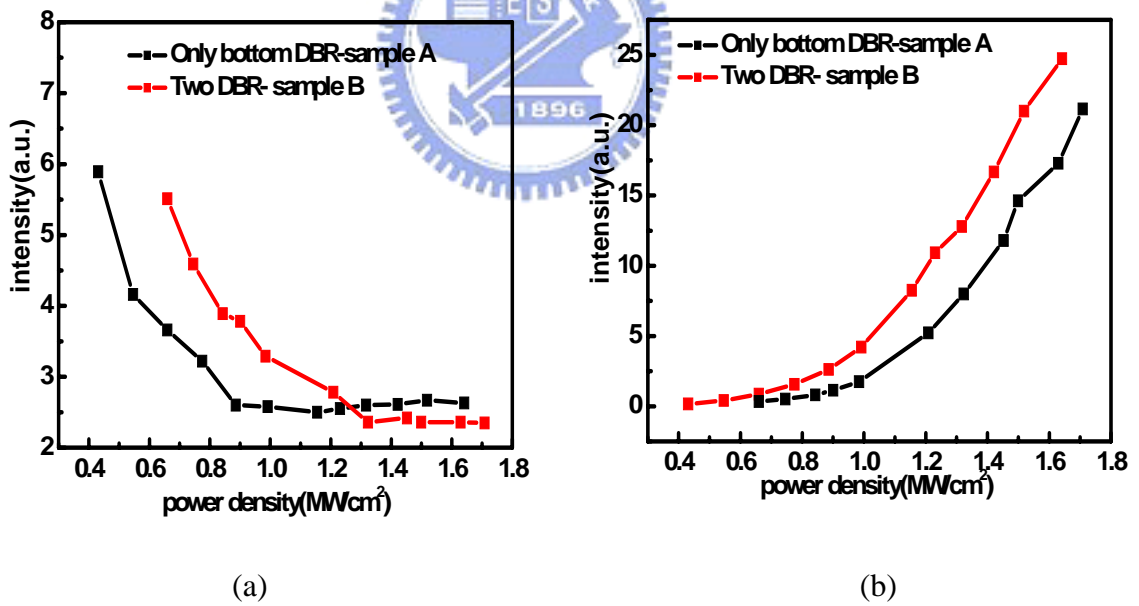


圖 3.3b 改變激發能量強度半高寬的改變

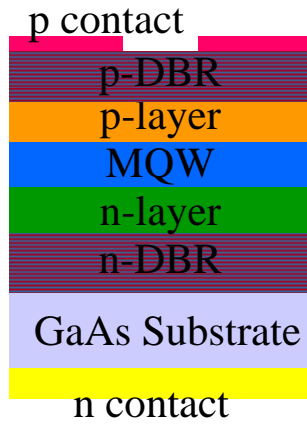


圖 4.1a GaAs VCSEL 元件示意圖

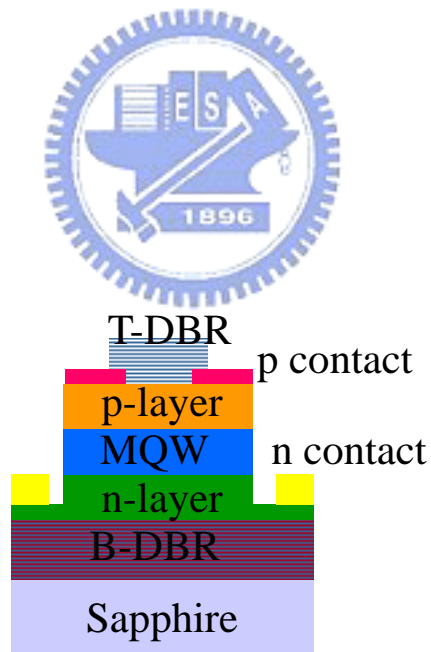


圖 4.1b GaN Intra-Cavity VCSEL 元件示意圖

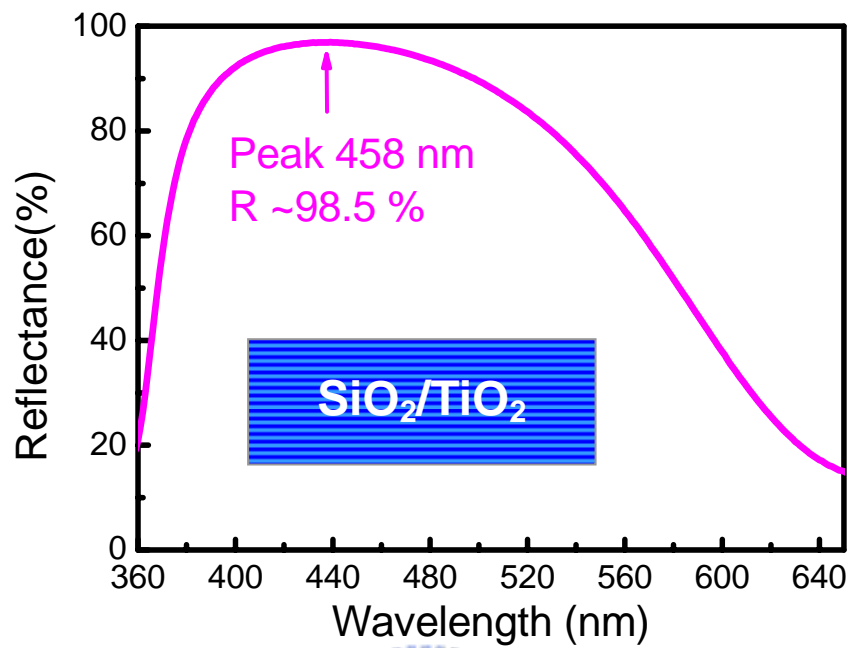


圖 4.1c SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 介電質布拉格反射鏡之反射率頻譜

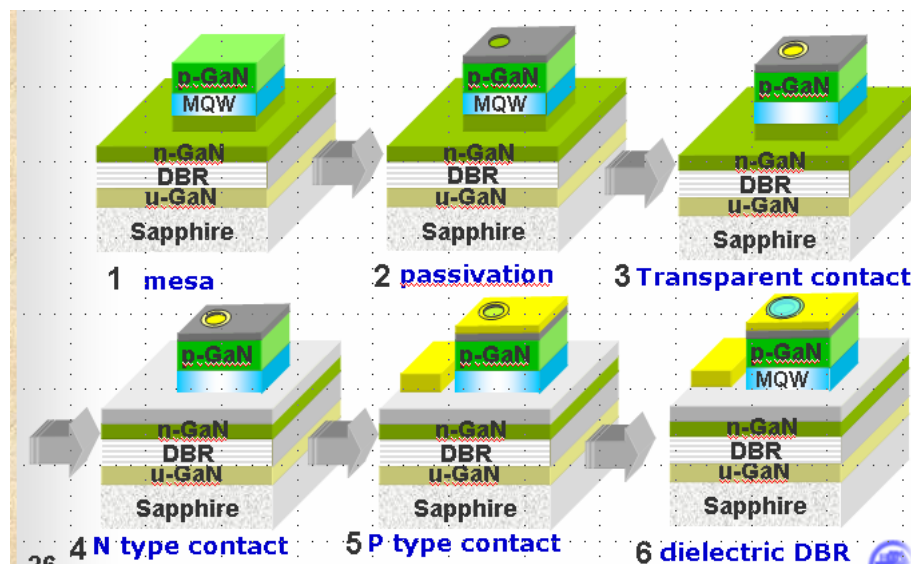


圖 4.1d VCLED 製作流程圖

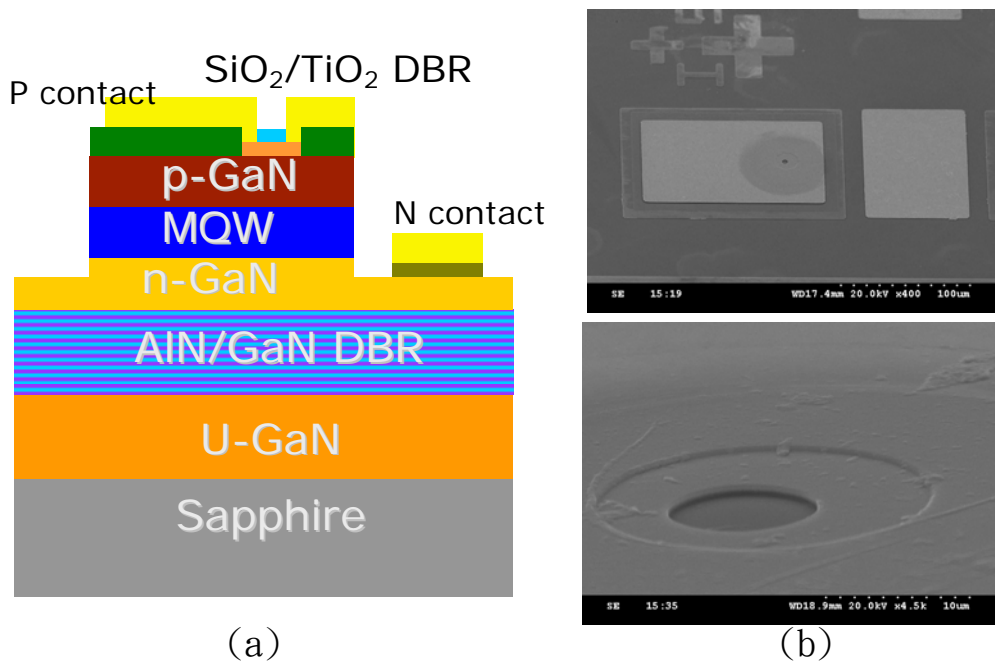


圖 4.1e (a)元件完成示意圖(b)掃描式電子顯微鏡拍攝圖

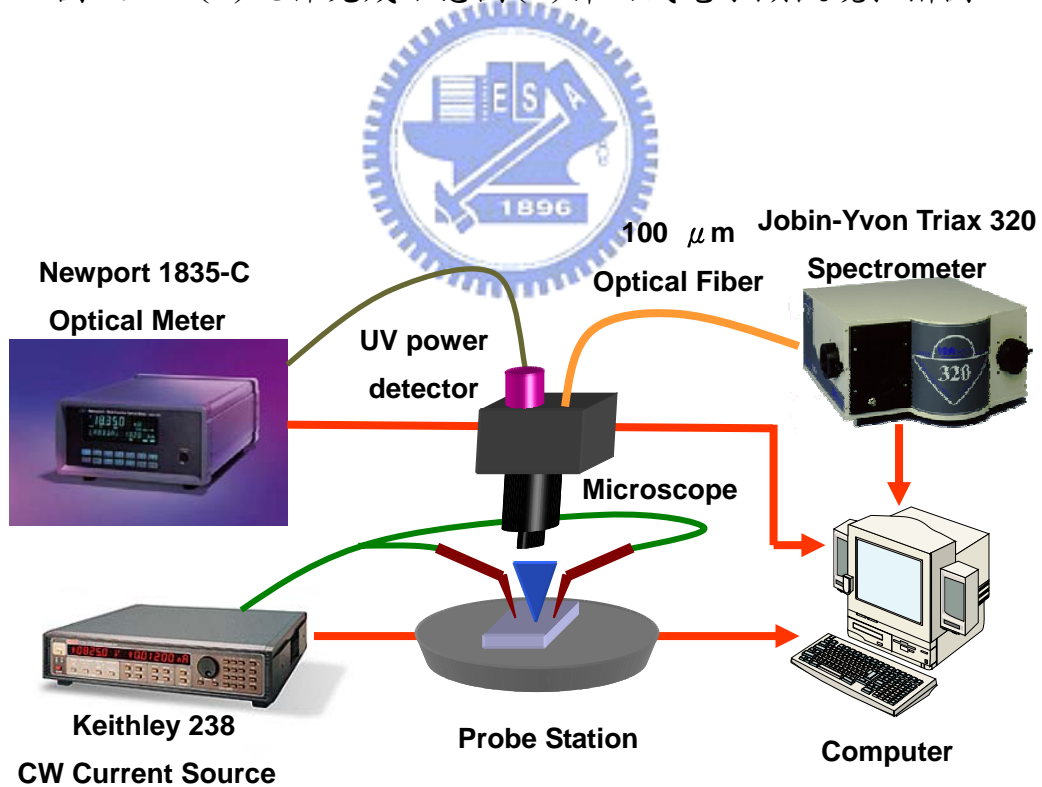


圖 4.2a 電激發螢光量測系統示意圖

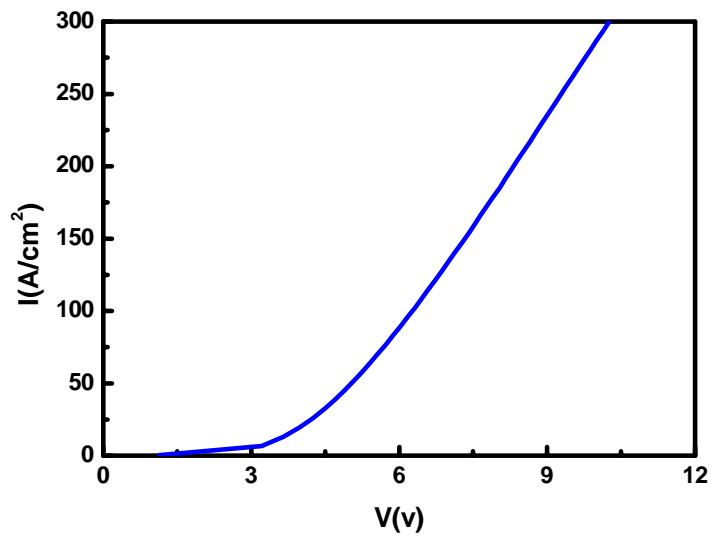


圖 4.2b 面射型發光元件之電流密度與電壓關係圖

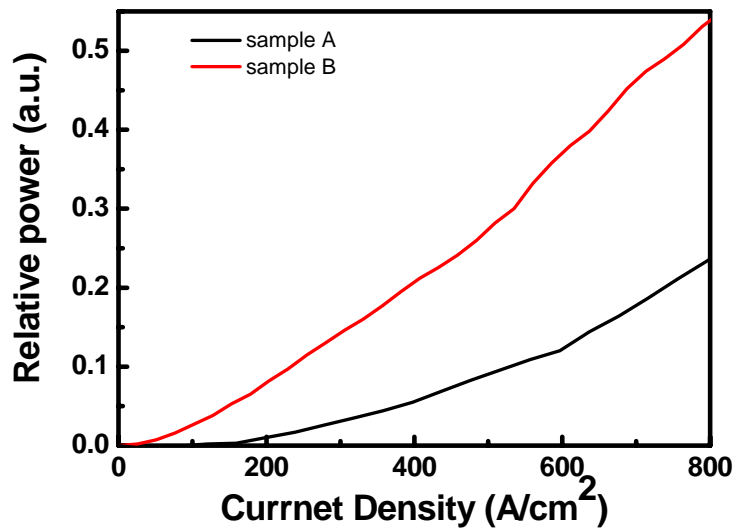


圖 4.2c 面射型發光元件之發光亮度與電流關係圖

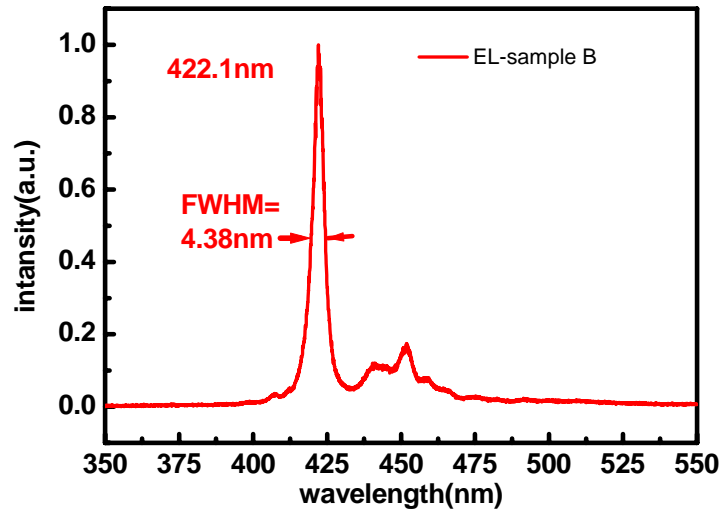


圖 4.2d 元件電激發頻譜





参考文献：

1. S.P. Denbarrs “Gallium-Nitride-Based Materials for Blue to Ultraviolet Optoelectronics Devices.” Proceeding of the IEEE, Vol.85, No.11, Nov. 1997
2. Kenichi Iga “Surface-Emitting Laser-Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field.” IEEE Journal on selected topics in quantum electronics, Vol.6, No.6 Nov./Dec. 2000
3. Y.K. Song, A. Vertikov “A Vertical Cavity Light Emitting InGaN Quantum Well Heterostructure.” Applied Physics Letters, Vol.74, No.23, June 1999
4. Y. K. Song, A. V. Numikko “Resonant-Cavity InGaN Quantum-Well Blue Light-Emitting Diodes.” Applied Physics Letters Vol.77, No.12 Sep. 2000
5. M. Diagne, M. Krames “A High Injection Resonant Cavity Violet Light Emitting Diode Incorporating (Al,Ga)N Distributed Bragg Reflector.” Physica Status Solidi (a), Vol.188, No.1 pp.105-108 2001
6. M. Diagne, A. V. Numikko “Vertical Cavity Violet Light Emitting Diode Incorporating an Aluminum Gallium Nitride Distributed Bragg Mirror and a Tunnel Junction.” Applied Physics Letters, Vol.79, No.22, Nov. 2001
7. N. Nakada, M. Nakaji “Improved Characteristics of InGaN Multiple-Quantum-Well Light-Emitting Diode by GaN/AlGa<sub>N</sub> Distributed Bragg Reflector Grown on Sapphire.” Applied Physics Letters, Vol.76, No.14, April 2000
8. M. Arita, Y. Arakawa “InGaN Vertical Microcavity LEDs with a Si-Doped AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Distributed Bragg Reflector.” Physica Status Solidi (a), Vol.194, No.2 pp.403-406 2002
9. S. Ferna’ndez, K. H. Ploog “MBE-Grown High-Quality AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Distributed Bragg Reflectors for Resonant Cavity LEDs.” Semiconductor Science and Technology, Vol.16, No.11 pp.913-917 2001
10. F. B. Naranjo, P. Venne’gue’s “Resonant-Cavity InGaN Multiple-Quantum-Well Green Light-Emitting Diode Grown by Molecular-Beam Epitaxy” Applied Physics Letters, Vol.80 No.12, March 2002
11. F.Calle, E.Muñoz “Nitride RCLEDs Grown by MBE for POF Application.” Physica Status Solidi (a), Vol.192 No.2 pp.277-285 2002
12. F.B. Naranjo, E. Calleja “From Ultraviolet to Green InGaN-Based Conventional and Resonant-Cavity Light-Emitting Diodes Grown by Molecular Epitaxy.” Physica Status Solidi (a), Vol.192, No.2 pp.341-347 2002
13. S. Ferna’ndez, F. B. Naranjo “High-Quality Distributed Bragg Reflectors for Resonant-Cavity Light-Emitting Diode Applications.” Physica Status Solidi (a), Vol.192, No.2 pp.389-393 2002
14. A. Shaw, J. F. Donegan “Modelling of Extraction Efficiency of GaN-Based

- Resonant Cavity Light Emitting Diodes Emitting at 510 nm.” *Physica Status Solidi (a)* Vol.192, No.1 pp.103-109 2002
15. B. Roycroft, B. Corbett “Experimental Characterisation of GaN-Based Resonant Cavity Light Emitting Diodes” *Physica Status Solidi (a)*, Vol.192, No.1 pp.97-102 2002
  16. P. Maaskant, B. Corbett “Fabrication of GaN-Based Resonant Cavity LEDs” *Physica status Solidi (a)*, Vol.192 ,No.2 pp.348-353 2002
  17. P. DE Mierry, P.Gibart “Vertical Cavity InGaN LEDs Grown by MOVPE” *Physica Status Solidi (a)* Vol.192, No.2 pp.335-340 2002
  18. H. Klausning, J. Graul “Electron Beam Pumped Nitride Vertical Cavity Surface Emitting Structures with AlGaIn/AlN DBR Mirrors.” *Physica Status Solidi (a)* Vol.194, No.2 pp.428-432 2002
  19. Arto Numikko, Jung Han “Blue and Near-Ultraviolet Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers” *MRS Bulletin* pp.502-506 July 2002
  20. Joseph T. Verdeyen “Laser Electronics” Chapter 5, Prentice-Hall International Inc. 3th, 1995
  21. Carl W. Wilmsen, Henryk Temkin, Larry A. Coldren “Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser” Chapter 3.2.2, Cambridge University, 1999
  22. R. Langer, O. Konovalov “High-Reflectivity GaN/GaAlN Bragg Mirrors at Blue/Green Wavelengths Grown by Molecular Beam Epitaxy.” *Applied Physics Letters*, Vol.72, No.24, June 1999
  23. S. Fernández, E. Calleja “High-Quality Distributed Bragg Reflectors Based on Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN Multilayers Grown by Molecular-Beam Epitaxy.” *Applied Physics Letters*, Vol.79, No.14, Oct 1999
  24. F. Natali, B. Damilano “High-Al-Content Crack-Free AlGaIn/GaN Bragg Mirrors Grown by Molecular-Beam Epitaxy.” *Applied Physics Letters*. Vol. 82, no.4, Jan 2003
  25. T. Someya, Y. Arakawa “Highly Reflective GaN/Al<sub>0.34</sub>Ga<sub>0.66</sub>N Quarter-Wave Reflectors Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition.” *Applied Physics Letters*, Vol.73, No.25, Dec 1998
  26. K. E. Waldrip, J. J. Figiel “Stress Engineering During Metal-Organic Chemical Vapor Deposition of AlGaIn/GaN Distributed Bragg Reflectors.” *Applied Physics Letters*, Vol.78, No.21, May 2001
  27. H. P. D. Schenk, P. Gibart “In-situ Growth Monitoring of Distributed GaN/AlGaIn Bragg Reflectors by Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy.” *Applied Physics Letters*, Vol.80, No.2, Jan 2002
  28. H. M. NgT, D. Moustakas “High Reflectivity and Broad Bandwidth AlN/GaN Distributed Bragg Reflectors Grown by Molecular-Beam Epitaxy.” *Applied*

- Physics Letters, Vol.76, No.20, May 2000
29. D. Brunner, H. Angerer, M. Stutzmann “Optical Constants of Epitaxial AlGa<sub>N</sub> Films and Their Temperature Dependence.” Journal of Applied Physics, Vol.82, No.10 Nov 1997
  30. Marek Osin´ski, Petr G. Eliseev, “Design of InGa<sub>N</sub>–Ga<sub>N</sub>–AlGa<sub>N</sub> Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Using Electrical–Thermal–Optical Simulation.” IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.7 No.2, Mar/Apr 2001
  31. P. Maćkowiak, W. Nakwaski, “Some aspects of designing an efficient nitride VCSEL resonator.” Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.34, No.6 Mar 2001
  32. G.T. Dang, H. Shen, “Fabrication and Characteristics of High Speed Implant Confined Index-Guided, Lateral-Current, 850 nm Vertical Cavity Surface Emitting Laser(Invited).” Fourth IEEE Interational Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, Aruba, Apr 17-19 2002
  33. Seong-Ran Jeon, Gye Mo Yang, “Lateral Current Spreading in Ga<sub>N</sub>-Based Light-Emitting Diodes Utilizing Tunnel Contact Junctions.” Applied Physics Letters, Vol.78, No.21, May 2001
  34. Seong-Ran Jeon, Gye Mo Yang, “Ga<sub>N</sub> Tunnel Junction as a Current Aperture in a Blue Surface-Emitting Light-Emitting Diode.” Applied Physics Letters, Vol.80, No.11, Mar 2002

