

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

1.55 micro-m 共振腔發光二極體與垂直式共振腔面射型雷射之研製(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2215-E-007-011-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立清華大學電子工程研究所

計畫主持人：吳孟奇

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 95 年 6 月 19 日

1.55 μm 共振腔發光二極體與垂直式共振腔面射型雷射之研製

吳孟奇

清華大學電子工程研究所

(NSC 94-2215-E-007-011)

摘要

光纖通訊具有超高頻寬、低損失與傳輸時不受電磁波干擾的特色，因此近年來已逐漸取代了傳統以銅線為傳輸媒介的數據通訊系統。在多媒體技術日益精進下雖加速了網路成長速率，然而也產生了網路擁塞的問題，使得提升網路頻寬成為終端使用者的最大訴求。對目前區域網路(LAN)架構而言，當資料傳輸速度 ≤ 155 Mbits/sec，以多模光纖為主的傳輸系統可以支援任何可預見的校園網路應用，但超過這個速率，受限於多模光纖的頻寬極限，其佈線距離將限制於 2 公里之內。因此，IEEE將傳統 50-和 62.5- μm 多模光纖用在GbE的距離限制在 220 到 550 米之間，遠低於同類光纖用在高速乙太網路和乙太網路應用的 2 公里的極限。由於這種頻寬的限制，目前裝設的多模光纖站僅能支援 10-Gbit/sec應用到大約 60 米的佈線距離而已，除非是採用像多頻道波長多工(multichannel wavelength multiplexing, CWDM)技術並搭配單模光纖網路，同時，以 1.3/1.55 μm 波段的雷射二極體為系統光源才有可能超越這個限制並滿足頻寬增加的需求。有鑑於此，本計畫主要目的為研製新一代適於區域網路具高成本效益且具優異發光特性的長波長 1.55 μm RCLED/VCSEL。

前言：

為提高光纖網路(LAN)寬頻及傳輸速率以滿足消費者的需求，將VCSEL發光波長延伸至具有常規單模光纖傳輸時低色散和低衰減量之 1.3/1.55 μm 範圍，已是刻不容緩的研究課題。本研究計畫將憑藉長期以來於InP基板上磊晶成長Fabry-Perot與DFB雷射所累積的經驗與製程技術，進行長波長 1.55 μm RCLED/VCSEL元件之研製。我們首先模擬 1.55 μm 布拉格反射鏡(DBRs)材料折射率與反射率的關係，尋求適當DBR的對數與厚度，接著利用有機金屬氣相沈積法(MOCVD)生長並製作 1.55 μm RCLED/VCSEL，並以達到在室溫下操作且輸出功率為 1 mW之 1.55 μm RCLED/VCSEL為目標。

本實驗第一年預定完成之工作項目則如下所示：

- 完成 RCLED 與 VCSEL 元件特性模擬。
- 完成 RCLED 與 VCSEL 光罩設計與製作。
- 完成 $\text{AlInAs}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.46}\text{Al}_{0.09}\text{As}$ 與 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.46}\text{Al}_{0.09}\text{As}$ DBR mirror的磊晶成長，且以達到反射率大於 99%為目標。
- 完成DBR mirror 電阻的最佳化(電阻小於 $2.5 \times$

$10^{-5} \Omega \text{cm}^2/\text{pair}$)。

- 完成 1.55 μm VCSEL 元件主動層磊晶設計，設計與製作 F-P Laser 以雷射臨界電流小於 10 mA，且輸出光功率大於 15 mW 為目標。
- 完成 1 mW 高亮度之 1.55 μm RCLED 磊晶成長與元件製作。

本計畫擬以HP4156C進行RCLED/VCSEL之直流特性量測並輔以校正過的InGaAs PIN diode量測電流與光功率之間的關係及變溫下雷射臨界電流隨溫度的變化。此外，我們也將藉由光譜分析儀(OSA)測量元件的發光頻譜以確認中心波長位置及相關頻譜特性。最後，經由網路分析儀(HP-8703A)來測量雷射元件的 3 dB ($f_{3\text{dB}}$)頻寬響應以分析了解元件動態方面的特性。

量測結果與分析：

有關 1.55 μm RCLED/VCSEL研究的重點可分為 DBR mirrors與active region兩方面。對於active region材料系統的選擇，我們將採用傳統 1.55 μm 半導體雷射常用之InGaAsP/InGaAsP多重量子井(MQWs)結構作為雷射主動層材料並導入應力(strain)來改善較低的

抵補傳導帶(offset conduction band)，以改善元件特性隨溫度劣化的情況。關於DBRs設計方面，由於VCSEL的結構相當複雜，需高達近 100 層的磊晶層，且每層都需精確的控制厚度，以避免DBRs濾波作用失效。此外，為了降低磊晶層數目，我們將採用 $\text{AlInAs} / \text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.46}\text{Al}_{0.009}\text{As}$, $\Delta n \sim 0.5$ 材料作為元件的上下 DBRs。

為了驗證 $\text{InGaAsP}/\text{InGaAsP}$ MQWs 的特性，我們首先經由 F-P Laser 來確認主動區具有足夠的增益、差動增益(differential gain)及抑制載子產生漏電流的能力。現將 F-P Laser 結構及量測結果分述如下：

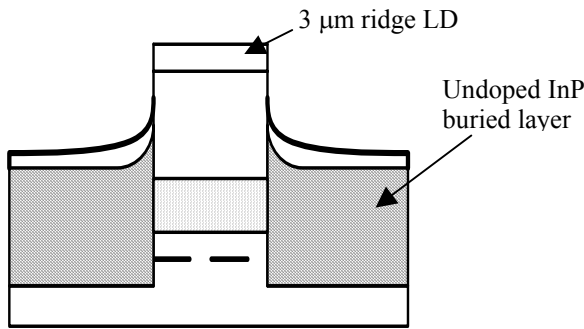


Fig.1(a). Schematic diagram of a 1.55 μm InGaAsP buried-heterostructure LDs.

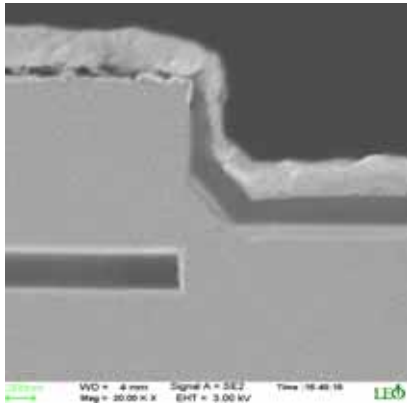
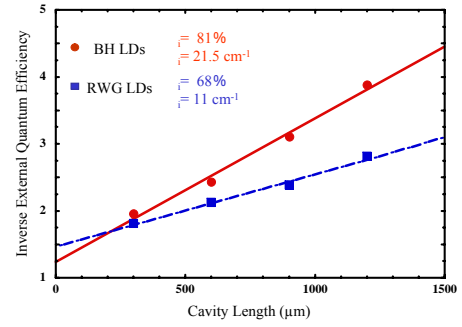
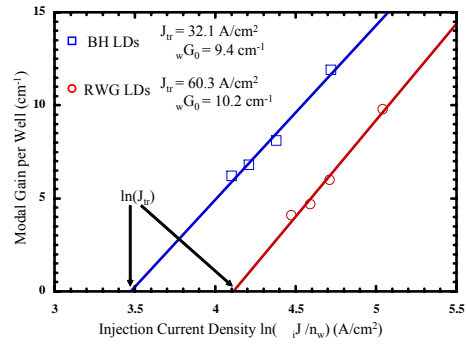


Fig.1(b) SEM cross-section image of BH LDs.

為了提高LDs的輸出光功率與改善光輸出頻譜特性，可藉由乾蝕刻及再磊晶技術，於主動層外圍包覆一本質 InP ($N \sim 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)以產生電流侷限效果並提高元件的可靠度。Fig. 1(a)為 $1.55 \mu\text{m}$ $\text{InGaAsP}/\text{InGaAsP}$ 埋入異質結構(BH)雷射二極體之示意圖。Fig. 1(b)為元件在電子顯微鏡下的剖面側視圖。由圖中可看出經由再磊晶後，主動層外圍覆蓋一良好品質的 InP ，同時主動層仍保持良好磊晶結構。



(a)



(b)

Fig. 2. (a) Inverse external quantum efficiency versus cavity length L for the as-cleaved BH and RWG LDs at 20°C . (b) Modal gain per well versus injection current density at 20°C for the as-cleaved LDs.

Fig. 2(a)為埋入異質結構(BH)雷射二極體和傳統 $3 \mu\text{m}$ 脊狀波導(RWG)雷射之共振腔長度對外部量子效率的關係圖。從圖中可估算BH 和RWG雷射內部量子效率分別為 81%和 68%，這是由於BH雷射有較好的載子侷限能力所獲致的結果。此外，這兩個雷射的內部損耗分別為 21.5 和 11 cm^{-1} ，BH雷射有較高的內部損耗起因於乾蝕刻造成台柱結構側壁面呈粗糙狀，造成光在此產生額外的散射。Fig. 2(b)為BH雷射和RWG雷射在 20°C 下之注入電流密度對每個量子井模態增益的關係圖。其中注入電流密度對共振腔長度的關係如下公式：

$$J_{th} = \frac{n_w J_{tr}}{\eta_i} \exp\left(\frac{\alpha_i + (1/L)\ln(1/R)}{n_w \Gamma_w G_0}\right)$$

又

$$\frac{\alpha_i + (1/L)\ln(1/R)}{n_w} = \Gamma_w G_0 \ln\left(\frac{\eta_i J_{th}}{n_w}\right) - \Gamma_w G_0 \ln(J_{tr})$$

利用先前所得之內部損耗和內部量子效率，可求得每個量子井之透明點電流密度(J_{tr})和模態增益($\Gamma_w G_0$)。對BH雷射為 $32.1 \text{ A}/\text{cm}^2$ 和 9.4 cm^{-1} ，而對RWG雷射為 $60.3 \text{ A}/\text{cm}^2$ 和 10.2 cm^{-1} ，於是臨界電流可推得為 6.32 和 10.4 mA 。儘管BH雷射具有較高的內部損耗，但由

於其具有較低的 J_{tr} 和較高的內部量子效，因此展現出較優異的臨界電流準位。此外，若要進一步提高BH雷射的發光效率，可於鏡面鍍上高反射率材料以降低鏡面損耗。

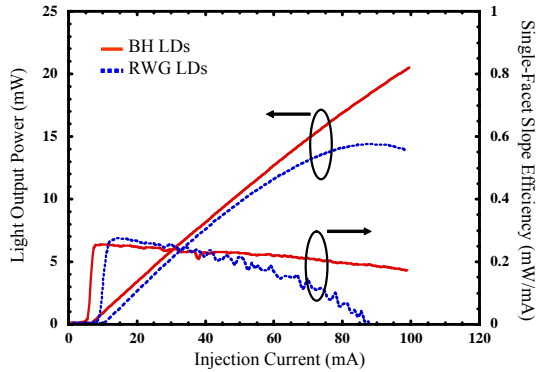


Fig. 3. Light output power and single-facet slope efficiency (η_d) at 300 K as a function of injection current for the as-cleaved LDs with a 300- μm cavity length.

Fig. 3 為在共振腔長度 300- μm 下這兩個雷射的輸出光功率。在相同製程下這兩個雷射具有相同的導通電壓和串聯電阻，分別為 0.8 V 和 6 Ω 。這顯示 BH 雷射雖有台柱結構側壁面呈粗糙狀問題，但並不影響元件的電特性。此外，從實際量測結果可知，元件的臨界電流值是和理論值大致符合的。RWG 雷射由於量子井對載子侷限能力不足和存有橫向漏電流問題，使得雷射輸出光特性不如 BH 雷射。在高電流注入下，RWG 雷射由於熱效應將導致輸出光功率出現衰退現象；相較於 BH 雷射，其主動層外圍包覆一電流阻隔層 InP，因此即使在高電流注入下仍維持良好的光輸出特性。此外，BH 雷射中的電流阻隔層 InP 其熱導係數優於 RWG 雷射的 InGaAsP，這也使得該元件具有較好的光輸出特性，即在 100 mA 下擁有 21 mW 的光輸出功率。

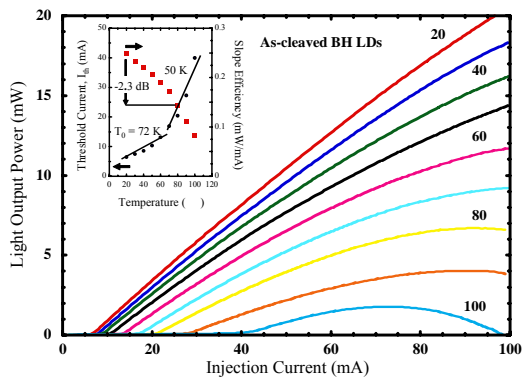


Fig. 4. Light output power versus injection current (L-I) characteristics at various temperatures for the BH LDs

with an as-cleaved front facet and a HR coating ($\sim 92\%$) applied to the rear facet.

Fig. 4 為BH雷射其中一鏡面鍍上 $\lambda/4$ 厚的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 薄膜以構建 $\sim 92\%$ 高的反射係數，另一為劈裂鏡面之輸出光功率特性。經由降低鏡面損耗後，BH雷射的臨界電流可降至 3.4 mA，同時在 100 、100 mA 下光輸出功率可大於 10 mW。從Fig. 4 的插圖可推得BH雷射的特徵溫度在 20-60 為 60 K，當溫度大於此範圍將降為 50 K。另外，傾斜效率在 20-80 內衰減 1.5 dB。另一方面，當BH雷射兩鏡面均由劈裂所構成，其特徵溫度為 72 K，這顯示經由鍍上高反射率鏡面僅能幫助降低臨界電流並無法有效改善元件的特徵溫度。

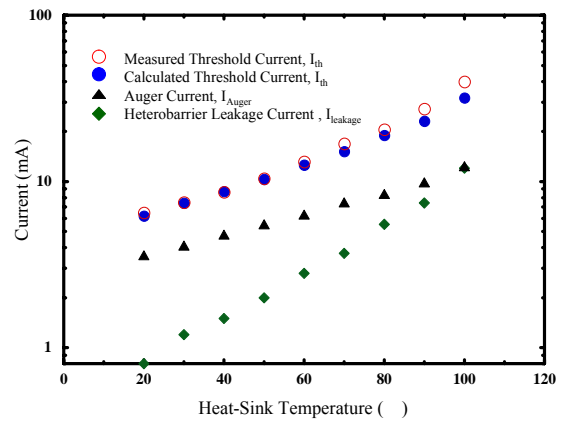


Fig. 5. Measured and calculated threshold currents as a function of heat-sink temperature for the as-cleaved BH LDs with a 300- μm cavity length. The calculated leakage current consists of two nonradiative recombination components: Auger current I_{Auger} and heterobarrier leakage current I_{leakage} .

Fig. 5 為在共振腔長度 300- μm 下比較模擬和實際量測BH雷射其臨界電流和漏電流對不同基板溫度的關係圖。經由二維雷射模擬軟體計算並考慮到熱效應可得到臨界電流的理論值。由圖中可知元件的臨界電流值在 50 以下是和模擬值大致符合的，當溫度大於 60 時，這兩者不一致的情形將愈明顯，這是由於模擬軟體無法精確考量到晶體缺陷及主動層外圍包覆電流阻隔層 InP 所具有之濃度 ($N \sim 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)。又從圖中可知非復合電流—歐傑電流 (I_{Auger}) 和異質界面漏電流 (I_{leakage}) 均隨溫度增加而變大。對BH雷射而言，在 80 以下主要是由歐傑漏電流成分主導，當在更高的溫度下，異質界面漏電流將成為主要的漏電流機制。

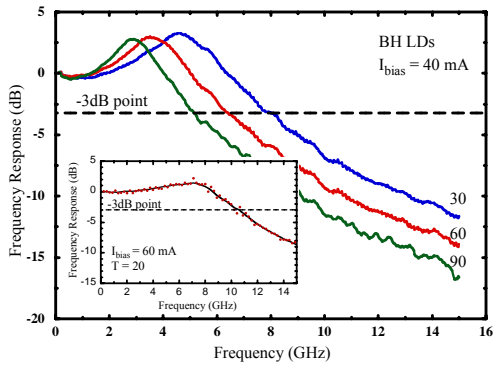


Fig. 6. Frequency response of the BH LDs at various operation temperatures. The inset shows the 3-dB modulation bandwidth at 20 under a bias level of 60 mA.

Fig. 6 為 BH 雷射偏壓在 40 mA 下不同溫度的頻率響應圖。當溫度分別為 30、60 及 90，其對應的 3dB 頻率為 8.0、6.5 和 5.2 GHz。從 Fig. 6 的插圖可知當偏壓提高至 60 mA，3dB 頻寬可提高至 10.5 GHz。

由以上 F-P Laser 的量測結果可知，我們磊晶成長的主動區—InGaAsP/InGaAsP 應力型 MQWs 具有足夠的增益、差動增益(differential gain)和抑制載子產生漏電流的能力，因此，足以作為 1.55 μm RCLED/VCSEL 之主動區。接下來我們將驗證 1.55 μm RCLED 之製程及其元件量測結果分析。

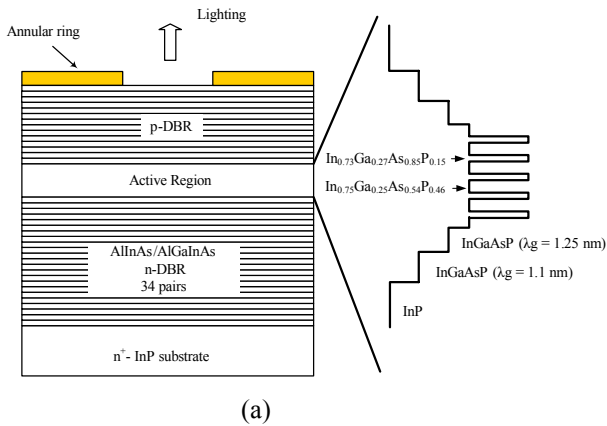
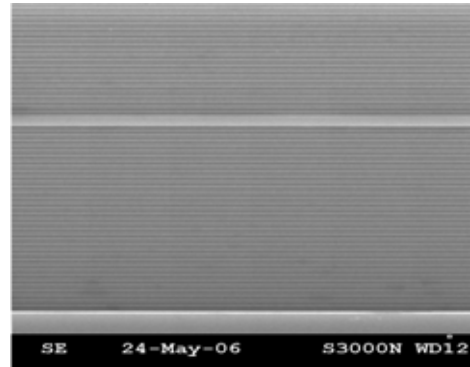


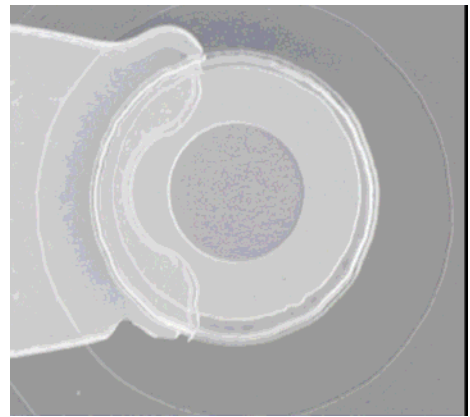
Fig. 7. Schematic diagram of a 1.55 μm RCLED with the InGaAsP SC-MQW active laser sandwiched between the AllnAs/AlGaInAs DBRs.

本計劃的磊晶片為發光波長 1.55 μm RCLED，其磊晶結構如 Fig. 7 所示，乃採用有機金屬氣相沈積 (MOVPE) 系統在 n⁺-InP 基板上磊晶而成。磊晶步驟是在 InP 基板上先成長 3000Å 的 InP 緩衝層 (Buffer Layer)，之後為 15 對每層 1/4 波長厚，n⁺-doped Al_{0.1}Ga_{0.38}In_{0.53}As/Al_{0.48}In_{0.52}As 交替堆疊而成的 n-DBR，主動層 (active layer) 包含五個未摻雜的 In_{0.75}Ga_{0.25}As_{0.54}P_{0.46}/In_{0.73}Ga_{0.27}As_{0.85}P_{0.15} 應力型多重量子井，夾在 In_{0.77}Ga_{0.23}As_{0.5}P_{0.5} (λ = 1.25 μm) 和

In_{0.87}Ga_{0.13}As_{0.29}P_{0.71} (λ = 1.1 μm) 所構成的導波層中，上層 p-DBR 是 8 對的 p⁺-doped Al_{0.1}Ga_{0.38}In_{0.53}As/Al_{0.48}In_{0.52}As DBRs，最上層則生長一 p⁺-AllnGaAs 覆蓋層以作為歐姆接觸 (ohmic-contact)。



(a)



(b)

Fig. 8. SEM (a) cross-section (b) top view of a 1550 nm planar-type RCLED.

Fig. 8(a) 為電子顯微鏡下磊晶結構的剖面圖。由圖中可看出上下 DBR 磊晶結構完整、厚度均勻。經由製程後所得 1.55 μm RCLED 元件如 Fig. 8(b) 所示。元件的光輸出視窗大小為直徑 10 μm。

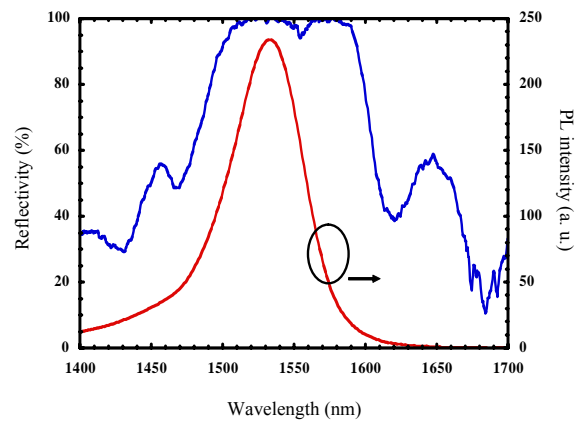


Fig. 9. Measured reflectivity spectrum and MQW PL spectrum for the as-grown 1.55 μm RCLED at room temperature. The cavity resonance wavelength is ~1553 nm.

Fig. 9 所示為 1.55 μm RCLED 的反射頻譜和主動層的發光頻譜圖。經由適當的共振腔及 DBR 設計可決定共振腔模態位置 ($\sim 1553 \text{ nm}$)。藉由變動 F-P 模與增益光譜的差異 ($\Delta\lambda_{\text{det}} = \Delta\lambda_{\text{F-P}} - \Delta\lambda_{\text{QW}} > 0$)，將改變 LED 的遠場圖樣 (Far Filed Pattern)，並提高 LED 的外部量子效率 (External Quantum Efficiency) 及改善元件溫度特性。

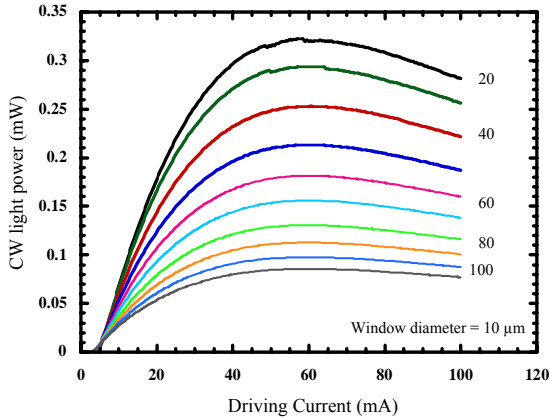


Fig. 10. Driving current dependence of light output power measured at various temperatures for the 1.55 μm RCLEDs.

Fig. 10 為發光孔徑 10 μm RCLED 之 L-I 特性曲線。由圖中可知元件在 20 mA 下其工作電壓為 1.5V、串聯電阻為 6 Ω ，輸出光功率為 320 μW ，@ 20 $^{\circ}\text{C}$ 。共振腔模與增益頻譜的位置均和溫度相關，當電流增加時，伴隨著元件溫度的上升將導致增益頻譜與共振腔模往長波長移動 (red shift)，因增益頻譜移動 ($< 0.4 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$) 較共振腔模快，所以當增益頻譜頂峰位置與共振腔模重疊時，可得到最高的輸出功率。隨著電流持續增加兩頻譜位置錯開的情形愈明顯，使得輸出功率變小。

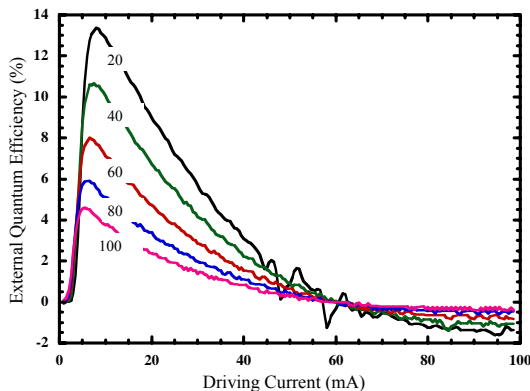


Fig. 11. The calculated external quantum efficiency versus driving current for the RCLEDs.

由輸出光功率對外加驅動電流的關係，可獲得一重要的特性參數—外部量子效率 (External Quantum Efficiency, η_{ext})，定義為：

$$\eta_{\text{ext}} = \lambda q P_{\text{out}} / (hc I_{\text{bias}})$$

其中 λ 為 RCLED 的發光波長， q 為電子帶電量 (1.6×10^{-19} 庫倫)， P_{out} 為 RCLED 的輸出光功率， h 為普朗克常數 (6.626×10^{-34} Js)， c 為光速 (3×10^{10} cm)， I_{bias} 為外加驅動電流。Fig. 11 為發光孔徑 10 μm RCLED 之外部量子效率對電流特性曲線。由圖中可知，在 20 $^{\circ}\text{C}$ ，操作電流 $\sim 8 \text{ mA}$ ，元件有最大外部量子效率 $\sim 13.3\%$ 。外部量子效率隨電流增加而減少，其原因為：(a) 隨著電流持續增加，增益頻譜頂峰位置與共振腔模位置錯開的情形愈明顯，使得輸出功率變小。(b) 隨著電流持續增加，增益頻譜將變寬，增益變小，使得輸出功率變小。(c) 隨著電流持續增加，載子受熱逸出量子井的數量將變多，使得輸出功率變小。

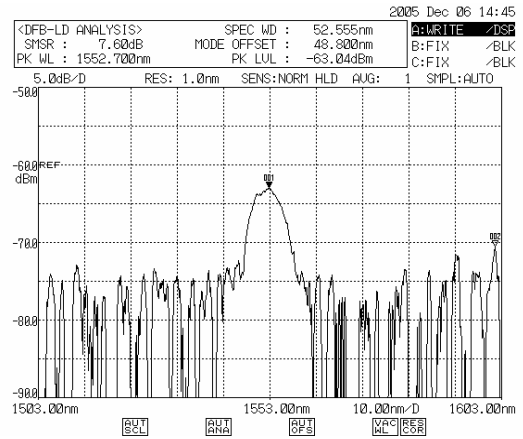


Fig. 12. Electroluminescence spectrum at room temperature for the RCLEDs with a windows diameter of 10 μm .

Fig. 12 為 RCLED 操作在 50 mA 下之光譜響應曲線。由圖中可知元件的發光中心波長在 1553 nm 處，而光譜響應曲線的半高值 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 為 10 nm。

結論：

本計畫已於第一年執行期間成功完成 F-P 雷射臨界電流小於 10 mA，且輸出光功率大於 15 mW 之目標，這驗證了以 InGaAsP/InGaAsP 應力型 MQWs 作為 1.55 μm RCLED 的主動區將具有足夠的增益、差動增益 (differential gain) 和抑制載子產生漏電流的能力。此外，我們也完成 1.55 μm RCLED 磊晶層設計與元件製作。結果顯示 1.55 μm RCLED 操作於 20 $^{\circ}\text{C}$ ，可得最大輸出光功率 320 μW @ 20 mA 和最大外部量子效率 $\sim 13.3\%$ @ 8 mA。此外，經由頻譜分析確認元

件的發光中心波長在 1553 nm，FWHM 為 10 nm。

誌謝:

此計畫感謝國科會予以提供經費支助。

(NSC 94-2215-E-007-011)

參考資料

- 【1】 D. I. Babic, K. Streubel, R. P. Mirin, N. M. Margalit, J. E. Bowers, E. L. Hu, D. E. Mars, L. Yang, and K. Carey, "Room-temperature continuous-wave operation of 1.54 μm vertical-cavity lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.* 7, pp. 1225-1227 (1995).
- 【2】 K. Streubel, S. Rapp, J. Andre, and J. Wallin, "Room-temperature pulsed operation of 1.5 μm vertical cavity lasers with an InP-based Bragg reflector", *IEEE Photon. Technol. Lett.* 8, pp. 1121-1123 (1996).
- 【3】 M. A. Fisher, Y. Z. Yang, A. J. Dann, D. J. Elton, M. J. Harlow, S. D. Perrin, J. Reed, I. Reid, and M. J. Adams, "Pulsed electrical operation of 1.5 μm vertical-cavity surface emitting lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.* 7, pp. 608-610 (1997).
- 【4】 S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, J. K. Kim, D. A. Buell, H. Kroemer, and L. A. Coldren, "88°C, continuous-wave operation of apertured, intracavity contacted, 1.55 μm vertical-cavity surface-emitting lasers", *Appl. Phys. Lett.* 78, pp. 1337-1339 (2001).
- 【5】 M. H. M. Reddy, D. Buell, A. Huntington, R. Koda, D. Freezell, T. Asano, E. Hall, S. Nakagawa, and L. A. Coldren, "Current status of epitaxial 1.31-1.55 μm VCSELs on InP", *Proc. IEEE/LEOS Summer Topical Mtg.*, paper no. WG1, Quebec, Canada, July, pp. 15-17 (2002).
- 【6】 C. Kazmierski, J. P. Debray, R. Madani, N. Bouadma, J. Etrillard, I. Sagnes, F. Alexandre, and M. Quillec, "First all-monolithic VCSEL's on InP: +55°C pulse lasing at 1.56 μm with GaInAlAs/InP system", in *Int. Semiconductor Laser Conf.*, Nara, Japan, Oct., pp. 4-8 (1998).
- 【7】 J. Boucart, C. Starck, A. Plais, E. Derouin, C. Fortin, F. Gaborit, A. Pinguire, L. Goldstein, and J. Jacquet, "RT pulsed operation of metamorphic VCSEL at 1.55 μm ", *Electron. Lett.* 34, pp. 2133-2135 (1998).
- 【8】 T. Nakamura, T. Okuda, R. Kobayashi, Y. Muroya, K. Tsuruoka, Y. Ohsawa, T. Tsukuda, and S. Ishikawa, "1.3- μm AlGaInAs strain compensated MQW-buried-heterostructure lasers for uncooled 10-gb/s operation", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 11, pp. 141-148 (2005).
- 【9】 D. Klotzkin, K. Kojima, N. Jordache, N. Chand, P. Kiely, M. Chien, M. Han, E. Michel, S. Ustin, S. Roycroft, D. Melville, R. Kunkel, and L. Ketelsen, "High-speed directly modulated Fabry-Perot and distributed-feedback spot-size-converted lasers suitable for passive alignment, unisolated operation, and uncooled environments up to 85 °C", *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 69-78 (2003).
- 【10】 D. Bang, J. Shim, J. Kang, M. Um, S. Park, S. Lee, D. Jang, and Y. Eo, "High-temperature and high-speed operation of a 1.3- μm uncooled InGaAsP-InP DFB laser", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 1240-1242 (2002).
- 【11】 J. S. Osinski, "Threshold current analysis of compressive strain (0-1.8%) in low-threshold, long-wavelength quantum well lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 1576-1585 (1993).
- 【12】 A. Kasukawa, R. Bhat, C. E. Zah, M. A. Koza, and T. P. Lee, "Very low threshold current density 1.5 μm GaInAs/AlGaInAs graded-index separate-confinement-heterostructure strained quantum well laser diodes grown by organometallic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, pp. 2486-2488 (1991).
- 【13】 M. Levinshtein, S. Rumyantsev, and M. Shur, in *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, vol. 2, p. 156, World Scientific Publishing Co., Singapore (1996).
- 【14】 Y. Sakata, P. Delansay, Y. Inomoto, M. Yamaguchi, T. Murakami, and H. Hasumi, "All selective MOVPE grown BH-LDs fabricated by the novel self-alignment process", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 179-181 (1996).