

共振腔發光二極體的製作與特性量測

Fabrication and Characterization of Resonant Cavity Light Emitting Diodes

研究生：李國盛

Student : Kuo-Sheng Lee

指導教授：楊賜麟

Advisor : Su-Lin Yang

國立交通大學

電子物理系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Electrophysics
College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Electrophysics

June 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

共振腔發光二極體的製作與特性量測

研究生：李國盛

指導教授：楊賜麟 博士

國立交通大學 電子物理研究所

摘要

本論文的主要研究是設計、製作、以及特性量測 650 nm 波段的共振腔發光二極體(Resonant Cavity Light Emitting Diode, RCLED)。RCLED 磊晶片的活性層是由三週期的 $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{P}$ 量子井所組成，上層和下層 DBR 分別是 8 週期和 32 週期的 $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 。在結構變化方面，我們設計 5 個不同窗口尺寸，分別是直徑 80、110、140、170 和 200 μm 。另外在圓環接觸開口的邊緣(或 p-電極邊緣)和窗口邊緣的位移量 d 項，我們設計三種條件，分別是 $d = -5$ 、0、及 5 μm 。實驗結果顯示窗口尺寸 200 μm 及 $d = -5$ μm 的 RCLED 元件具有最大的光輸出功率 1.18 mW 和最大的量子效率 1.93 %。任意窗口尺寸且 d 為 -5 μm 的 RCLED 相對於 $d = 0$ μm 和 $d = 5$ μm 有較大的光輸出功率。

Fabrication and Characterization of Resonant Cavity Light Emitting Diodes

Student: Kuo-Sheng Lee

Advisor : Dr. Su-Lin Yang

Institute of Electrophysics,
National Chiao Tung University

Abstract

In this study, we designed, fabricated and characterized the resonant-cavity light emitting diodes (RCLED) emitting at 650 nm wavelength. The active region consists of three periods of $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{P}$ quantum wells. The total 32 and 8 pairs of alternating $\lambda/4n$ thick AlAs and $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ layers formed the bottom and top distributed Bragg reflectors (DBR). We designed five implantation aperture sizes of 80, 110, 140, 170, and 200 μm in diameter. In addition, three contact aperture sizes associated with each implantation aperture, defined by the difference of contact aperture from implantation aperture in $d = -5, 0, \text{ and } 5 \mu\text{m}$, were considered to investigate the geometrical structural effect to the device performance. The experimental results indicated that the RCLED of 200 μm - diameter implanted aperture and $d = -5 \mu\text{m}$ has the maximum light output power of 1.18 mW and highest external quantum efficiency of 1.93 % . For the same aperture size, the RCLED with $d = -5 \mu\text{m}$ has the greater light output power than the devices of $d = 0$ and $d = 5 \mu\text{m}$.

誌謝

本篇論文能順利的完成，首先得感謝指導教授楊賜麟老師的悉心指導與教誨，並且在百忙中多次不辭辛勞地詳閱論文內容，並給予諸多精闢的建議與啟發。感謝吳玉麟和張國彬學長在各方面的幫助與提攜。感謝王世賢和陳姿均給予的協助和鼓勵，使我能在學業和研究上解決疑惑、度過難關。另外，也感謝學弟們在口試之前和之後的鼎力相助，使口試能順利進行。

在實驗的部份，感謝威凱公司的總經理徐順弘先生和副總張發慈先生能提供實驗的設備和資源，讓我的研究得以完成。感謝威凱科技公司的洪偉鵬、鄭如純、邱邵斌、葉彥均和陳毅修先生在製程上的大力幫忙。特別謝謝毅修能帶我一步一步地完成元件的製作，若沒有你的勞心勞力，我的實驗部分可能會寸步難行。

最後感謝父母於精神和經濟上的支持，使我能心無旁騖的研究，因為有您們無怨無悔的付出，我才沒有辜負你們的期望，完成了這篇論文，再次謝謝你們。

目 錄

| | 頁次 |
|-------------------|-----|
| 中文摘要 | i |
| 英文摘要 | ii |
| 誌謝 | iii |
| 目錄 | iv |
| 表目錄 | vi |
| 圖目錄 | vii |
| 第一章 緒論 | 1 |
| 第二章 共振腔二極體元件的工作原理 | 4 |
| 2.1 活性層 | 4 |
| 2.2 法布里-比洛共振腔 | 5 |
| 2.3 布拉格反射鏡 | 9 |
| 2.4 發光波長對操作溫度的依賴性 | 11 |
| 第三章 RCLED 的製作 | 19 |
| 3.1 RCLED 的磊晶結構 | 19 |
| 3.2 光罩設計 | 19 |
| 3.3 RCLED 的製程 | 21 |
| 第四章 實驗結果與討論 | 29 |



| | |
|---------------------------|----|
| 4.1 反射光譜的模擬 | 29 |
| 4.2 RCLED 電流-電壓(I-V)特性量測 | 30 |
| 4.3 RCLED 光功率-電流(L-I)特性量測 | 31 |
| 4.4 RCLED 光譜特性 | 33 |
| 4.5 RCLED 遠場強度分佈 | 35 |
| 第五章 結論 | 50 |
| 參考文獻 | 52 |



表 目 錄

| 附表索引: | 頁次 |
|--|----|
| 表 4-1 RCLED 的所有結構參數 | 29 |
| 表 4-2 5 種窗口尺寸 RCLED 的開啟電壓和在 20mA 下的電阻值 | 31 |



圖 目 錄

| 附圖索引: | 頁次 |
|--|----|
| 圖 2-1 RCLED 的各層結構 | 15 |
| 圖 2-2 RCLED 的共振腔內部組成 | 15 |
| 圖 2-3 在半導體和空氣的介面間，對點光源而言的入射 、折射、和全反射圖 | 16 |
| 圖 2-4 光線可脫離半導體的圓錐區域 | 16 |
| 圖 2-5 共振腔內形成的(a)增強放射和(b)抑制放射 | 17 |
| 圖 2-6 共振腔內的共振模態調制自發性放射光的示意圖 | 17 |
| 圖 2-7 各種不同可當作高反射率的物質 | 18 |
| 圖 2-8 銀金屬鏡和 25 週期 AlAs/GaAs DBR 的反射率圖 | 18 |
| 圖 3-1 完成平台蝕刻製程的結構側面圖 | 26 |
| 圖 3-2 完成離子佈植製程的結構側面圖 | 26 |
| 圖 3-3 完成接觸開口製程的結構側面圖 | 27 |
| 圖 3-4 RCLED 的三種變化。由左至右分別為 $d = 5$ 、 0 、及 $-5 \mu\text{m}$ | 27 |
| 圖 3-5 完成金屬蒸鍍製程的結構側面圖 | 28 |
| 圖 4-1 製作完成的 RCLED 結構側面圖 | 36 |

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 4-2 | RCLED 的三種變化。由左至右分別為 $d = 5$ 、 0 、及 $-5 \mu\text{m}$ | 36 |
| 圖 4-3 | 8 週期 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As} / \text{AlAs}$ p-DBR 的反射率光譜 | 37 |
| 圖 4-4 | 32 週期 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As} / \text{AlAs}$ n-DBR 的反射率光譜 | 37 |
| 圖 4-5 | 整個結構的反射率圖形 | 38 |
| 圖 4-6 | I-V 量測的儀器和樣品的裝置圖 | 38 |
| 圖 4-7 | 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$)RCLED 的 I-V 圖 | 39 |
| 圖 4-8 | 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 圖 | 39 |
| 圖 4-9 | 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = 0 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 圖 | 40 |
| 圖 4-10 | 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = 5 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 圖 | 40 |
| 圖 4-11 | 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$)RCLED 的輸出光功率頂峰值隨電流變化關係圖 | 41 |
| 圖 4-12 | 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = 0 \mu\text{m}$)RCLED 的輸出光功率頂峰值隨電流變化關係圖 | 41 |
| 圖 4-13 | 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = 5 \mu\text{m}$)RCLED 的輸出光功率頂峰值隨電流變化關係圖 | 42 |
| 圖 4-14 | $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $80 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 關係圖 | 42 |
| 圖 4-15 | (a) $d = 5 \mu\text{m}$ 和(b) $d = -5 \mu\text{m}$ 下，RCLED 元件 | |

| | |
|--|----|
| 電流導通路徑圖 | 43 |
| 圖 4-16 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $110 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 關係圖 | 43 |
| 圖 4-17 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $140 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 關係圖 | 44 |
| 圖 4-18 $d = -5$ 及 $0 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $170 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 關係圖 | 44 |
| 圖 4-19 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $200 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 關係圖 | 45 |
| 圖 4-20 五種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$)RCLED 之外部量子效率與電流的關係圖 | 45 |
| 圖 4-21 光譜量測的系統架構 | 46 |
| 圖 4-22 不同注入的電流($2 \sim 30 \text{ mA}$)下，窗口 $170 \mu\text{m}$ 、 $d = -5 \mu\text{m}$ RCLED 之光譜圖 | 47 |
| 圖 4-23 窗口尺寸 $170 \mu\text{m}$ 、 $d = -5 \mu\text{m}$ RCLED 的 峰值波長隨電流變化關係圖 | 47 |
| 圖 4-24 窗口尺寸 80 、 110 、 140 、 $170 \mu\text{m}$ (固定 $d = -5 \mu\text{m}$) RCLED 的峰值波長隨電流變化關係圖 | 48 |
| 圖 4-25 窗口尺寸 $170 \mu\text{m}$ 、 $d = -5 \mu\text{m}$ RCLED | |

導通 1 mA 電流時之 EL 遠場強度變化圖 48

圖 4-26 窗口尺寸 $170\ \mu\text{m}$ 、 $d = -5\ \mu\text{m}$ 的 RCLED

導通 12 mA 電流時之 EL 遠場強度變化圖 49



第一章 緒論

發光二極體(Light Emitting Diode, LED)具有較傳統燈泡更小的體積、更快的反應速度、更長的壽命和更少的電力消耗，這些優點使發光二極體可廣泛的應用於照明、顯示、及光通訊上。然而隨著現今資訊流量的需求增加，光通訊裡的光源部份必須具有更狹窄的光譜線寬以疏減光通訊上材料色散(material dispersion)和波導色散(waveguide dispersion)的問題，由於傳統發光二極體受限於本身簡易的結構，其光譜線寬並無法予以適度的窄化，導致它在光通訊的應用裡逐漸式微。為了解決此一問題，我們有必要對傳統發光二極體做進一步的設計改造。

為了使發光二極體能有優異的光譜特性與高外部量子效率(輸出光功率和輸入電功率的比)，基本上有兩個主要的研究方向。在第一類研究裡，Schnitze 等人設計製作具表面紋路結構 (textured surface) 之 LED，此種 LED 背面有金屬反射鏡將光反射至正面，紋路結構可以讓光以各種方向離開元件表面，也就是以不同的入射角在各個可能的接觸面上將光折射出，使 LED 可以得到較一般平面表面 LED 大的光輸出，也因此增加所謂的 LED 外部量子效率[1,2]。然而這種紋路物狀表面的 LED 會增加製程的複雜性，在光譜特性上也沒有太大的改善。在第二類研究裡，則引進一種不同於傳統 LED 結構的發光二極體，即微腔發光二極體(Micro-Cavity Light Emitting Diode,

MCLED) 或共振腔發光二極體 (Resonant Cavity Light Emitting Diode, RCLED)，在此新穎的元件裡，發光層是被嵌進在一個具有發光波長尺寸的共振腔體中，藉由共振效應的影響，發光二極體的自發性放射過程將會被修正，只有特定的波段可共振射出，因此有效地縮短光譜線寬。自 1990 到 1992 年間，多項實驗研究印證此共振腔的結構可用以改善發光二極體的特性，Schubert et al. 等人於 1992 年發表了具體的 RCLED 元件結構 [3]，以迄 1996 年此 RCLED 具有高速 622 Mbit/s 的能力[4]，另外 De Neve et al. 等人則優化了 RCLED 的最大效率，使元件有超過 22 % 的高效率表現；另外他們也優化了 RCLED 放射光進入塑膠光纖的效率表現[5]。

RCLED 除了有較高光譜純度(狹窄線寬)的優點之外，還有很多優異的特性，如輸出強度的增強、低散射的圓型輸出光束和溫度的高穩定性，這些優點主要歸功於微腔造成的共振效應。然而，實際上使用光學微腔的光電元件，除了 RCLED 之外還有垂直共振腔面射型雷射 (Vertical Cavity Surface Laser VCSEL)。這兩種發光元件有著本質上的差異，RCLED 發出的光是自發性發射 (spontaneous emission)，而 VCSEL 是誘導性放射 (stimulated emission)。誘導性放射的物理過程，使 VCSEL 幾乎是單波長的光源放射和近場繞射極限的輸出場 (single-mode VCSEL)。VCSEL 的光譜純度和光束方向性皆要比 RCLED 來的優異，這些特徵讓 VCSEL 比 RCLED 更適合耦合到單模光纖裡，然而 VCSEL 為了達到臨界操作，其必須具有極高反射率的

反射鏡(99%)，不僅製造不易，成本也較高。反觀 RCLED，其通常包含一個高反射率的底層反射鏡(90%-99%)和另一個只有中等反射率的上層反射鏡(50%-90%)，所以製作上較 VCSEL 簡易許多，再加上 RCLED 對溫度的穩定性優於 VCSEL，這些優點使 RCLED 變成一個新低價的光源元件，例如光傳輸系統、光學連接、高密度陣列包裝的掃描器與顯示器等，尤其是在以低價為訴求的塑膠光纖通訊裡，紅光 RCLED 被預期會有相當寬廣的應用[6]-[9]。



第二章

共振腔二極體元件的工作原理

共振腔發光二極體(Resonant Cavity Light Emitting Diode, RCLED)的組成主要包含三個部份：活性層 (active layer)、共振腔 (resonant cavity) 和兩個鄰接腔體的布拉格反射鏡面(distributed Brag reflector, DBR) (如圖 2-1 和圖 2-2 所示的 RCLED 各層結構和其共振腔內部組成)。當自發性放射光 (spontaneous emission) 從活性層產生後，接著將會在 p 型反射鏡面和 n 型反射鏡面之間來回的反射，並且在共振腔內形成共振現象或駐波的形式。經由共振腔和反射鏡的適當調整，光將以設計的波長射出共振腔，其餘波長的光則被壓制發射，光譜線寬因此得以縮短，達到改進 LED 線寬的目的。

為了能更深入瞭解 RCLED 的共振條件和機制，本章依序介紹 RCLED 的三個結構組成，並進一步探討 RCLED 的設計條件，以及 RCLED 發光特性受溫度影響的因素。

2.1 活性層(active layer)

發光元件的活性層不僅是載子復合貢獻出有用的增益區域，而且通常具有較其他層更低的能隙和更大的折射係數(index of refraction)，低能隙的特性可以使發光層的電子電洞有較好的載子侷限效果，高折射率特性則提供

較好的光侷限效果。在一般的發光元件裡，用量子井做活性層可以有效侷限載子和得到線寬較窄的發光波段，若進一步採用量子點形式的活性層更可以讓光源接近單一波長，然而在 RCLED 的應用中，量子點式的活性層會增加製程的複雜性，而喪失 LED 簡易製造的優點，因此到目前為止，RCLED 的活性層仍是採用量子井的形式。

2.2 法布里-比洛共振腔(Fabry- Perot Cavity)

外部量子效率 η_{ex} (external quantum efficiency) 是衡量 LED 發光效率的一個關鍵性參數，它代表著外部輸出光子數和注入的電子數的比值：

$$\eta_{ex} = \frac{P_{op}/\hbar\omega}{I/q} = \eta_{in} \eta_{extr} \quad (2.1)$$

P_{op} : 光離開半導體的功率值(W)

I : 注入半導體的電流值(A)

η_{in} : 內部量子效率(%)

η_{extr} : 抽取效率(%)

內部量子效率 η_{in} 代表活性層中產生的光子數和注入電子數的比例，藉由製程的改進和引入量子井為活性層的結構設計，LED 內部的量子效率 η_{in} 可以接近 100%。真正影響 LED 表現的是光抽取的因素，由於半導體層有高的折射係數，光並不容易被抽取而離開半導體晶體，這情形可從圖 2-3 來了

解，一點光源被放置在半導體和空氣的界面附近，此光源可在各個方向發射出光線或平面波，只要小於全反射的臨界角 θ_c ，光線即可離開半導體，因此允許光線脫離的區域，形成一個如圖 2-4 的圓錐體，立體角 Ω 為：

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta_c) \approx \frac{\pi}{n^2} \quad (2.2)$$

($\theta_c \approx \frac{1}{n}$ ， n 是半導體的折射係數)

即使圓錐內的光可全部釋放(會部份反射)，抽取效率仍然被限制為

$$\eta_{\text{extr}} \leq \frac{1}{4n^2} \quad (2.3)$$



例如，當半導體材質是 GaAs 時，其 $n \approx 3.6$ 、 $\theta_c \approx 18$ 度，因此 $\eta_{\text{extr}} \leq 2\%$ ，只有 2%的光可以被抽取射出半導體，其餘的則被半導體吸收，並轉換為熱而損失掉，此一光損失的問題，我們須有效克服。

有一些研究方法，致力於使 LED 更有效率的發光，例如額外的側向光抽取或內部傾斜面的多重反射，這些技術雖然可以提升效率、減少損耗，然而對於耦合至光纖所需要的單方向光束集中並沒有太大的改善，等向性自發性放射的基本問題依然沒有解決，Schubert et al.等人即引進了 Fabry Perot 共振腔概念來改善 LED 的表現，並且把此元件稱之為共振腔發光二極體。

RCLED 在構造上與傳統 LED 有明顯的不同，例如採正面發光的 RCLED 在活性層的底下會有一反射鏡，使發出的光盡可能的向上反射，以避免被基材(substrate)等物質所吸收，另外 RCLED 在活性層上面也放置了一個反射鏡，這種設計似乎會使光侷限在半導體中而難以脫離，但是根據共振的理論，是上面的反射鏡與下面的反射鏡造成共振的機制，並使一些特定方向的光可以射出半導體。我們考慮一個在兩個鏡面之間的點光源(如圖 2-5)，這點光源會在所有的方向釋放出光波，並不斷的在兩鏡面之間反射，某些特定方向上的光會因為同相位的關係產生建設性干涉(如圖 2-5(a))，而其他方向的光將產生破壞性干涉(如圖 2-5(b))，使沿此方向的光子非常少，這種建設-破壞的干涉特性導致 RCLED 的放射光是非等向性。在特定的波長下，我們將光可以放射和傳播的型式，稱為共振模態(cavity mode)，由 Fabry-Perot 的共振理論可知，共振模態的波長 λ_{CM} 或頻率 ν_m 有下面兩種關係式：

$$(1) \lambda_{CM}(\theta) = \lambda_{CM}(0^\circ) \cdot \left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{n^2}\right)^{1/2} \quad (2.4)$$

n : 共振腔的有效折射係數

θ : 在腔體內光傳播方向與垂直腔體方向的夾角

$$(2) \nu_m = m \frac{c}{2nd \cos \theta} \quad (2.5)$$

m : 第 m 個模態

d: 共振腔的有效長度

第一個式子說明當傳播角度為 θ 度時其共振模態和0度垂直共振模態的關係式，當 θ 增加時共振模態的波長會越來越小。第二式子陳述光的共振頻率與傳波方向、共振腔有效長度和半導體折射率的關係式，若共振腔長度是發光波長的半整數倍，將可以滿足垂直腔體的共振條件，晶片表片正上方的光強度因而增加，這對於耦合至光纖的效率是非常重要的，然而在一些離軸方向上(非垂直方向)也會有一些離軸共振的情形發生(共振腔的高階表現)，圖 2-6 顯示離軸共振的發射光會偏離由全反射角所定義的抽取圓錐體區域，並被半導體吸收而無法被釋放，由於每個共振方向皆會釋放等量的光，這些離軸模態的產生將會降低 RCLED 的效率，因此為了避免這問題的發生，共振腔的厚度不能太厚，以便降低抽取圓錐區域之外的模態數。另外在 RCLED 的效率研究中有兩種研究方法可以增加抽取效率，在第一個方法裡藉由調整反射鏡的反射率來校準共振的敏銳度，也就是下層反射鏡要盡可能的有高反射率，並控制上層反射鏡的反射率，使垂直方向的共振角度降低，以便發射光可以完全侷限在抽取區域內。第二個增加效率的方法是讓共振波長和量子井釋放的波長有些微差異，這方法和 RCLED 的溫度表現有密確的關係，我們將在後面的溫度特性表現一節，再做更詳細的分析說明。

2.3 布拉格反射鏡 (Distributed Bragg Reflector)

RCLED 共振腔元件需要有兩個高反射率的反射鏡，圖 2-7 顯示各種不同可當作高反射率的物質，由左至右有金屬反射鏡、分佈式布拉格反射鏡 (Distributed Bragg Reflector, DBR)、混合型反射鏡和內全反射 (totally internal reflection, TIR) 的反射鏡，四反射鏡圖形下面分別是各自的反射率值和穿透率值；由這些值比較得知金屬反射鏡和混合型反射鏡皆會吸收，而且穿透率接近零，因此不適合當作發光元件的反射鏡；內全反射反射鏡需有較大的入射角，才能達到高的反射率，這與我們希望的垂直方向共振的條件不符；布拉格反射鏡是將 20 到 30 種不同的透明材料的交互層疊構成，每層厚度約為 $1/4$ 光波長，藉由干涉的效應 DBR 界面上的所有反射光可累加形成對特定波長具有高反射率的反射鏡。圖 2-8 是金屬鏡和 DBR 的反射光譜比較，金屬反射鏡顯示出一高反射率的寬廣帶，而 DBR 則是一高反射率的狹窄帶，此窄帶被稱之為停止帶 (stop band)，我們可以找到合適的 DBR，使發光元件的發光波長剛好落在停止帶上，其餘不想要的波段則落在停止帶以外的區域，這種對波長的選擇性使發光波長被允許停留在兩 DBR 之間的共振腔內，增加單一波長被共振射出的機會，因此 DBR 是最適合當作發光元件的反射鏡。

考慮一個包含有兩電介質、非損耗物質且 m 週期的 DBR，這兩層物質的厚度分別是發光波長的 $1/4$ 倍，也就是 $L_1 = \lambda_{\text{Bragg}} / 4n_1$ 和 $L_2 = \lambda_{\text{Bragg}} / 4n_2$ (L_1 、

L_2 和 n_1 、 n_2 分別是兩物質的厚度及折射率)，DBR的週期是 L_1+L_2 。藉由入射的Fresnel方程式，單獨介面的反射率(reflectivity)是

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.6)$$

在DBR其他面上的多層反射波的建設性干涉影響下，隨著周期數的增加，反射率也跟著提高，而且在布拉格波長 λ_{Bragg} 之下，反射率有一最大值。對布拉格波長言，一個具有1/4波長厚度及m週期的布拉格反射鏡，它的反射率值為

$$R_{\text{DBR}} = |r_{\text{DBR}}|^2 = \left(\frac{1 - (n_1/n_2)^{2m}}{1 + (n_1/n_2)^{2m}} \right)^2 \quad (2.7)$$

透過上式我們不僅可知DBR的反射率值與兩個組成物質的折射率差 Δn 有關，而且可以得知兩種DBR的特性：(1)若DBR有非常高的層數或週期數，則反射率值接近100%，(2)若兩組成物質的折射率差 Δn 越大，則DBR不需很多層數即可有高的反射率，因此我們希望DBR有愈多的週期數來增加反射率，而且DBR的兩組成物需有高、低的光折射率結構。

在實際的應用上，RCLED對DBR的要求並不像VCSEL需有極高的反射率，所以製造上較VCSEL容易許多，這也是RCLED優於VCSEL元件的其中一個優點。為了達到RCLED的最高發光功率和溫度的低靈敏性，有兩個重

要的設計規則:

$$(1 - R_{out}) > (1 - R_{back}) \quad (2.8)$$

$$\xi(2\alpha L) < (1 - R_{out}) \quad (2.9)$$

第一個式子說明了光輸出面的反射鏡之反射率 R_{out} 必須大於另一面反射鏡的反射率 R_{back} ，以便耦合主要的光線可進入輸出方向。第二個式子陳述光在共振腔內來回的部份吸收損失，必須小於輸出反射鏡的穿透率，式子中的 αL 是在沒有共振腔效應下，光通過共振腔的吸收程度，係數 ξ 則是共振駐波的電場波腹裡的加強因子，有值介於 1 和 2 之間，對較厚的共振腔而言 ξ 值約為 1，對細薄的共振腔而言 ξ 值約為 2，第二條件的關係，亦為在對應的光波長下及特定的操作溫度之下，共振腔的自我吸收的功率小於腔體共振輸出功率。

2.4 發光波長對操作溫度的依賴性

在操作 RCLED 時，元件所施加的電流會經歷多層反射鏡的阻抗，而導致元件的操作溫度隨電流增加而上升。由(2.3)式得知腔體的共振模態與共振腔的光折射係數和厚度有關，當元件的溫度增加時，厚度和折射係數會些微的增加而促使共振模態往長波長方向移動。另外從量子井處放射的波長也與溫度的變化有關，發光物質的能隙會因操作溫度的增加而縮小，導致增益光譜如同共振模態波長一樣往長波長的方向移動，此兩波長之間的

相對增加量會影響 RCLED 的輸出功率和光譜特性。我們可以舉一個簡單的例子來觀察這些現象：在操作溫度 300k 時，一個以 GaAs 材料為基底的 Fabry-Perot 共振腔，腔長和光折射率各為 n 和 ℓ ，由 2-2 節的共振腔理論得知，第 m 階共振模態的波長是：

$$\lambda_m = \frac{2n\ell}{m} \quad (2.10)$$

因溫度的增加而導致共振波長的偏移為(在溫度 300 °k 時，熱膨脹係數 α 為 $5.5 \times 10^{-6} \text{ k}^{-1}$ [10])：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda_m}{\partial T} &= \lambda_{m_0} \left[\frac{\partial(n/n_0)}{\partial T} + \frac{\partial(\ell/\ell_0)}{\partial T} \right] \\ &= \lambda_{m_0} \left[4.5 \times 10^{-5} + 5.5 \times 10^{-6} \right] \\ &= \lambda_{m_0} \cdot 5.05 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1} \end{aligned} \quad (2.11)$$

上式的 m_0, n_0, ℓ_0 表示初始狀態下的共振模態、折射率和腔長。若在此 GaAs 為基底的材料上 λ_{m_0} 是 1000 nm，受到溫度增加的影響，共振波長會有一個偏移量：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda_m}{\partial T} &= 0.0505 \text{ nm}^\circ\text{C}^{-1} \\ &\equiv \frac{\partial \lambda_{\text{FP}}}{\partial T} \end{aligned} \quad (2.12)$$

另外在InGaAs/GaAs的量子井中，符合量子井放射能量 E_{QW} 的放射波長 λ_{QW} 為：

$$\lambda_{QW} = \frac{hc}{E_{QW}} \quad (2.13)$$

當量子井放射波長為1000nm時， λ_{QW} 隨溫度的偏移量為：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \lambda_{QW}}{\partial T} &= - \frac{\lambda_{QW}}{E_{QW}} \frac{\partial E_{QW}}{\partial T} \\ &= 0.3644 \text{nm}^{\circ}\text{C}^{-1} \end{aligned} \quad (2.14)$$

觀察(2.12)和(2.14)式，共振模態波長和量子井放射波長對溫度的相對偏移量為：

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \frac{\partial \lambda_{QW}}{\partial T} - \frac{\partial \lambda_{FP}}{\partial T} = 0.3139 \text{nm}^{\circ}\text{C}^{-1} \quad (2.15)$$

上式表明在同樣的初始波長之下，量子井放射波長對溫度上升時的偏移量會比共振波長的偏移量大上許多，兩波長一旦失調，元件所輸出的光功率和其抽取效率將會降低，為了解決此一問題，一般的RCLED在設計時會讓共振波長大於量子井放射波長，也就是有一個正的 $\Delta\lambda_{\text{detuning}}$ 。此處 $\Delta\lambda_{\text{detuning}}$ 定義為

$$\Delta\lambda_{\text{detuning}} \equiv \lambda_{\text{FP}} - \lambda_{\text{QW}} \quad (2.16)$$

RCLED 若依此設計製造，共振模態下的發射光將不會沿垂直腔體方向上射出，而是稍微的傾斜，再經過適當的調整，這些傾斜光線將落在抽取的圓錐體內，使 RCLED 有高的抽取效率和溫度穩定性[11,12]，如圖 2-6 所示，這也是 RCLED 的遠場圖形會被稱為兔子耳朵(rabbit ears)的原因。



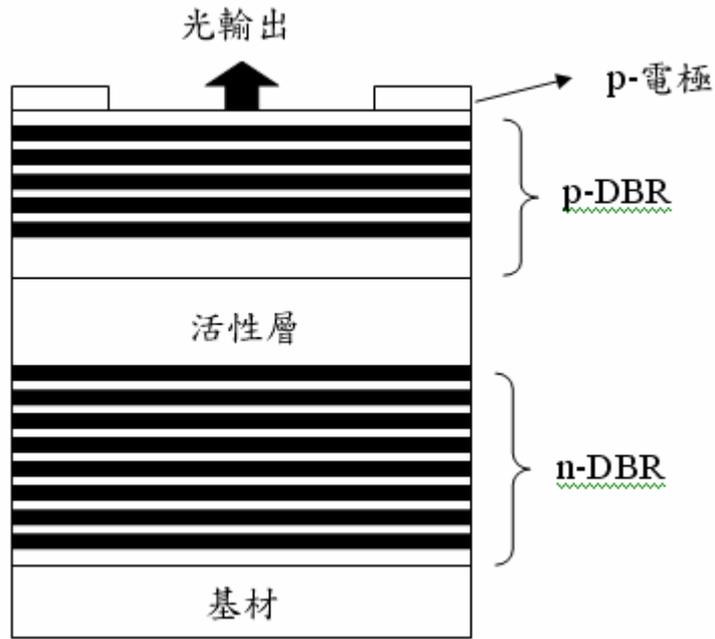


圖 2-1：RCLED 的各層結構。

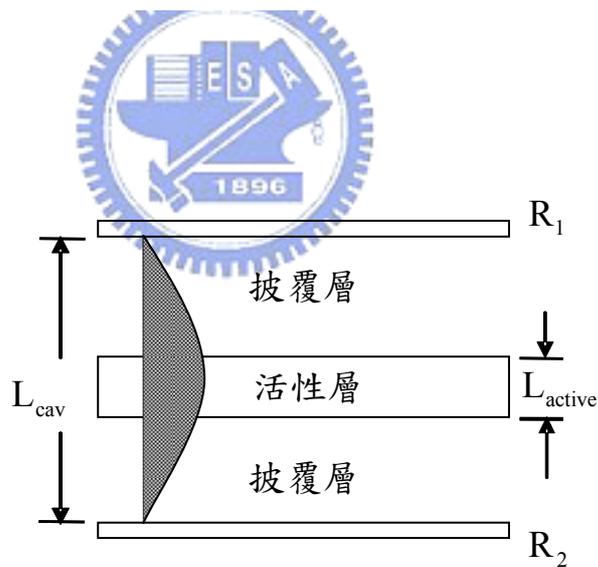


圖 2-2：包含有兩個反射率為 R_1 、 R_2 的反射鏡的共振腔結構圖。活性層有一厚度 L_{active} 和吸收係數 α 。共振腔長度 L_{cav} 為 $\lambda/2$ 。此圖也顯示光在共振腔裡形成駐波。

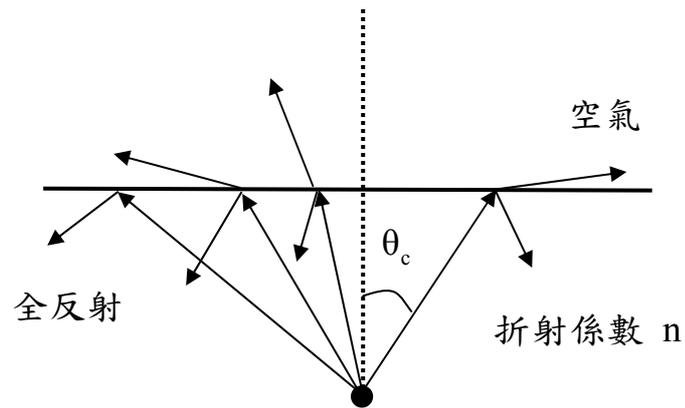


圖 2-3: 在半導體和空氣的界面間，對點光源而言的入射、折射、和全反射圖。

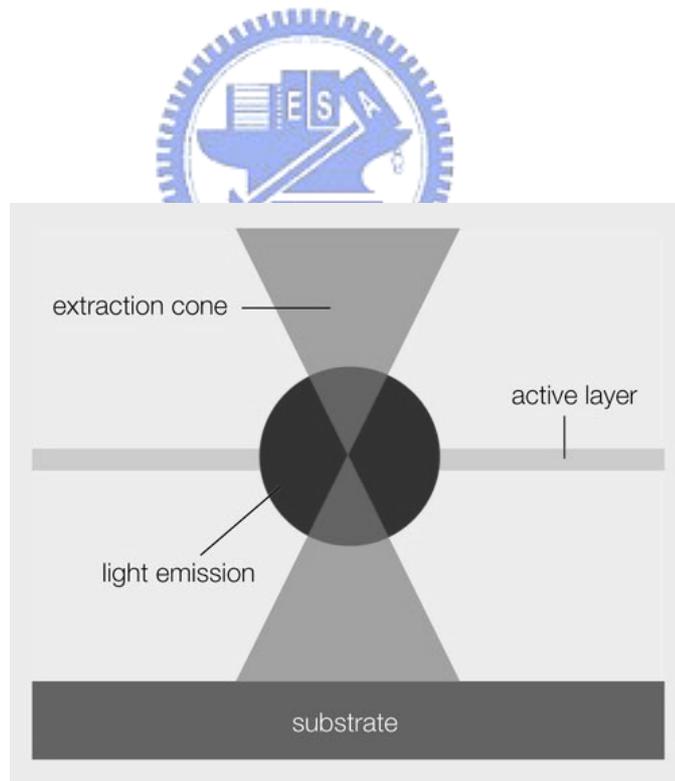


圖 2-4: 光線可脫離半導體的圓錐區域。傳統 LED 的放射光為等向性光源，只有小部分的光可以被抽取出來。

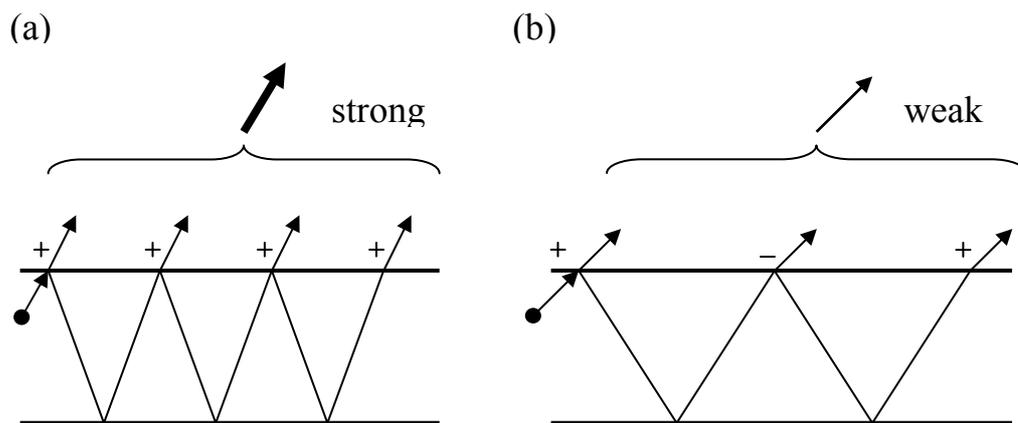


圖 2-5：共振腔內形成的(a)增強放射和(b)抑制放射。

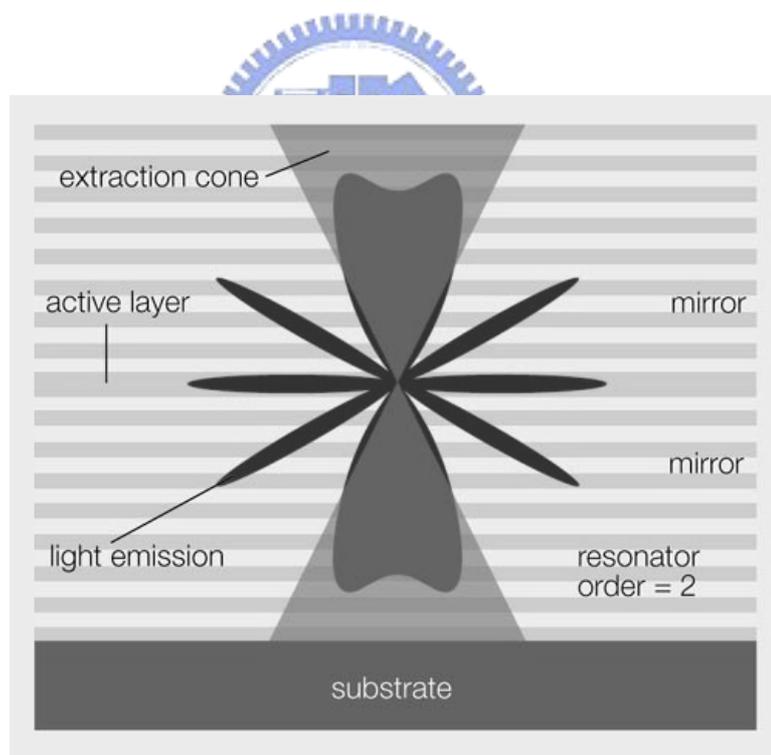


圖 2-6：共振腔內的共振模態調制自發性放射光的示意圖。

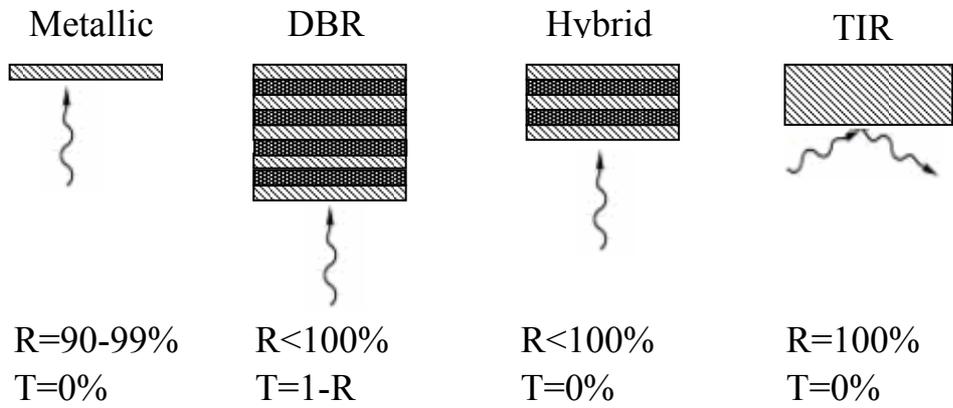


圖 2-7： 可用為具有高反射率的各種結構，左至右:金屬反射鏡、分佈式布拉格反射鏡(Distributed Bragg Reflector，DBR)、混合型反射鏡和全反射(TIR)的反射鏡

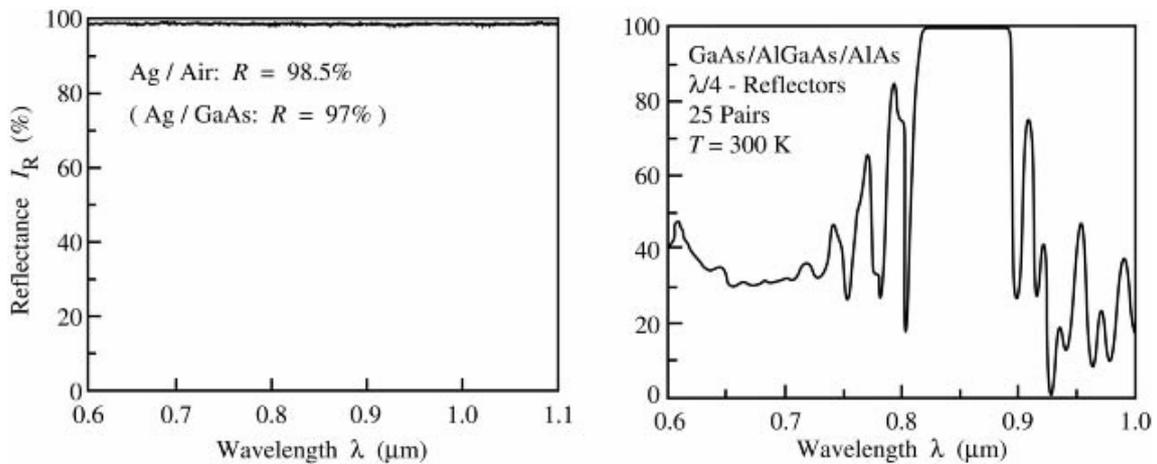


圖 2-8： 銀金屬反射鏡和 25 週期 AlAs/GaAs DBR 的反射率圖。

第三章 RCLED 的製作

本章中，我們將解說實驗用的 RCLED 磊晶結構和 RCLED 元件的製程。

3.1 RCLED 的磊晶結構

經由前兩章的介紹可知，波長 650 nm 的 RCLED 對塑膠光纖通訊上有應用上的價值與需要。本論文針對 650 nm 波段的共振腔發光二極體進行結構設計、元件製作、及特性量測的研究，並據以分析探討這些元件的光電特性。



我們的 RCLED 結構具有一個波長厚的共振腔，腔內的活性層是由三週期 $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{P}$ 的量子井所組成，厚度分別為 8 nm 和 10 nm，活性區兩端的能障層和披覆層 (cladding layer) 採用的材料分別是 $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 和 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ ，厚度各為 40 nm 和 30 nm，上層和下層 DBR 分別使用 10 週期和 30 週期的 $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 。另外為了防止上層 DBR 的氧化，RCLED 結構的上層覆蓋 10 nm 厚的 GaAs。

3.2 光罩設計

我們設計四道光罩來製造 RCLED，製程上所需的微影條件(例如:曝

光、烘烤和顯影時間等)和製程順序皆經過詳細的討論和測試，以期完成的元件接近原本所設計的預期結構結果。在本節中，我們依製造上的順序分別說明這四道光罩的設計及其用途。

(1) 平台蝕刻光罩

一開始我們先在磊晶面上鋪上一層 SiO_2 來當作蝕刻用的硬式光罩，接著以平台(mesa)蝕刻光罩的圖形進行微影製程，使光罩上的圖案完整的轉移到氧化層上。我們使用高密度電漿(High Density Plasma, HDP)蝕刻樣品至共振腔的上緣，以使用來形成平台結構和分離每一個元件。圖 3-1 顯示的側面結構是經平台蝕刻製程的完成圖，每個元件皆有直徑 $300\ \mu\text{m}$ 大小的圓形平台。



(2) 離子佈植光罩

為了形成電流的侷限和設定元件的窗口(aperture)，我們植入氫(H)離子到上半部 p-DBR 的最底層。圖 3-2 顯示的側面結構是經離子佈植製程的完成圖，斜線部分是植入 H 離子的區域。為了研究不同窗口尺寸的發光特性。我們設計窗口尺寸有 5 種大小，它們的直徑分別是 80、110、140、170 和 $200\ \mu\text{m}$ 。

(3) 接觸開口光罩

我們先在樣品的表面上成長氧化層來防止磊晶片氧化。氧化層成長之後，我們以接觸開口光罩及相關製程，蝕刻出開口作為其後所蒸鍍金屬的

歐姆接觸處。為了讓電流均勻通過窗口，我們設計接觸開口的形狀為 $10\ \mu\text{m}$ 寬的圓環和 $5\ \mu\text{m}$ 寬的格子(在所有的結構變化中，格子狀的開口位置和寬度皆為相同)，如圖 3-3 顯示經接觸開口製程後的完成圖和接觸開口的圖案。另外在圓環接觸開口的邊緣(或 p-電極邊緣)和窗口邊緣的位移量 d 項，我們設計三種條件，分別是 $d = -5$ 、 0 、及 $5\ \mu\text{m}$ ，如圖 3-4 顯示此三種變化的結構側面圖。

(4) 完成接觸開口製程的結構側面圖光罩

在氧化層開口完成後，我們以金屬蒸鍍光罩進行微影製程，之後鍍上 Ti/Pt/Au 等金屬，並以 lift-off 技術移除不必要之金屬來形成 p 電極。金屬蒸鍍的光罩圖案與接觸開口光罩的圖案相似，惟前者的格子狀的長條寬度較後者的大了約 $2\ \mu\text{m}$ 以及前者多了 pad(探針觸及之處)的設計。圖 3-5 顯示金屬蒸鍍及製程完成的結構側面圖和俯視圖，圖中的直線區域是 p 電極。

3.3 RCLED 的製程

以上所提及的四道光罩，我們已簡述其設計目的和功用，在這一節中，我們將更仔細的介紹製作 RCLED 的步驟和製程條件。

3.3.1 晶片清洗

(1) 在 ACE 溶液裡浸泡 RCLED 晶片且超音波震盪 5 分鐘。

- (2) 在 IPA 溶液裡浸泡 RCLED 晶片且超音波震盪 5 分鐘。
- (3) 使用 DI water 清洗晶片。
- (4) 使用氮氣吹乾晶片。
- (5) 在 BOE 溶液裡浸泡 RCLED 晶片 1 分鐘。
- (6) 使用氮氣吹乾晶片。

3.3.2 平台蝕刻

- (1) 沉積 SiO_2 :

藉由電漿輔助化學氣相沉積系統(PECVD)的幫助，我們在晶片上成長 500 nm 厚的 SiO_2 來當作蝕刻用的硬式光罩。

- (2) 在晶片上塗佈正光阻。光阻塗佈機的首轉速度是 500 rpm、5 秒；第二旋轉速度是 3500 rpm、5 秒。
- (3) 預烤晶片 120 °C、2 分鐘。
- (4) 使用光罩對準系統和平台蝕刻光罩，且曝光晶片 150 秒。
- (5) 顯影晶片 45 秒。
- (6) 硬烤 120 °C、分鐘。
- (7) 硬式光罩蝕刻(或 SiO_2 蝕刻):
使用反應離子蝕刻機(RIE)蝕刻 SiO_2 。
- (8) 依序在 ACE 和 IPA 溶液中浸泡晶片，以便移除光阻。
- (9) 硬烤 120°C、10 分鐘。

(10) 蝕刻晶片：

使用高密度電漿(HDP)蝕刻晶片至共振腔的上緣。蝕刻結果： SiO_2 蝕刻率是 25.7 nm/min。蝕刻後，使用 α -step 測得蝕刻深度為 1327 nm。

(11) 清除硬式光罩(SiO_2):

使用感應耦合電漿蝕刻機(ICP)移除 SiO_2 。清除之後測得平台的高度是 810 nm。這值接近我們預先設計的蝕刻深度(p-DBR 厚度和 GaAs 厚度為 801 nm)。

3.3.3 離子佈植

為了能達到較好的電流侷限，我們希望植入離子的深度在上層 DBR 的最底層，也就是植入深度為 800 nm。藉由“Trim”軟體，我們模擬在 800 nm 的蝕刻深度下須植入能量為 85 keV。我們利用中電流源離子佈植機(ion implanter)來完成植入離子的工作。以下為這道製程的實驗步驟。

(1) 烘烤晶片 120 °C、10 分鐘。

(2) 在晶片上塗佈正光阻。光阻塗佈機的首轉速度是 500 rpm、5 秒；第二旋轉速度是 3500 rpm、25 秒。

(3) 預烤晶片 100 °C、90 秒。

(4) 使用光罩對準系統和離子佈植光罩，且曝光 30 秒。

(5) 顯影晶片 2 分鐘。

(6) 硬烤 120 °C、5 分鐘。

(7) 植入 H 離子以形成電流侷限。植入能量為 85 keV，且植入密度為 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。

(8) 移除光阻：

依序在 ACE 和 IPA 溶液中浸泡晶片。接著再用電漿 O₂ 清除剩餘的光阻。

3.3.4 接觸開口

(1) 沉積 SiO₂：

使用 PECVD 在晶片上成長 110 nm 厚的 SiO₂ 來保護晶片。

(2) 在晶片上塗佈負光阻。光阻塗佈機的首轉速度是 500 rpm、5 秒；第二
旋轉速度是 3500 rpm、25 秒。

(3) 預烤晶片 100 °C、1 分鐘。

(4) 使用光罩對準系統和接觸開口光罩，且曝光晶片 4 秒。

(5) 烘烤晶片 120 °C、2 分鐘。

(6) 空曝 35 秒。

(7) 使用 QDR 顯影晶片 40 秒。

(8) 硬烤 120 °C、5 分鐘。

(9) 使用 ICP 蝕刻 SiO₂。

(10) 移除光阻。



3.3.5 金屬蒸鍍

- (1) 在晶片上塗佈負光阻。光阻塗佈機的首轉速度是 500 rpm 並費時 5 秒；
第二旋轉速度是 3500 rpm、25 秒。
- (2) 預烤晶片 100 °C、1 分鐘。
- (3) 使用光罩對準系統和金屬蒸鍍光罩，且曝光晶片 4 秒。
- (4) 烘烤晶片 120 °C、2 分鐘。
- (5) 空曝 35 秒。
- (6) 使用 QDR 顯影晶片 40 秒。
- (7) 硬烤 120 °C、5 分鐘。
- (8) 使用電子槍蒸鍍系統(E-Gun Evaporator)蒸鍍金屬 Ti (30 nm)/Pt (20 nm)/Au (300 nm)。
- (9) 採用光阻剝落法(lift-off)，移除不需要的金屬。
- (10) 退火。
- (11) 磨薄晶片的基板。
- (12) 使用電子槍蒸鍍系統蒸鍍背面金屬 AuGe (50 nm)/Ni (25 nm)/Au (300 nm)，以便形成 n 型電極。
- (13) 元件初步製作完成



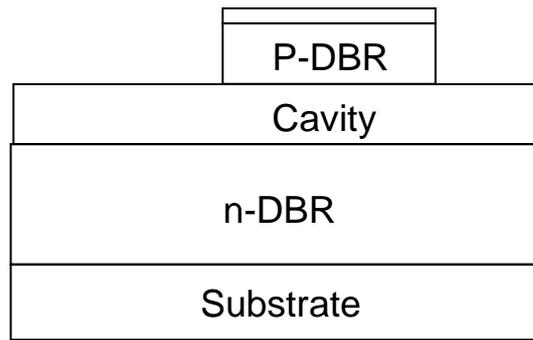


圖 3-1: 完成平台蝕刻製程的結構側面圖。

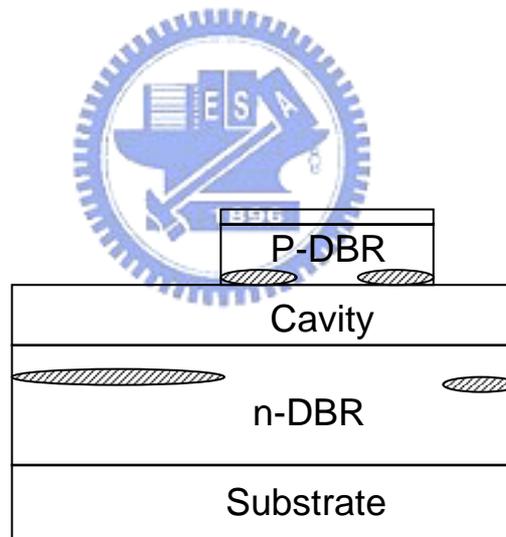


圖 3-2: 完成離子佈植製程的結構側面圖。

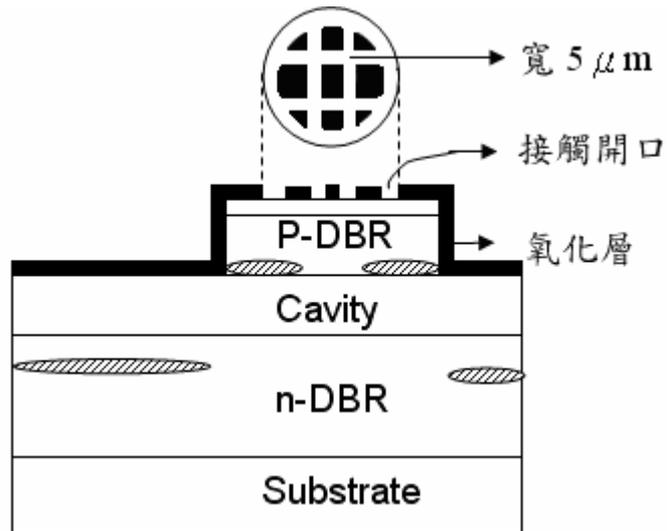


圖 3-3: 完成接觸開口製程的結構側面圖。

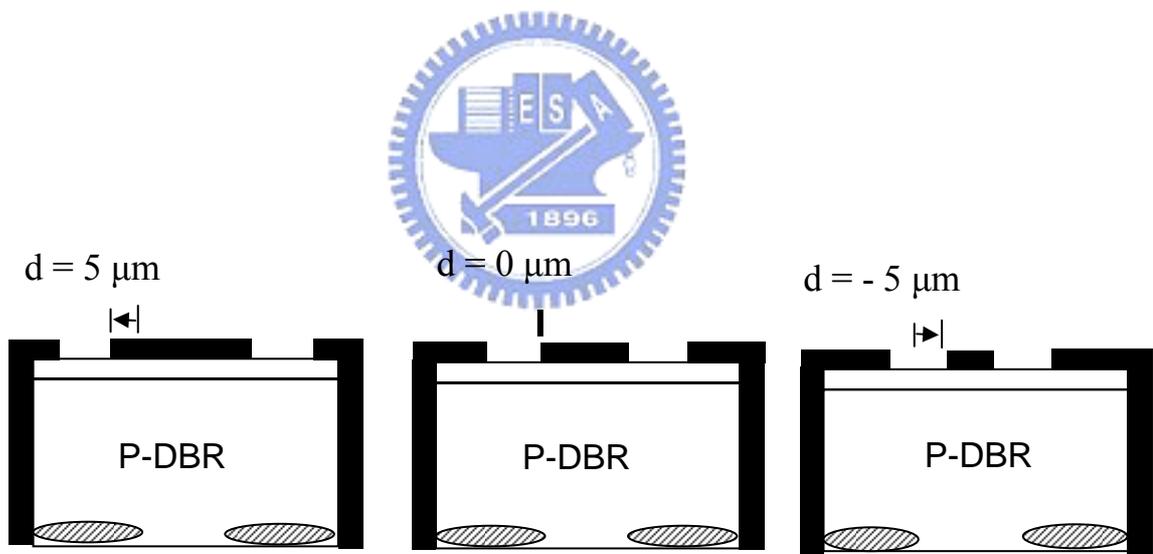


圖 3-4: RCLED 的三種變化。由左至右分別為 $d = 5$ 、 0 、及 $-5 \mu\text{m}$ 。

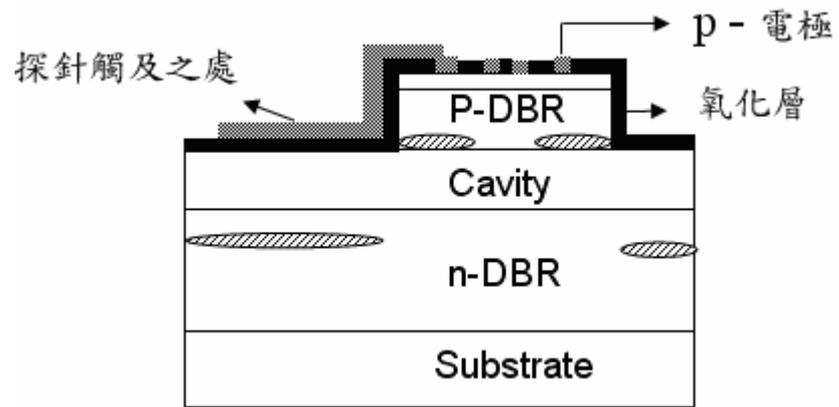


圖 3-5: 完成金屬蒸鍍製程的結構側面圖。



第四章 結果與討論

我們模擬磊晶片的反射光譜，接著在對完成的 RCLED 元件作一系列的光性和電性的量測、及分析實驗數據。這些量測包括了電壓對電流(I-V)量測、光功率對電流量測(L-I)、光譜分析(spectral)和遠場 (far-field) 量測等。依第三章解說的製程步驟，我們製造出不同結構的 RCLED 元件，圖 4-1 顯示其中一個製作完成元件的側面圖，p-DBR 的底部因 H 離子的植入而形成電流侷限的窗口(aperture)，我們設計 5 種不同尺寸的窗口，分別是直徑 80、110、140、170 和 200 μm 。而就 p-電極的邊緣和窗口邊緣的位移量 d 項，我們設計三種條件，分別是 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ ，如圖 4-2 顯示。表 4-1 列出我們所設計的 RCLED 的結構參數。

表 4-1: RCLED 的所有結構參數

| | 結構參數(單位: μm) | | | | |
|----------|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| aperture | 80 | 110 | 140 | 170 | 200 |
| d | -5, 0, 5 | -5, 0, 5 | -5, 0, 5 | -5, 0, 5 | -5, 0, 5 |

4.1 反射光譜的模擬

為了分析 RCLED 磊晶片發光波長是否在 650 nm 的工作範圍，我們使用薄膜設計的軟體 Essential Macleod 來模擬 RCLED 磊晶片的反射率光譜，圖 4-3 和圖 4-4 分別是 8 週期 DBR 和 32 週期 DBR 的反射率光譜，DBR 材

料都是 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$ 的週期堆疊。當 DBR 只有 8 個週期時，反射率最高值發生在波長 654.5 nm 處，這與我們要希望的發光波長 650 nm 有 4.5 nm 的差距。當 DBR 層數增加到 32 週期時，最高反射率值接近於 100%，圖形中有一 40 nm 寬的 stop band，此 stop band 的中心波長大約在 654 nm 附近，同 8 週期的最高反射率波長。圖 4-5 所顯示的是模擬 RCLED 樣品結構下的反射率光譜圖。依據光學理論，若在兩個高反射率 DBR 中夾入一個半波長整數倍的薄膜時，兩個 DBR 之間的反射光會產生破壞性干涉，stop band 的中心波長處會產生較高的穿透率（相對的形成較小的反射率）。此光譜變化關係可用以判斷 RCLED 的共振波長是否在 stop band 之中。從圖 4-5 我們發現在 stop band 中有一個反射率光譜圖形低陷的特徵位於波長 654 nm 處，由此可知我們設計的 RCLED 發光波長是在 654 nm。



4.2 RCLED 電流-電壓(I-V)特性量測

圖 4-6 顯示電流-電壓量測樣品的裝置圖。將製作完成而未切割的 RCLED 樣品固定在一個連接負電極的導體檯面上，在樣品上方有一連接正電極的探針，此探針可受電腦控制而自動接觸晶片上的 RCLED 元件。我們以一台電壓-電流的量測儀器連接探針，並把所測得的電性資料傳送到電腦來處理。圖 4-7 是在 $d = -5 \mu\text{m}$ 下 5 種不同窗口尺寸 RCLED 的電流-電壓圖，這些 RCLED 的開啟電壓皆在 2.75 V 和 3.21 V 之間，當電壓相同時電

流隨著窗口增大而增加，經過一些計算可得電阻值約略正比於窗口半徑的平方，此符合電阻原理。表 4-2 呈現這 5 種窗口尺寸 RCLED 的開啟電壓和在 20 mA 下的電阻值，在一般的操作電流 20 mA 時，5 種窗口尺寸 RCLED 的電阻值在 19 Ω 和 30 Ω 之間，這些值連同開啟電壓都高於文獻上所記載的資料[13,14]，我們推測可能是第二道製程用來阻擋 H 離子的光阻沒有清除乾淨，或是要鍍 p 電極金屬前的晶面表面有雜質，這些剩餘的光阻和雜質阻礙了電流的傳輸，導致電阻值和開啟電壓有較高的值。

表 4-2: 5 種窗口尺寸 RCLED 的開啟電壓和在 20mA 下的電阻值。

| | | | | | |
|--|------|------|-------|------|-------|
| Aperture size (μm) | 200 | 170 | 140 | 110 | 80 |
| Turn on voltage (V) | 2.75 | 2.77 | 2.858 | 2.92 | 3.214 |
| Series resistance (Ω) (at 20 mA) | 20 | 28 | 30 | 30 | 19 |

4.3 RCLED 光功率-電流(L-I)特性量測

L-I 的量測儀器系統和 I-V 的量測裝置相似，唯前者在樣品上方多增加一個光功率的偵測器，以便接收 RCLED 所發出的光。圖 4-8 顯示 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = 5 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 圖，最大窗口尺寸 200 μm 在 40 mA 時有最大的輸出光功率 1.18 mW，隨著窗口的減小輸出光功率值降低。圖 4-9 和圖 4-10 分別顯示在 $d = 0 \mu\text{m}$ 和 $d = 5 \mu\text{m}$ 下 5 種窗口尺寸的 L-I 圖，除

除了在 $d = 0 \mu\text{m}$ 與 $d = 5 \mu\text{m}$ 下 $170 \mu\text{m}$ 窗口尺寸 RCLED 的光功率略小之外，其餘光功率和窗口尺寸的趨勢基本上是相似 $d = -5 \mu\text{m}$ RCLED 的發光情形。圖 4-11 顯示 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$)RCLED 的輸出光功率頂峰值隨電流變化關係圖。隨著窗口尺寸的增加光功率頂峰值幾乎成一線性增加。最大窗口的頂峰值發生在最大的電流 40 mA 處，愈小窗口的 RCLED 其飽和電流發生愈早，此特性是因為小窗口的 RCLED 在高電流密度下，自發性放射光譜容易變寬，導致它和共振模態的重疊性(overlap)變差，小窗口的輸出功率因此比大窗口低。圖 4-11 的斜線是這些頂峰值的 fitting 結果，斜線方程式為 $Y = -0.42 + 0.028 \times X (\text{mA} \cdot \text{V})$ 。若仔細觀察這三個 L-I 圖，我們可以發現它們有相同的特徵，窗口尺寸 $80 \mu\text{m}$ 和 $110 \mu\text{m}$ RCLED 的輸出功率比 140 、 170 和 $200 \mu\text{m}$ RCLED 的輸出光功率小很多，我們推測窗口尺寸 $140 \mu\text{m}$ 以上的 RCLED 已有顯著的光子循環效應，較大窗口的元件可以使內部被反射的光沿著活性層吸收再放射，因此增加了光的輸出效率 [15]。圖 4-12 和圖 4-13 分別顯示 $d = 0 \mu\text{m}$ 和 $d = 5 \mu\text{m}$ 下輸出光功率頂峰值隨電流變化關係圖，其光功率頂峰值對窗口尺寸的關係在定性上相似 $d = -5 \mu\text{m}$ 下的 RCLED。

圖 4-14 顯示 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $80 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 關係圖， $d = -5 \mu\text{m}$ 下的 RCLED 在任何電流值時皆有最大的輸出光功率，其頂峰值 0.34 mw 發生在較大的電流 23.5 mA ，而 $d = 5 \mu\text{m}$ 下的 RCLED 則有

最小的輸出功率，其頂峰值發生在較小的電流。圖 4-15 顯示 $d = 5 \mu\text{m}$ 和 $d = -5 \mu\text{m}$ 下，RCLED 元件電流導通路徑圖， $d = -5 \mu\text{m}$ RCLED 的 p 電極雖然延伸到窗口上方擋住了部份的發光面積，然而卻相對 $d = 5 \mu\text{m}$ 下的 RCLED 有較大的電流密度通過窗口而進入活性層，反觀 $d = 5 \mu\text{m}$ 下的 RCLED 除了流進活性區的面積較少外，電流因大量的聚集在邊際而使此元件有較多的內熱，導致功率降低和有較低的飽和電流值 16.5 mA 。圖 4-16、4-17、4-18 和 4-19 分別顯示固定窗口尺寸 110 、 140 、 170 和 $200 \mu\text{m}$ 下 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ RCLED 的 L-I 關係圖，其基本特性和窗口尺寸 $80 \mu\text{m}$ 下 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ 的 L-I 關係相似。



圖 4-20 顯示五種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$) RCLED 之外部量子效率與電流的關係圖，在電流 2 mA 時窗口尺寸 $200 \mu\text{m}$ 下的 RCLED 有最大的量子效率 1.93% ，當窗口尺寸增加時量子效率也跟著變大，形成此特性的原因可能是大窗口的 RCLED 可以藉由光子循環效應增加量子效率，而且 RCLED 在較高的電流密度下，自發性放射光譜變寬而與共振模的重疊性變差。除此之外五種窗口尺寸的 RCLED 皆因高電流下的熱效應，導致量子效率隨電流增加而降低。

4.4 RCLED 光譜特性

圖 4-21 顯示光譜量測系統，為了量測方便我們把晶片分割和封裝成一

顆顆獨立的 TO-can 形式，這些元件和探針放置在一個平台上，調整元件使其所發出的光可以垂直入射至塑膠光纖。使用光截波器(chopper)(操作在 70 Hz 頻率)讓光有一個固定的頻率輸送。光通過光截波器之後聚焦於單光儀(monochromator)的狹縫上，以便分開光內含的每一個波長，這些單色光藉由一個 Si 偵測器來接收，並使用標準的鎖相放大器(lock-in amplifier)來放大訊號，最後實驗的資料由電腦來處理和紀錄分析。圖 4-22 顯示不同注入的電流(2~30 mA)下，窗口 170 μm 、 $d = -5 \mu\text{m}$ RCLED 之光譜圖。圖中顯示隨著電流自 2 到 10 mA 的增加，光譜的強度漸漸上升，而隨著電流自 10 mA 到 30 mA 的增加，光譜的強度卻慢慢的降低，造成如此特性的可能因素是共振的 detuning 效應(量子井發光波長異於共振波長)在電流 10 mA 時已開始有明顯的作用，加上內熱隨著電流的增加而增加，以致於發光強度和波峰值降低。在電流 10 mA 時量子井波長與共振波長有最大的比例重疊，垂直方向的輸出光被加強，這時的波長為 648 nm，半寬高(FWHM)為 16 nm。當電流繼續增加，量子井和共振波長皆因內熱影響而往長波長方向移動，圖 4-23 顯示窗口尺寸 170 μm 、 $d = -5 \mu\text{m}$ RCLED 的峰值波長隨電流變化關係圖，峰值移動率大約是 0.9 nm/mA。圖 4-24 顯示窗口尺寸 80、110、140、170 μm (固定 $d = -5 \mu\text{m}$) RCLED 的峰值波長隨電流變化關係圖(200 μm 的元件在封裝時損毀而無法測量)，圖中顯示峰值移動率不受窗口尺寸所影響，這種特性與實驗前預估的情形不同，我們原先預測較小窗口

的量子井光譜容易變寬且能隙較低，導致其快速的往長波長方向移動，因此最大發光強度發生在小電流和長波長，較大窗口的最大發光強度發生在大電流和短波長，然而圖中的移動率與窗口尺寸無關，這可能是元件無法垂直射入光纖或是沒有水平的黏在 TO-can 的檯坐上，致使光譜有了角度的變因，因此我們也就無法分辨 RCLED 窗口尺寸的光譜關係。

4.5 RCLED 遠場強度分佈

為了進一步了解 EL 光譜所發現的特性，我們觀察遠場光強度分佈和電流的依存關係。遠場強度分佈的量測系統如下所述：垂直裝置元件在一個旋轉台上，此轉台允許改變發射光入射偵測器的角度 θ （相對於元件表面的法線方向），使用固定的光纖來收集 EL，並且利用功率計來偵測。圖 4-25 顯示窗口尺寸 $170\ \mu\text{m}$ 、 $d = -5\ \mu\text{m}$ RCLED 導通 1 mA 電流時之 EL 遠場強度變化圖，最大強度發生在 $\pm 20^\circ$ ，此時的共振波長大於量子井波長。隨著電流的增加， $\Delta\lambda_{\text{detuning}}$ 越來越小，當電流為 12 mA 時雙耳的遠場圖形變成單耳形狀，如圖 4-26 顯示窗口尺寸 $170\ \mu\text{m}$ 、 $d = -5\ \mu\text{m}$ RCLED 導通 12 mA 電流時之 EL 遠場強度變化圖，此時 $\Delta\lambda_{\text{detuning}}$ 為 0，發光強度達到最大值，這結果符合 EL 光譜在電流 10 mA 左右有最大光譜強度。

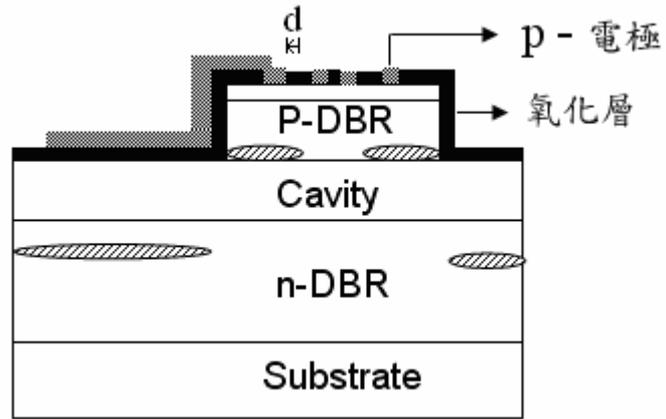


圖 4-1：製作完成的 RCLED 結構側面圖。

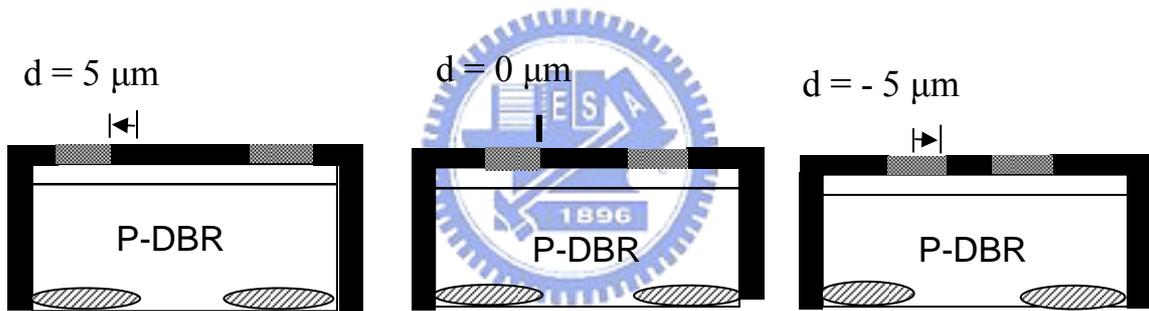


圖 4-2：RCLED 的三種變化。由左至右分別為 $d = 5$ 、 0 、及 $-5 \mu\text{m}$ 。

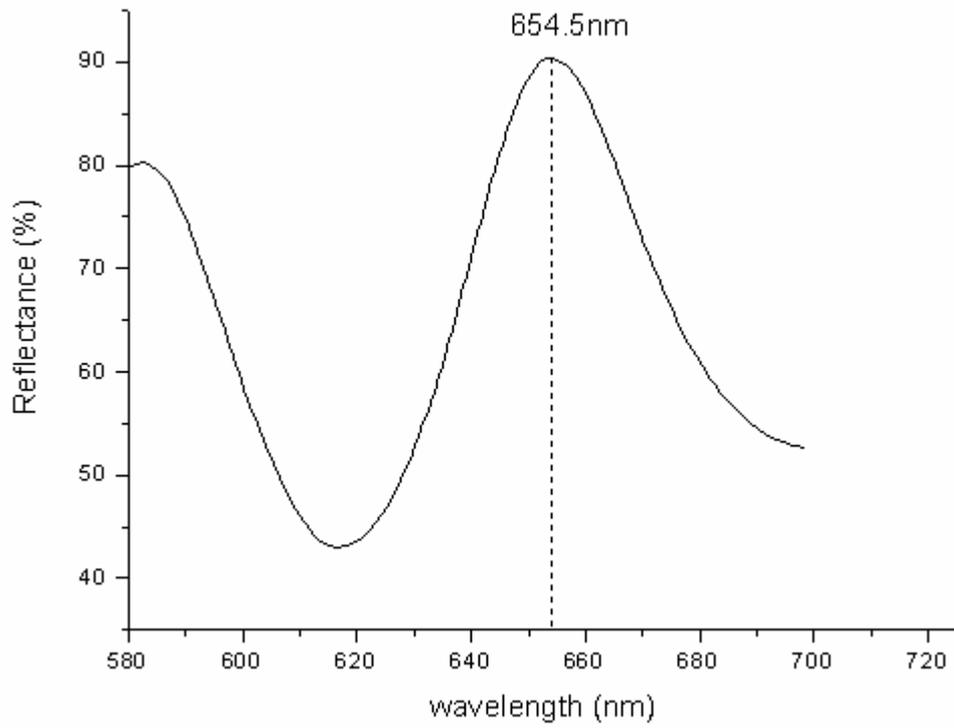


圖 4-3: 8 週期 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$ p-DBR 的反射率光譜。

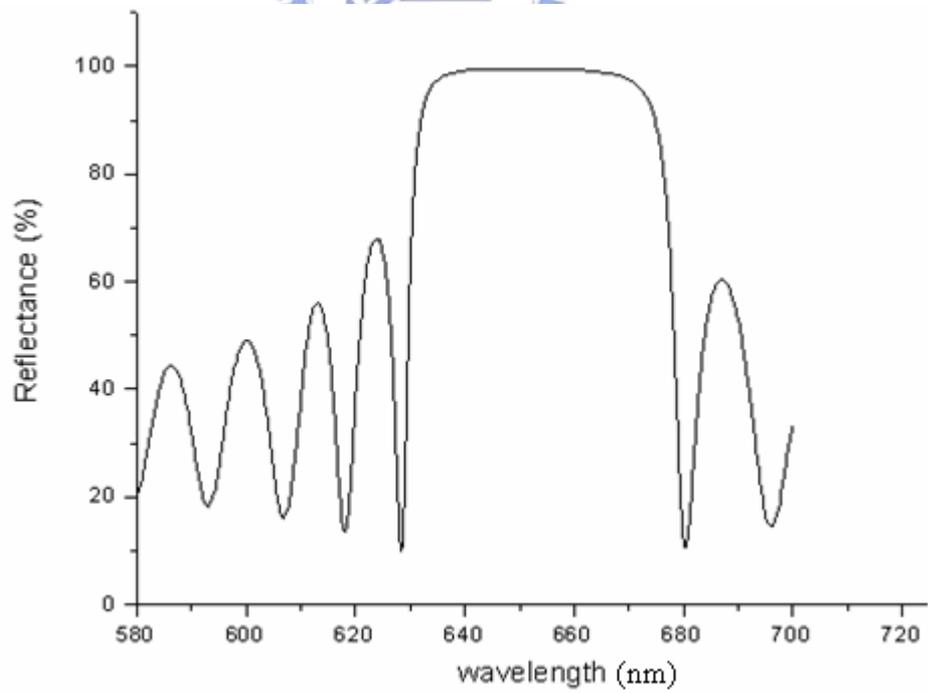


圖 4-4: 32 週期 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$ n-DBR 的反射率光譜。

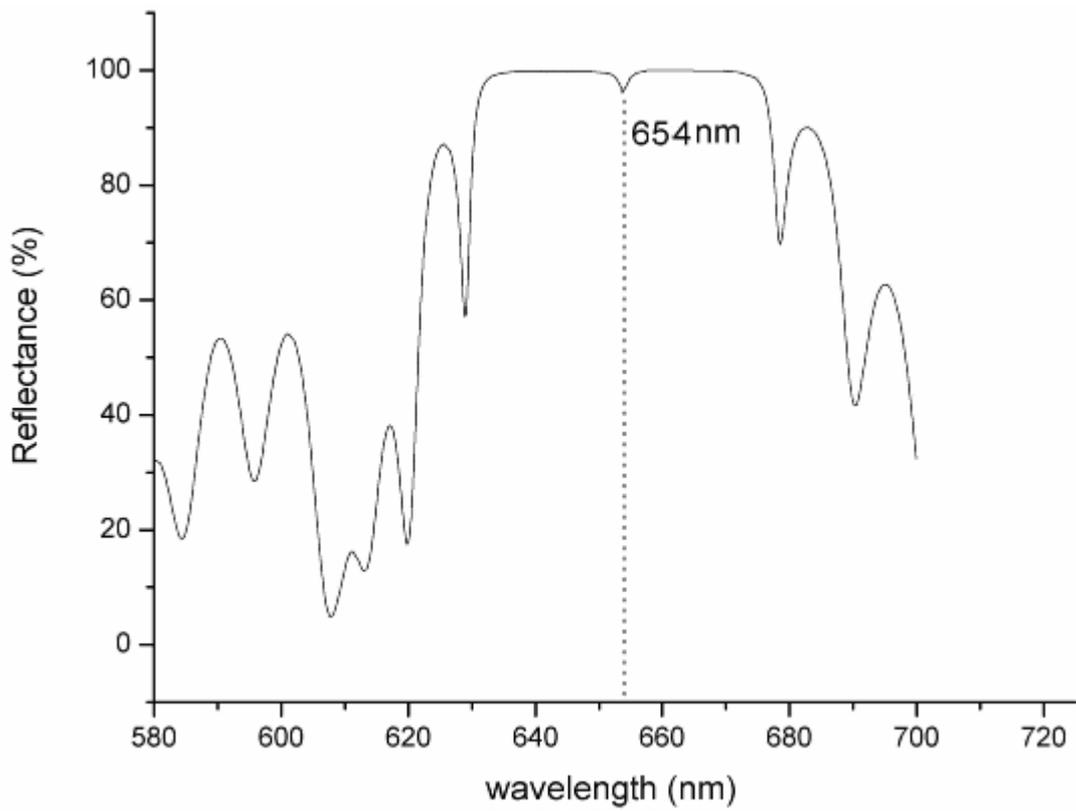


圖 4-5: 整個結構的反射率圖形。

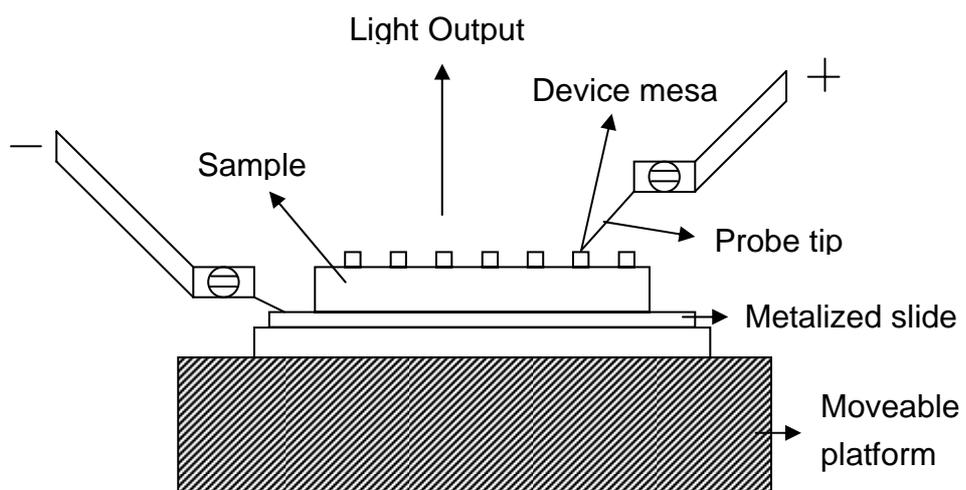


圖 4-6: I-V 量測的系統架構。

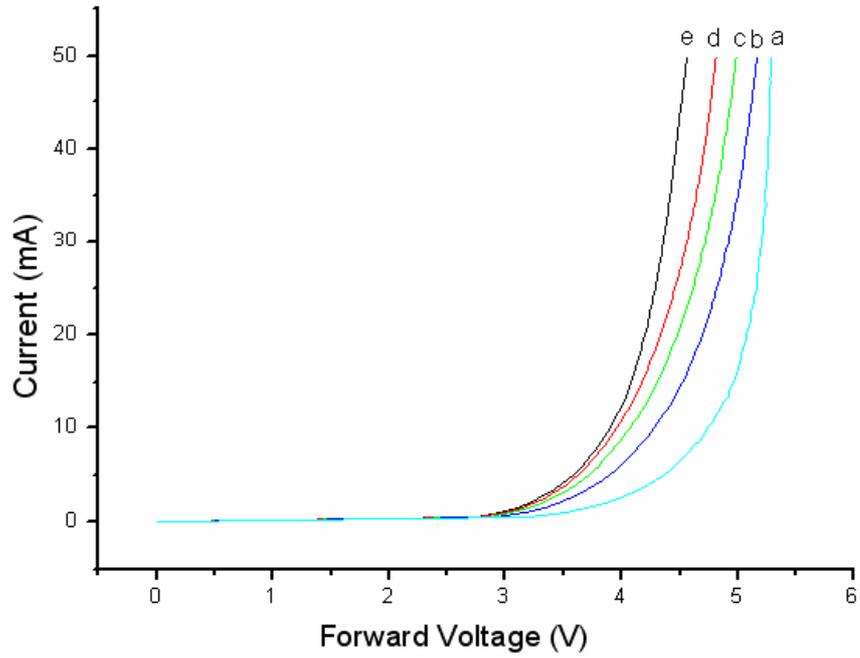


圖 4-7: 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$)之 RCLED 的 I-V 圖。

(a, b, c, d, e 分別為 80, 110, 140, 170, 200 μm)

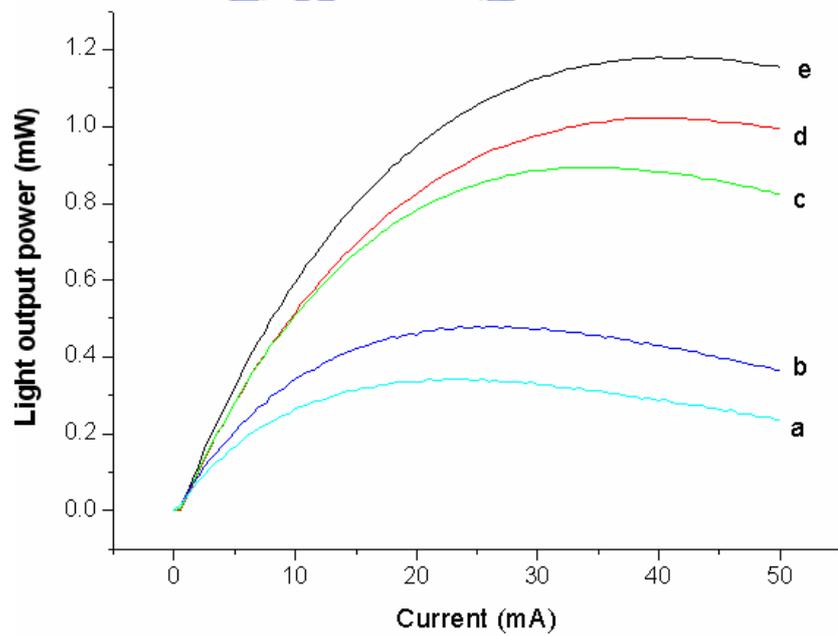


圖 4-8: 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 圖。

(a, b, c, d, e 分別為 80, 110, 140, 170, 200 μm)

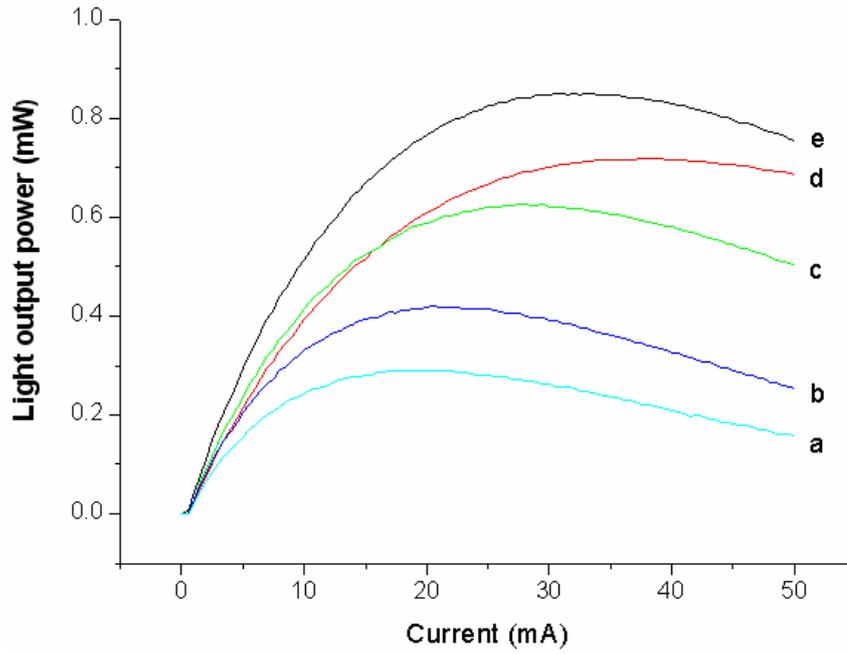


圖 4-9: 5 種不同窗口尺寸(固定 $d=0 \mu\text{m}$)之 RCLED 的 L-I 圖。

(a, b, c, d, e 分別為 80, 110, 140, 170, 200 μm)

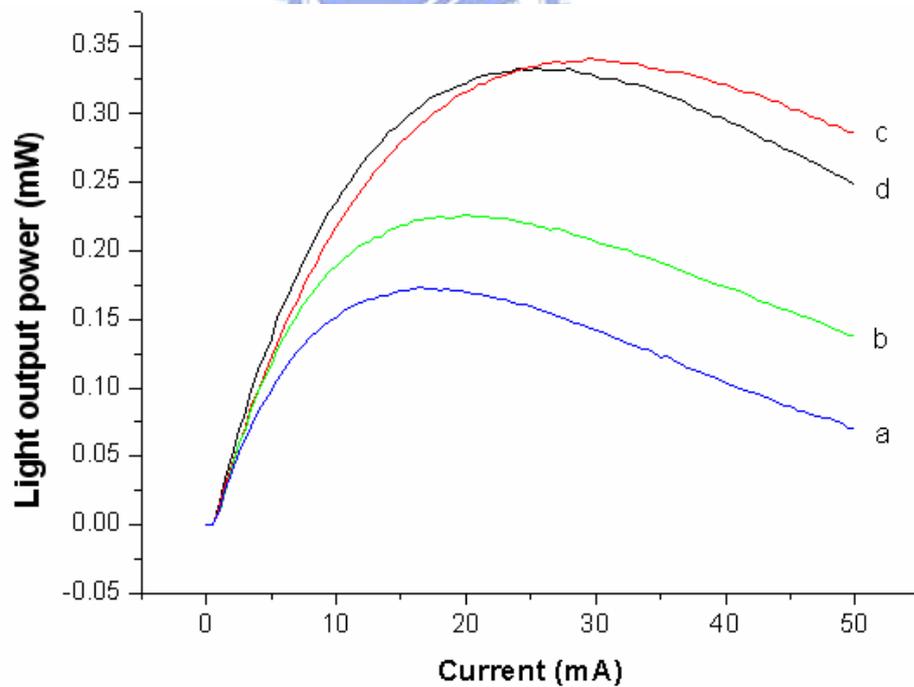


圖 4-10: 5 種不同窗口尺寸(固定 $d=5 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 圖。 (a, b, c, d

分別為 80, 110, 140, 170 μm)

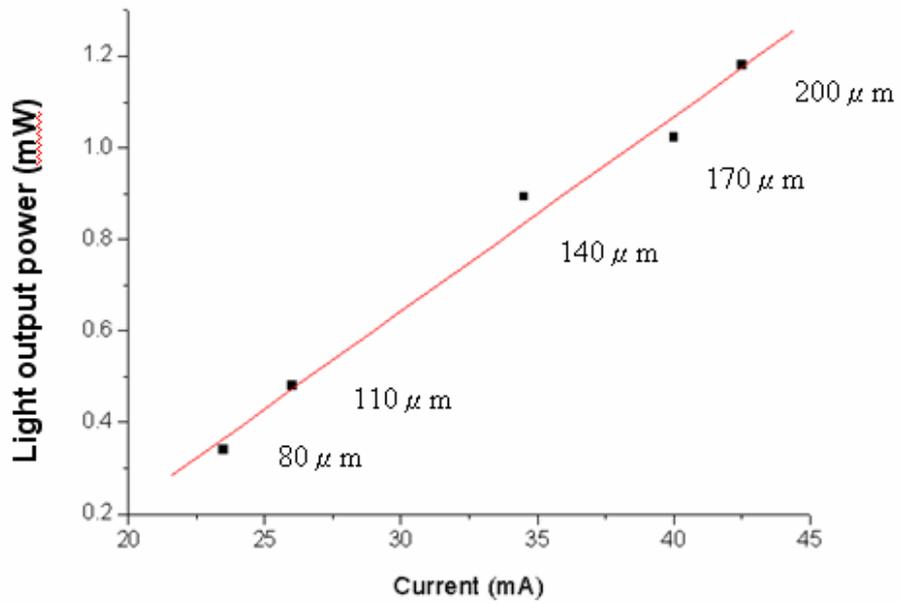


圖 4-11: 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = -5 \mu\text{m}$)RCLED 的輸出光功率頂峰值隨電流變化關係圖。

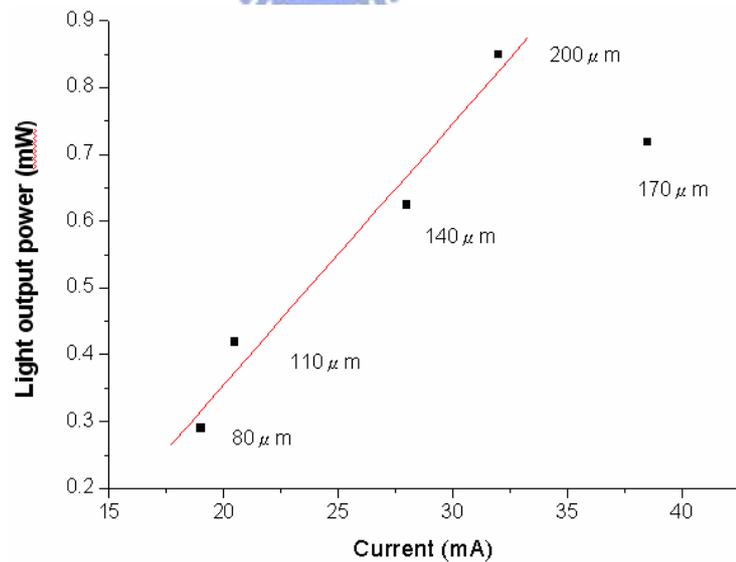


圖 4-12: 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = 0 \mu\text{m}$)RCLED 的輸出光功率頂峰值隨電流變化關係圖。

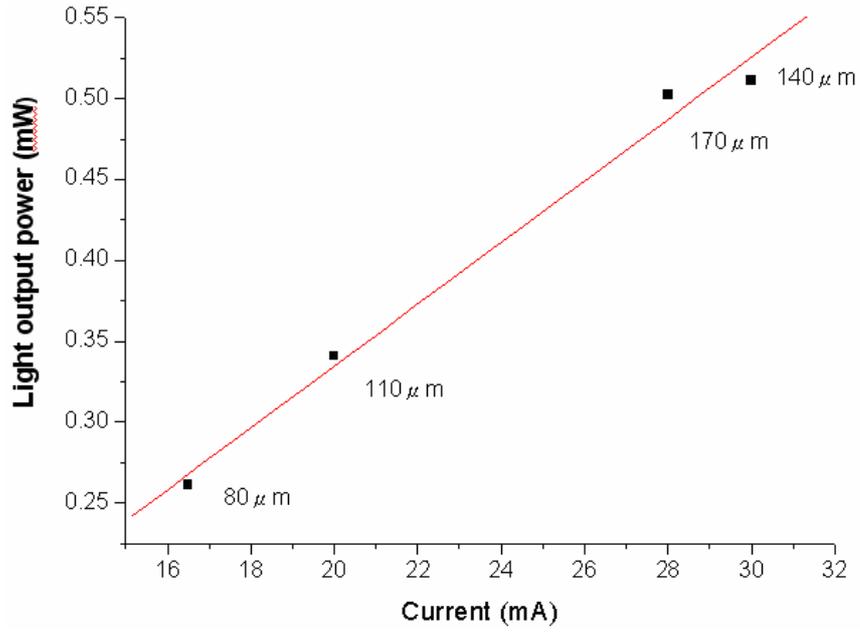


圖 4-13: 5 種不同窗口尺寸(固定 $d = 5 \mu\text{m}$)RCLED 的輸出光功率頂峰值隨

電流變化關係圖。

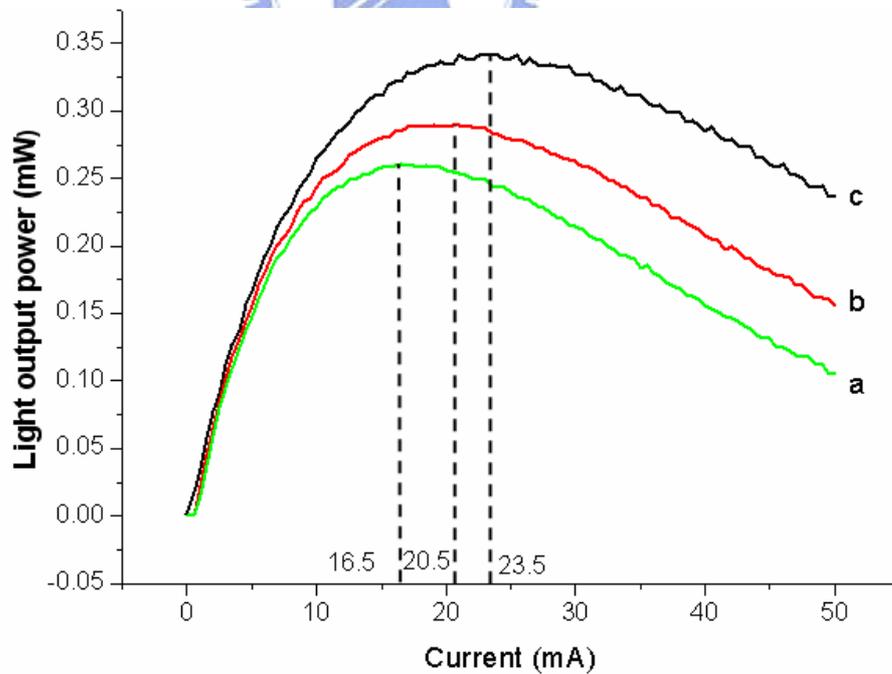


圖 4-14: $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $80 \mu\text{m}$)RCLED 的 L-I 關係圖。

標示 a, b 和 c 分別為 $d = 5 \mu\text{m}$, $d = 0 \mu\text{m}$ 和 $d = -5 \mu\text{m}$ 。

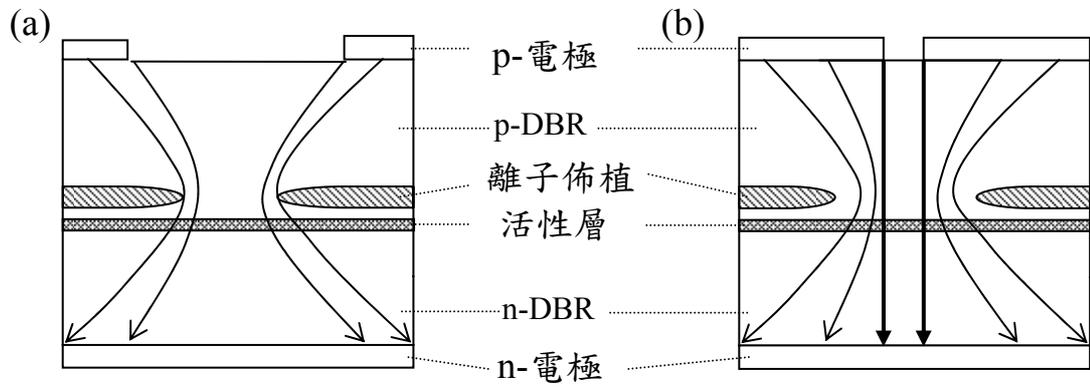


圖 4-15: (a) $d = 5 \mu\text{m}$ 和 (b) $d = -5 \mu\text{m}$ 下，RCLED 元件電流導
通路徑圖。

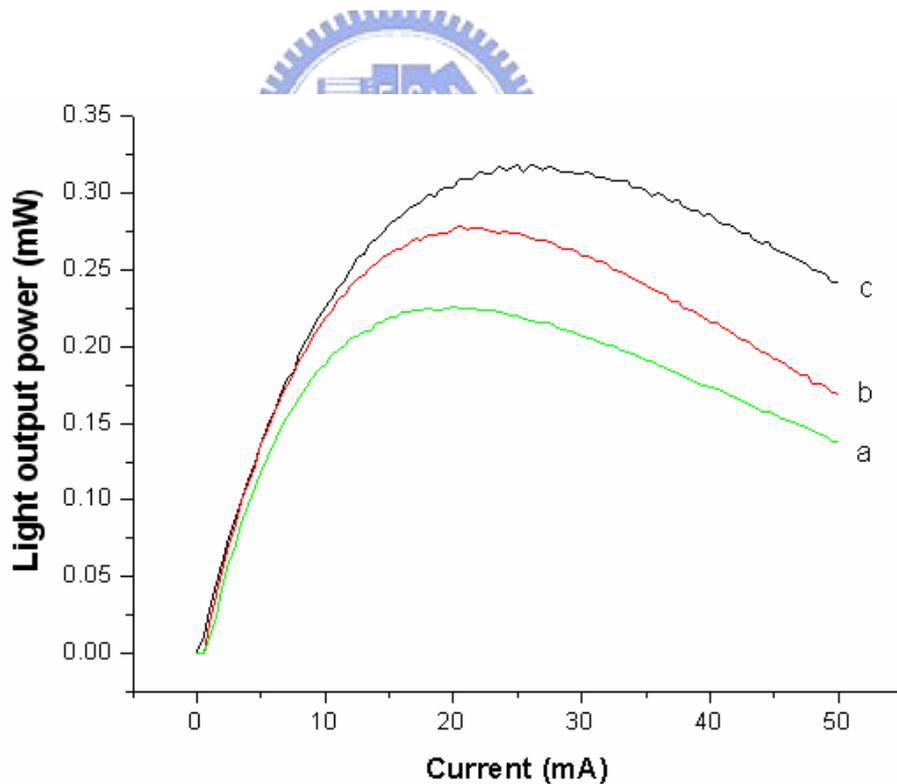


圖 4-16: $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $110 \mu\text{m}$) RCLED 的 L-I 關係圖。

標示 a, b 和 c 分別為 $d = 5 \mu\text{m}$, $d = 0 \mu\text{m}$ 和 $d = -5 \mu\text{m}$ 。

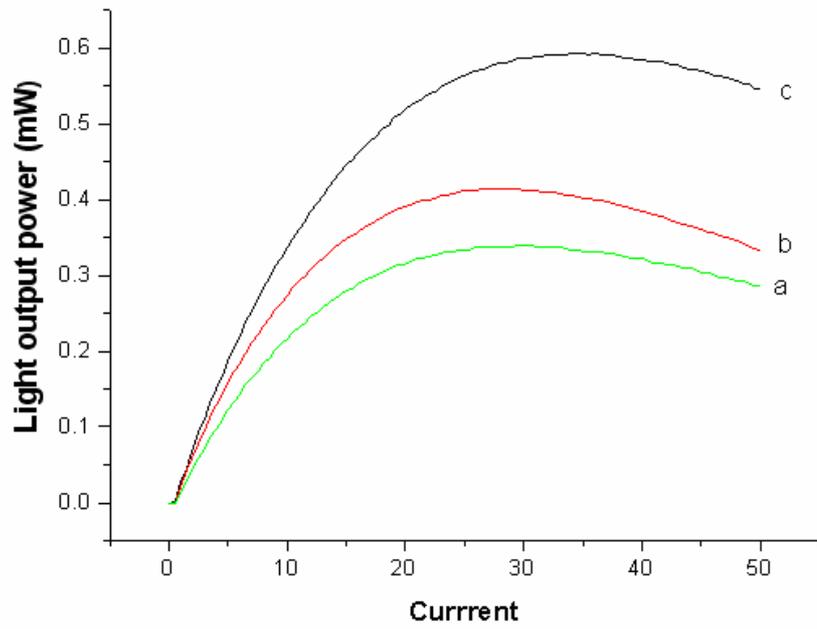


圖 4-17: $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $140 \mu\text{m}$) RCLED 的 L-I 關係圖。

標示 a, b 和 c 分別為 $d = 5 \mu\text{m}$, $d = 0 \mu\text{m}$ 和 $d = -5 \mu\text{m}$ 。

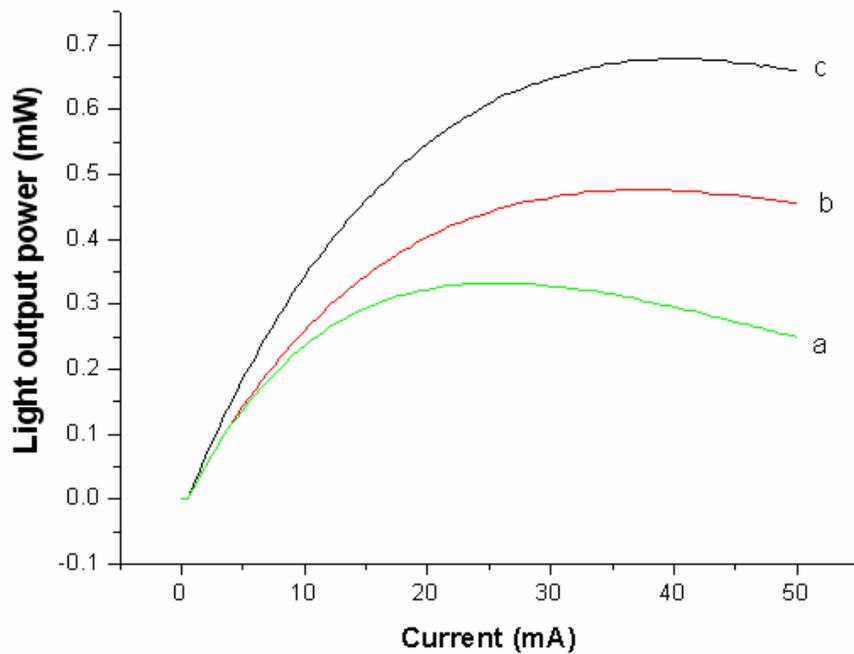


圖 4-18: $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $170 \mu\text{m}$) RCLED 的 L-I 關係圖。

標示 a, b 和 c 分別為 $d = 5 \mu\text{m}$, $d = 0 \mu\text{m}$ 和 $d = -5 \mu\text{m}$ 。

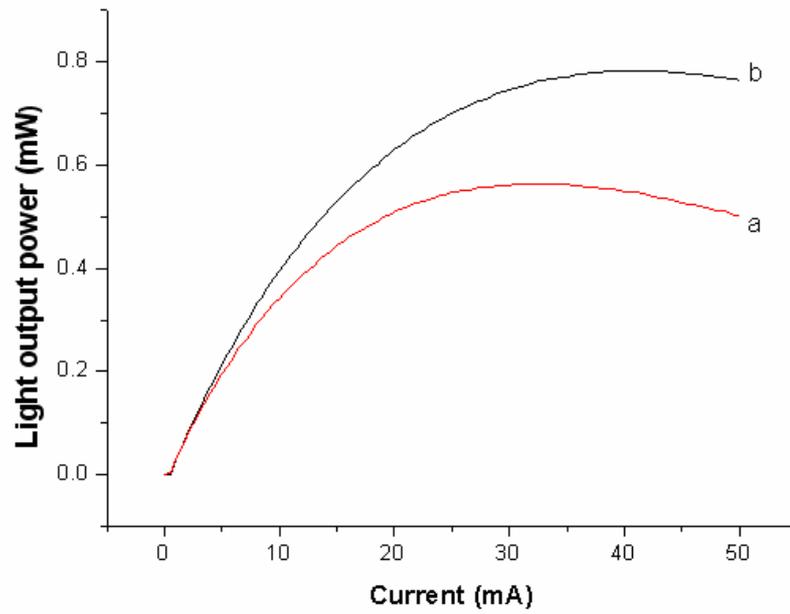


圖 4-19: $d = -5$ 及 $0 \mu\text{m}$ (固定窗口尺寸 $200 \mu\text{m}$) RCLED 的 L-I 關係圖。標示 a 和 b 分別為 $d = 0 \mu\text{m}$ 和 $d = -5 \mu\text{m}$ 。

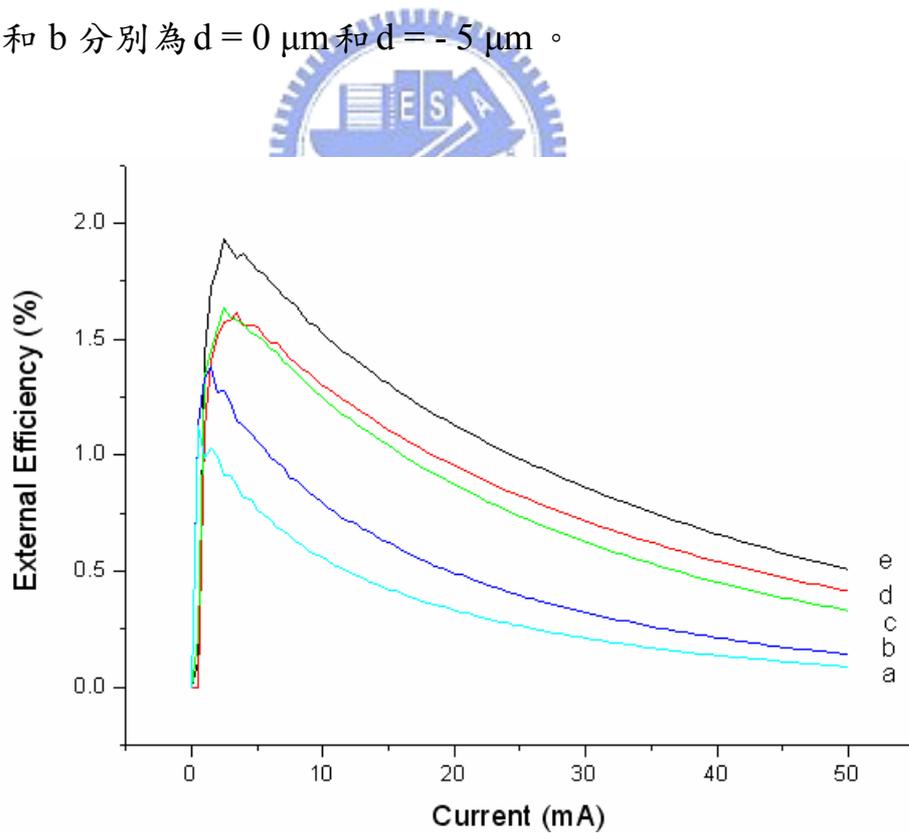


圖 4-20: 五種不同窗口尺寸 (固定 $d = -5 \mu\text{m}$) RCLED 之外部量子效率與電流的關係圖。標示 a~e 分別為 $80 \mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$ 。

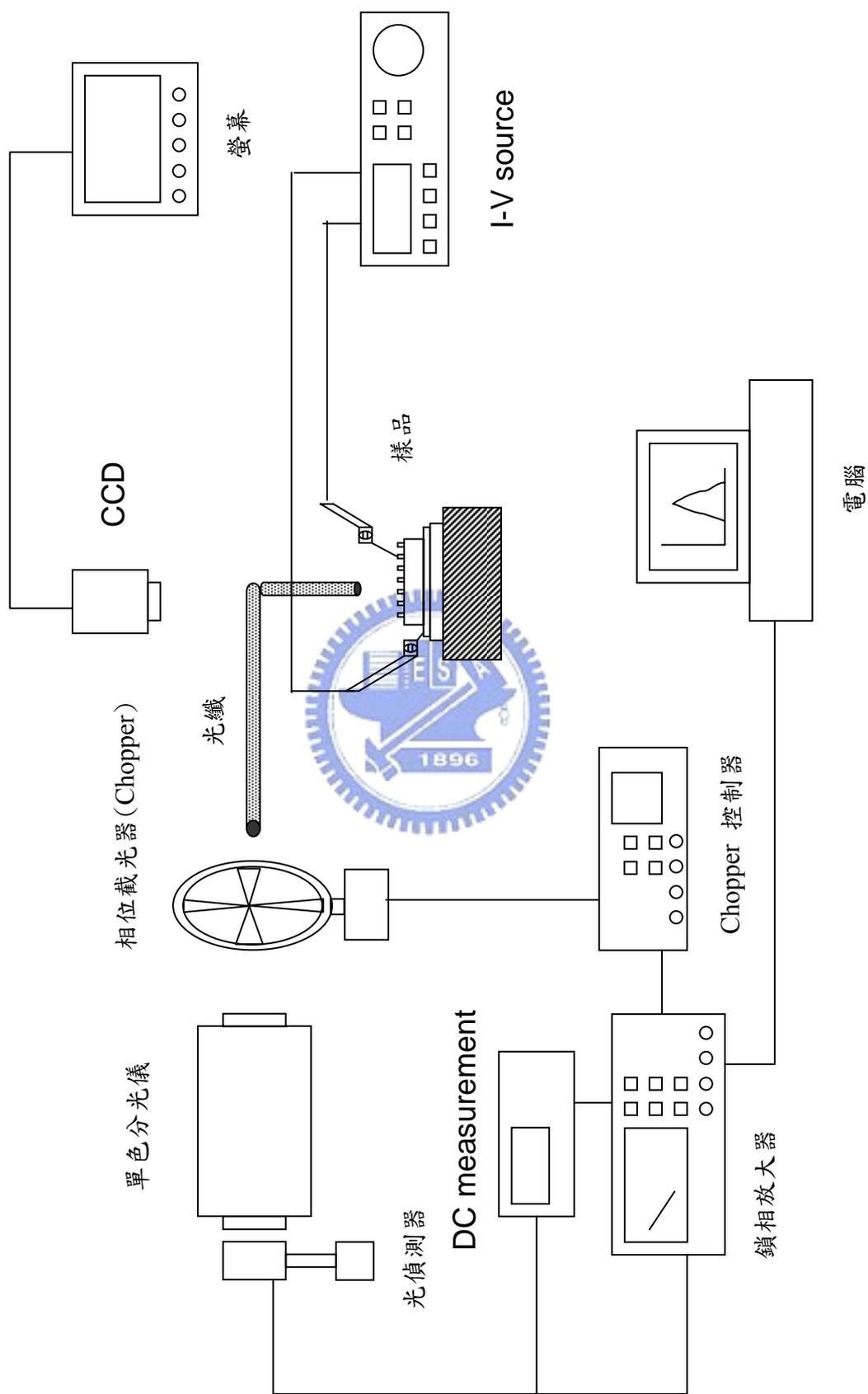


圖 4-21: 光譜量測的系統架構。

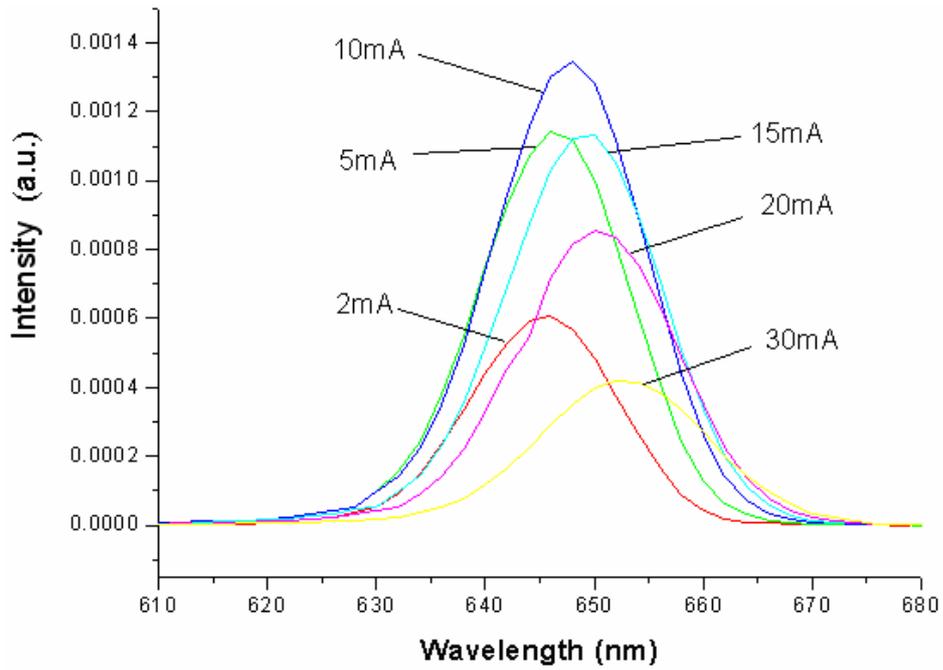


圖 4-22: 不同注入的電流(2 ~ 30 mA)下，窗口 $170\ \mu\text{m}$ 、 $d = -5\ \mu\text{m}$ RCLED

之光譜圖。

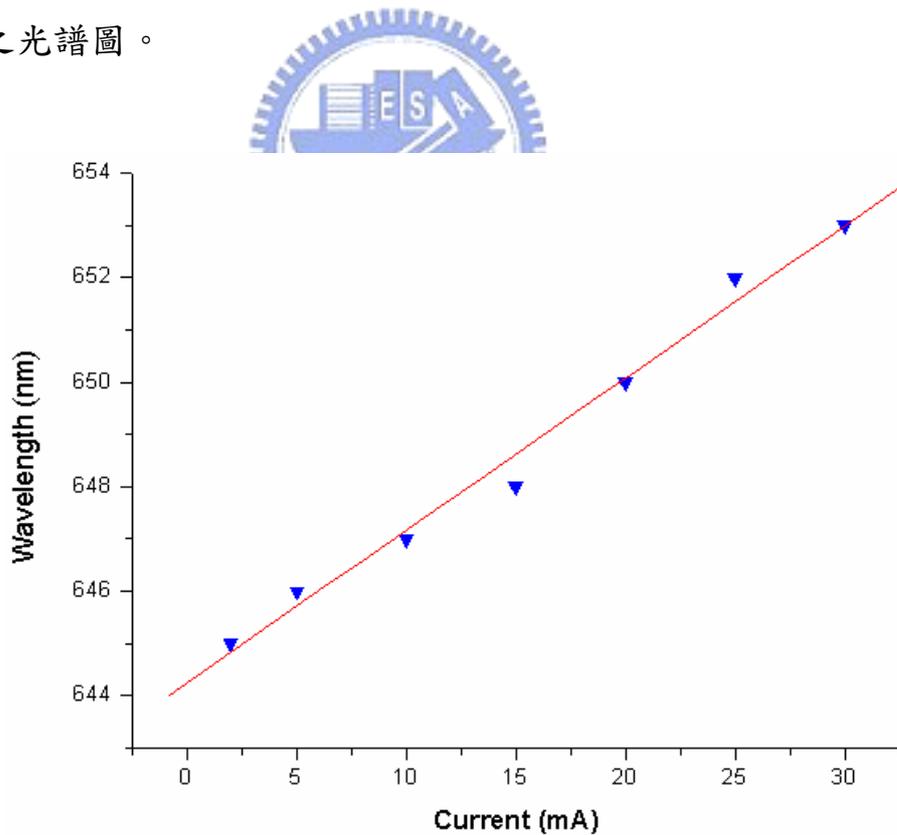


圖 4-23: 窗口尺寸 $170\ \mu\text{m}$ 、 $d = -5\ \mu\text{m}$ RCLED 的峰值波長隨電流變化關係

圖。峰值移動率大約是 $0.9\ \text{nm}/\text{mA}$ 。

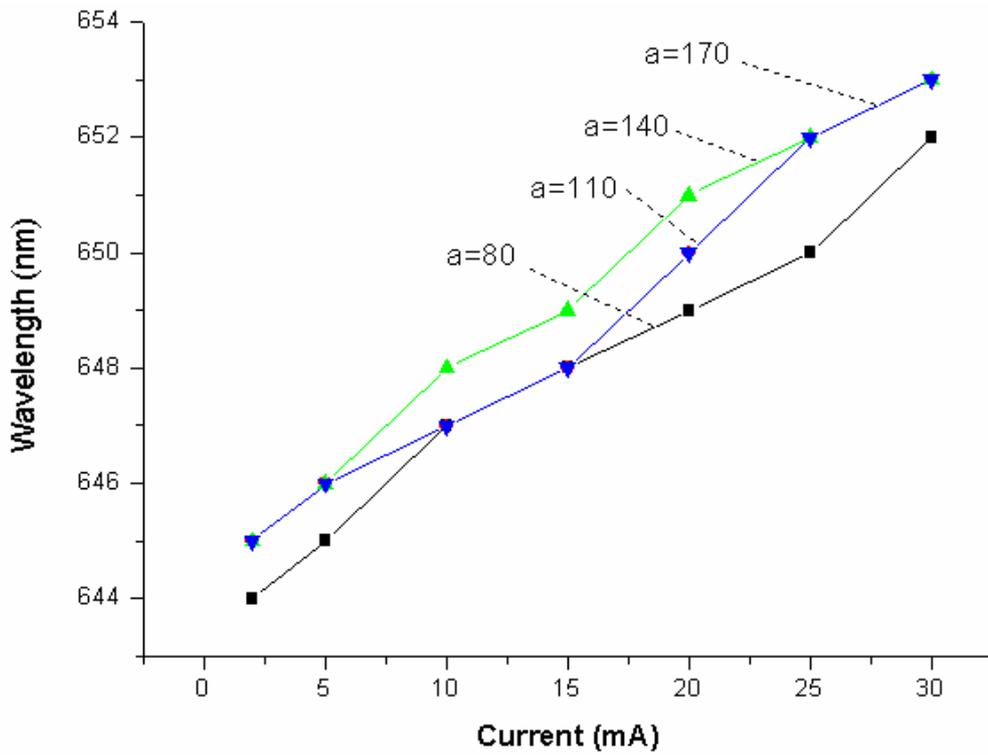


圖 4-24: 窗口尺寸 80、110、140、170 μm (固定 $d = -5 \mu\text{m}$) RCLED 的峰值波長隨電流變化關係圖。

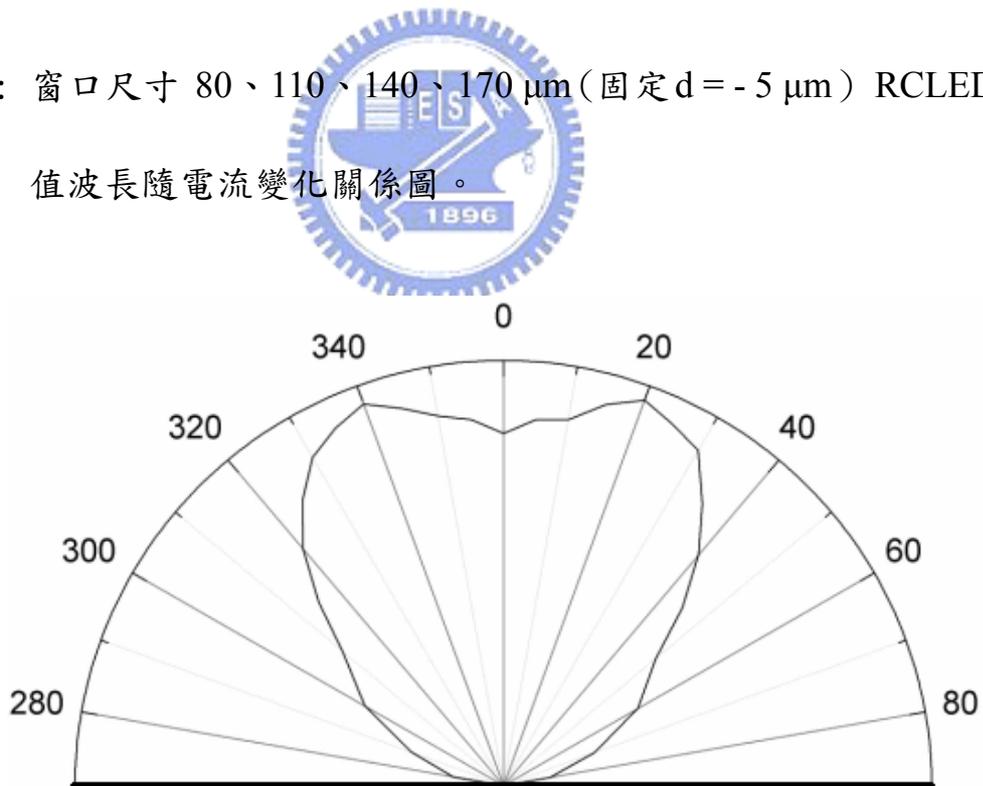


圖 4-25: 窗口尺寸 $170 \mu\text{m}$ 、 $d = -5 \mu\text{m}$ RCLED 導通 1 mA 電流時之 EL 遠場強度變化圖。

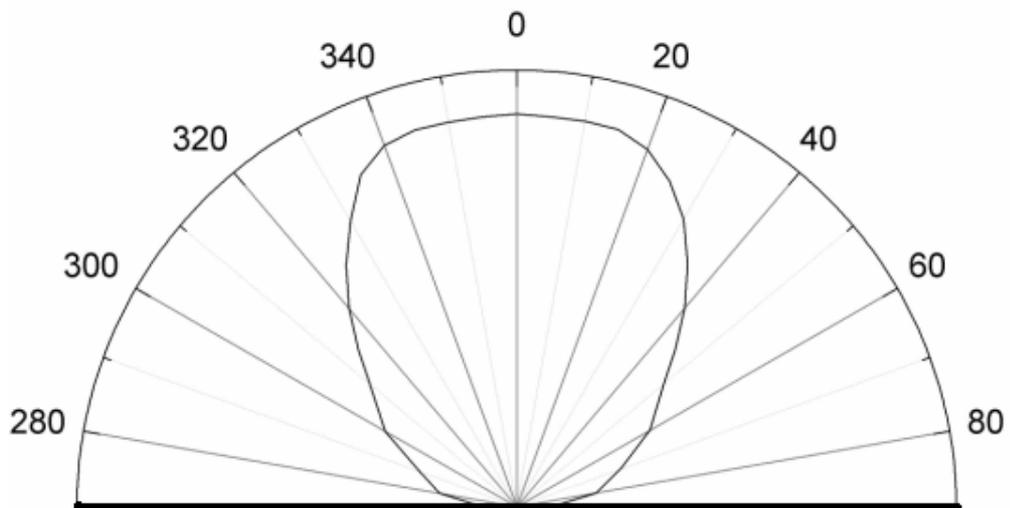


圖 4-26: 窗口尺寸 $170\ \mu\text{m}$ 、 $d = -5\ \mu\text{m}$ RCLED 導通 $12\ \text{mA}$ 電流時之 EL 遠

場強度變化圖。



第五章 結論

我們成功製造了具有不同結構的 654 nm 共振腔發光二極體，這些 RCLED 包括有 5 種不同直徑大小 80、110、140、170 和 200 μm 的圓形窗口，而對於圓環接觸開口的邊緣(或 p-電極邊緣)和窗口邊緣的位移量 d 項，我們亦設計三種條件，分別是 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ 。

首先，我們進行磊晶片的反射率光譜的模擬，其上層 DBR、下層 DBR 和全結構的反射光譜皆顯示元件的工作波長位於 654.5 nm 處。量測方面我們進行了元件的 I-V，L-I 和 far-field 特性測量，在 I-V 量測方面，窗口尺寸 200 μm 的 RCLED 有最小的電阻 20 Ω (在 20 mA 時)和開啟電壓 2.75 V，隨著窗口減小電阻和開啟電壓也跟著降低。在 L-I 量測上，窗口 200 μm 的元件在 40 mA 時有最大的光輸出功率 1.18 mW，隨著窗口的減小其光輸出功率值降低；因光子循環效應，窗口 140 μm 以上的元件之光功率值較 140 μm 以下的元件為大；結構變化 $d = -5$ 、 0 、及 $5 \mu\text{m}$ RCLED 的 L-I 比較裡，在 $d = -5 \mu\text{m}$ 下的 RCLED 有最大的光輸出功率，其頂峰值發生在較大的電流條件。在不同窗口尺寸的外部量子效率關係裡，當電流 2 mA 時窗口尺寸 200 μm 者有最大的量子效率 1.93 %。具窗口尺寸 170 μm 、 $d = -5 \mu\text{m}$ 的 RCLED 在電流 10 mA 時有最大的光譜強度，其波峰值為 648 nm，半寬高 (FWHM) 為 16 nm。在量測遠場強度分佈時，窗口尺寸 170 μm 、 $d = -5 \mu\text{m}$ 的 RCLED 於電流 1 mA 時，其最大強度發生在 $\pm 20^\circ$ ，當電流增加到 12 mA

時雙耳的遠場圖形變成單耳形狀，RCLED 的發光強度達到最大值。



參考文獻

- [1] Schnitzer I, Yablonovitch E, Caneau C, Gmitter T J and Scherer A, “30% external quantum efficiency from surface textured, thin-film light-emitting diodes,” Appl. Phys. Lett., vol. 63, pp. 2174, 1993.
- [2] Windisch R, Heremans P, Dutta B, Kuijk M, Schoberth S, Kiesel P, Dohler F H and Borghs G, “High-efficiency non-resonant cavity light-emitting diodes,” Electr. Lett., vol. 34, no.8, pp.1153 , 1998.
- [3] E. F. Schubert, Y.-H. Wang, A. Y. Cho, L.-W. Tu, and G. J. Zydzik, “Resonant cavity light-emitting diode,” Appl. Phys. Lett., vol. 60, no.8, pp. 921–923, 1992.
- [4] E. F. Schubert, Hunt N E J, Malik R J, Micovic M and Miller D L, “Temperature and Modulation Characteristics of Resonant-Cavity Light-Emitting Diodes,” J. Lightw. Techn. ,vol. 14, pp. 1721, 1996.
- [5] Bockstaele R, Sys C, Blondelle J, De Neve H, Dhoedt B, Moerman I, Van Daele P and Baets R, 1997, “Micro-cavity LED’s with an overall Efficiency of 4% into a numerical aperture of 0.5,” LEOS Summer Topicals, Montreal, Canada, p. 69.
- [6] P. Modak, M. D’Hondt, I. Moerman, P. Van Daele, P. Mijlemans, and P.Demeester, “5.2% efficiency InAlGaP microcavity LED’s at 640 nm onGe substrates,” Electron. Lett., vol. 37, no. 6, pp. 377–378, 2001.
- [7] R.Wirth, C. Karnutsch, S. Kugler, S. Thaler, and K. Streubel, “Red and orange resonant cavity LEDs,” in Proc. SPIE Light-Emitting Diodes:Research, Manufacturing, and Applications V, vol. 4278, 2001.
- [8] S. Orsila, T. Leinonen, P. Uusimaa, M. Saarinen, M. Guina, P. Sipila, V.Vilokkinen, P. Melanen, M. Dumitrescu, and M. Pessa, “Resonant cavitylight-emitting diodes grown by solid source MBE,” J. Cryst. Growth, vol. 227–228, pp. 346–351, 2001.

- [9] J. W. Gray, Y. S. Jalili, P. N. Stavrinou, M. Whitehead, G. Parry, A. Joel, R. Robjohn, R. Petrie, S. Hunjan, P. Gong, and G. Duggan, "High efficiency, low voltage resonant-cavity light-emitting diodes operating around 650 nm," Electron. Lett., vol. 36, no. 20, pp. 1730–1731, 2000.
- [10] J.S. Blakemore, Semiconductor and other major properties of gallium arsenide, J. Appl. Phys., 56, 10, pp R123-R181, 1992
- [11] K. Streubel, U. Helin, V. Oskarsson, E. Backlin, A. Johansson, IEEE Photonics Technol. Lett. 10 (12) (1998) 1685.
- [12] T. Takamori, A.R. Pratt, T. Tamijoh, Appl. Phys. Lett. 74 (24) (1999) 3598.
- [13] Marko Jalonen, Jukka Kangas, Mika Toivonen, Pekka Savolainen, Arto Salokatve, and Markus Pessa, "Monolithic Super-Bright Red Resonant Cavity Light-Emitting Diode Grown by Solid Source Molecular Beam Epitaxy," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, NO. 7, JULY 1998.
- [14] K. Streubel, Member, IEEE, U. Helin, V. Oskarsson, E. Backlin, and A. Johansson, "High Brightness Visible (660 nm) Resonant-Cavity Light-Emitting Diode," IEEE Photonics Technology Letters, VOL. 10, NO. 12, DECEMBER 1998.
- [15] H. De Neve, J. Blondelle, R. Baets, P. Demeester, P. Van Daele, and G. Borghs, "High efficiency planar microcavity LED's: Comparison of design and experiment," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, pp. 287–289, 1994.