

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 1.3 微米波長增益耦合與複式耦合電流阻隔式光柵砷化鋁鎵 銦多重量子井分佈回授型半導體雷射(2/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2215-E-007-009-

執行期間：93年08月01日至94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：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 6 月 30 日

# 1.3 微米波長增益耦合與複式耦合電流阻隔式光柵砷化鋁鎵銦多重量子井分佈

## 回授型半導體雷射

吳孟奇

清華大學電子工程研究所

(NSC-93-2215-E-007-009)

### 摘要

由於網際網路的蓬勃發展，資料的傳輸要求快速且多工。因此，低色散、高輸出功率之雷射光源是必須的。1.3  $\mu\text{m}$  較 1.55  $\mu\text{m}$  雷射有著較低之色散，然而，相較於其它型態之雷射，1.3  $\mu\text{m}$  雷射之色散仍然偏高。為此，導引許多不同雷射結構的發明。其中最為廣泛被使用的結構莫過於分佈回授型雷射。分佈回授型雷射可以有效地控制並發出我們所定義的單頻波長，這可以有效地降低位元傳輸錯誤率。傳統之分佈回授型雷射多以折射率耦合的回授機制為主，但它對於旁模壓抑比與窄線寬卻無法有效的提升。近年來，Nakano 等人發表了增益耦合的回授式雷射，在耦合的機制中加入了增益耦合的回授，這使得模態的臨界增益差值變大，消除了傳統折射率耦合分佈回授式雷射的模態退化，同時也解決了空間燒洞的問題。然而，由於常見於增益耦合回授式雷射中因蝕刻或選擇性成長主動區會造成良率的降低與長波長光柵吸收層的成長。Kazmierski 提出以折射率與增益調變及傳統之折射率耦合之複式耦合分佈回授型雷射可以有效地解決這兩個問題。另外，基於電流調變之概念，有效的引入電流阻隔層可以降低臨界電流。複式耦合電流阻隔式光柵分佈回授型雷射除了上述觀念外，還有著傳統之折射率調變觀念。這兩種方式可有效的增加旁帶抑制比，提升波長選擇的能力。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 1.3  $\mu\text{m}$  DFB 雷射。

### 前言：

近年來對於光纖通信所使用的光收發模組已朝向高效率與免冷卻的目標前進，為了達到工業使用的規範，在雷射元件主動區的設計上我們採用應力補償型的 InGaAsP 量子井結構來增進雷射的差動增益與使用鐵元素參雜的 InGaAsP/InP 混合式電流侷限光柵結構。混合式的光柵設計不僅帶來高效率的折射率耦合的機制並且也有效的引入增益耦合的觀念。為了更進一步降低 DFB 雷射的操作電流我們利用有機金屬氣相沈積法(MOCVD)生長並製作異質掩埋式 1.3  $\mu\text{m}$  CC-DFB BH LDs 並以達到在室溫下操作其臨界電流小於 10 mA 且輸出功率高於 30 mW 為目標。

本實驗第二年預定完成之工作項目則如下所示：

- 完成複式耦合分佈回授型雷射之研製，並降低臨界電流至 14 mA 以下。

- 完成溫度與臨界電流的關係，使雷射元件操作於 100°C 以下而臨界電流維持在 40-50 mA 以下。
- 提高旁模壓抑比至 40 dB 的發光頻譜的表現。
- 低臨界電流的發光特性可作為日後高速特性的依據。

本計畫擬以 HP4156C 進行 DFB laser 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。

### 元件設計：

有關 1.3  $\mu\text{m}$  CC-DFB BH LDs 研究的重點可分為

current-blocking-grating與active region兩方面。對於active region材料系統的選擇，我們將採用傳統半導體雷射常用之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current-blocking-grating設計方面，由於光柵層結構相當的重要，需精確的控制厚度與磊晶層的電阻值，避免DBRs之波長設計漂移。綜合上述分析，本計劃的CBG CC-DFB 磊晶基本結構如下：(i)首先在磷化銦基板上成長一層 0.4 微米n型磷化銦作為緩衝層。接著在其上成長雷射主動區結構。其中包含，(ii)對稱的漸變折射率分離局限異質結構(SCH)磷砷化銦鎵其對應光激發螢光波長分別為 1.1 與 1.05 微米，(iii)量子井為五對 50 奈米  $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.66}\text{P}_{0.34}$  (0.85%之壓縮應力) 與 90 奈米  $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}_{0.37}\text{P}_{0.63}$  (0.45%之伸張應力)的量子位障其對應光激發螢光波長分別為 1.1 微米，(iv)鐵參雜的磷化銦與磷砷化銦鎵的光柵層(厚度各有 40 奈米)，圖一為完整的結構設計(包括二次磊晶後的全結構設計，二次磊晶之成長壓力為 100 torr成長溫度為 620°C)。圖二(a)為光柵製作後的SEM照片，其光柵週期為 210 奈米且深度大約為 90-100 奈米，經由公式的推算其折射率耦合係數大約為  $160\text{ cm}^{-1}$ 與增益耦合係數為  $6.8\text{ cm}^{-1}$ 。圖二(b)與(c)為雷射製作完成後的橫截面示意圖與SEM之照片。

## 量測結果與分析：

為研究以鐵元素參雜的磷化銦異質掩埋雷射其電流阻隔機制與效應，本研究同時在相同設計的磊晶片上分別製作傳統的CBG CC-DFB ridge-waveguide (RWG)脊狀波導雷射與異質掩埋式雷射。元件製作完成後經半導體參數量測儀測出元件之起始電壓為 0.85 伏特且串聯電阻僅有 6.7 歐姆。圖三為雷射元件於室溫下光輸出與微分效率( $\eta_d$ )對電流之關係圖，由圖可知掩埋式結構的雷射臨界電流為 5.3 mA且遠小於傳統脊狀波導雷射(10.2 mA)，對於脊狀波導CGB CC-DFB RWG雷射的高臨界電流與非線性的光輸出曲線是由於此元件有較大的橫向漏電流與載子溢出量子井造成的高臨界電流密度，使元件造成熱與材料增益係數衰退。由此可知，利用鐵元素參雜之磷化銦掩埋式結構

可以有效的抑制元件的橫向漏電流。在 100 mA電流的注入下掩埋式結構(CGB CC-DFB BH LD)之雷射其光輸出高達 36 mW且外部量子效率也到達 40%，對於掩埋式結構的元件性改善的原因不僅僅是抑制元件的橫向漏電流而磷化銦的高導熱係數也是功不可沒(InP導熱係數 $\sim 0.68\text{ W/cm}\cdot\text{C}$ ，InGaAsP導熱係數 $\sim 0.1\text{ W/cm}\cdot\text{C}$ )。

圖四(a)與(b)分別為共振腔長度為 300 微米的傳統脊狀波導CGB CC-DFB RWG雷射與異質掩埋式CGB CC-DFB BH雷射的變溫量測下光功率輸出與輸入電流之關係圖，對傳統脊狀波導CGB CC-DFB RWG雷射而言其 20°C下的最大之光功率輸出為 28.5 mW且最高的操作溫度為 105°C，在 90°C的環境溫度下其臨界電流增加至 32.2 mA 且 5 mW光輸出時的操作電流為 62 mA。對於結構改良後的異質掩埋式CGB CC-DFB BH雷射而言其最高操作溫度增加至 125、90°C時的臨界電流僅有 15.8 mA且 5 mW光輸出時的操作電流為 32.5 mA。圖三中的插圖分別顯示出環境溫度變化下的臨界電流與雷射光輸出之微分效率變化，由圖中的曲線可計算出傳統脊狀波導CGB CC-DFB RWG雷射之特徵溫度( $T_0$ )為 75K(20-70°C)與 52K(70-100°C)、異質掩埋式CGB CC-DFB BH雷射之特徵溫度為 70K(20-70°C)與 58K(70-120°C)。由雷射光輸出之微分效率變化可知，異質掩埋式CGB CC-DFB BH雷射其 20 至 100°C之效率衰退僅有 1.56 dB且遠小於傳統脊狀波導CGB CC-DFB RWG雷射的 3.3 dB。對於測量的結果比較得知異質掩埋式CGB CC-DFB BH雷射同時在效率衰退與特徵溫度的改進下可證明有較小發光體積的CGB CC-DFB BH雷射結構可以有效的限制載子的分佈因此可以應用於較嚴苛的環境溫度之下。

圖五分別為 CGB CC-DFB BH 雷射在 30、60、90 °C操作溫度下雷射旁模抑制比與輸入電流的關係圖，此元件在兩倍臨界電流(10.5 mA)下即有高達 42 dB 的 SMSR 值且無論操作溫度與電流的變化此雷射之旁模抑制比都可高達 47dB 以上，圖五內之插圖為利用光譜儀測量出的雷射發光頻譜其操作電流為 25 mA 且發光波長為 1312 nm。為了證明異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射在橫向模態有較穩定的輸出特性，圖六為 5 mW 雷射光輸出下之遠場橫向模態分佈圖，在同樣的主動區設計下傳統脊狀波導 CGB CC-DFB

RWG 雷射與異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射在垂直方向的遠場角大約相同為  $35^\circ$ ，但在橫向的遠場角測量下傳統脊狀波導 CGB CC-DFB RWG 雷射的遠場角約為  $26^\circ$  而異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射的遠場角僅有  $19^\circ$ ，這縮小  $7^\circ$  的遠場角恰好證明了鐵元素參雜的磷化銦電流限制結構同時帶來了較大的橫向折射率差距造成對雷射光有較好的限制作用。

為了解釋鐵元素參雜之磷化銦異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射在高溫超作下有較穩定的光輸出曲線、較好的散熱與電流限制特性。我們對元件進行共振腔溫度的估計與比較，經驗上半導體雷射共振腔溫度的變化量可由雷射光之波長對輸入電流的漂移比例  $(\Delta\lambda/\Delta I_{\text{diss}})$  與雷射光波長對環境溫度改變之漂移率  $(\Delta\lambda/\Delta T)$  相除來求得，圖七為 DFB 雷射波長對溫度的漂移與電流消耗所作的圖。溫度變化為  $20-100^\circ\text{C}$  下雷射光波長對環境溫度改變之漂移率  $(\Delta\lambda/\Delta T)$  為  $0.11\text{ nm}/^\circ\text{C}$ ，同樣的雷射光波長對輸入電流的漂移比例  $(\Delta\lambda/\Delta I_{\text{diss}})$  經由測量分別為  $0.032\text{ nm}/\text{mA}$  (異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射) 與  $0.039\text{ nm}/\text{mA}$  (傳統脊狀波導 CGB CC-DFB RWG 雷射)。由實驗結果可推算此二雷射元件其共振腔在  $100\text{ mA}$  的電流操作下溫度大約相差  $6.4^\circ\text{C}$ ，而對傳統脊狀波導 CGB CC-DFB RWG 雷射而言當雷射之操作增加至  $100\text{ mA}$  時，其共振腔溫度也只是增加了  $35.5^\circ\text{C}$ ，故經由雷射波長漂移與雷射電流消耗的分析可得，異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射對於散熱能力上增加了  $18\%$ ，故可證明異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射較傳統脊狀波導 CGB CC-DFB RWG 雷射更適合於高溫下操作。

圖八(a)為  $1.3\text{ }\mu\text{m}$  異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射於不同直流偏壓下的小信號頻率響應之測試，插圖為當溫度分別為  $30$ 、 $60$  及  $90$ ，其對應的  $3\text{dB}$  頻率為  $11.8$ 、 $10.5$  和  $8.3\text{ GHz}$ 。此元件有如此高頻特性應歸功於設計時利用應力補償型的主動區設計與降低了元件主動區的體積以提高光子的濃度與利用鐵元素參雜的磷化銦電流阻擋層以減少並聯的寄生電容。圖八(b)為雷射之遲張共振頻率  $(f_r)$  與操作電流之平方根的關係圖，由圖可知異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射之遲張共振頻率在  $60\text{ mA}$  的直流偏壓下應可超過  $10\text{ GHz}$ 。另外，經計算雷射元件之  $\Delta f_r$  分別為  $1.55\text{ GHz}/\text{mA}^{1/2}$  (異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射) 與  $1.28$

$\text{GHz}/\text{mA}^{1/2}$  (傳統脊狀波導 CGB CC-DFB RWG 雷射)。由此實驗可知  $1.3\text{ }\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射應有潛力應用於高速免冷卻的光纖通信系統上。

## 結論：

本計畫已於第二年執行期間成功完成異質掩埋式 CGB CC-DFB BH 雷射臨界電流小於  $6\text{ mA}$ ，且輸出光功率大於  $35\text{ mW}$  之目標，這驗證了以 InGaAsP 應力型 MQWs 作為  $1.3\text{ }\mu\text{m}$  DFB 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。對於高頻信號量測方面此元件室溫下可達  $11.8\text{ GHz}$  的傳輸能力。另外，經由雷射波長對於環境溫度與操作電流漂移之分析下此元件比起傳統式的脊狀波導 CGB CC-DFB RWG 雷射之散熱能力增加了  $18\%$ 。

## 參考資料

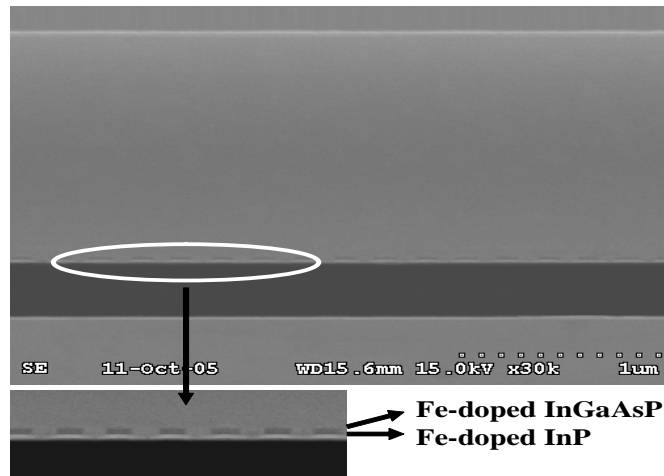
- [1] H. Hillmer and B. Klepser, "Low-cost edge-emitting DFB laser arrays for DWDM communication systems implemented by bent and tilted waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 40, pp. 1377-1383, 2004.
- [2] K. David, G. Morthier, P. Vankwikelberge, and R. Baets, "Yield analysis of non-AR-coated DFB lasers with combine index and gain coupling," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 234-238, 1990.
- [3] C. Kazmierski, D. Robein, D. Mathoorasing, A. Ougazzaden, and M. Filoche, "1.5  $\mu\text{m}$  DFB lasers with new current-induced gain gratings," *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, vol. 1, pp. 371-374, 1995.
- [4] Z. M. Chuang, C. Y. Wang, W. Lin, H. H. Liao, J. Y. Su, and Y. K. Tu, "Very-low-threshold, high efficient, and low-chirp 1.55- $\mu\text{m}$  complex-coupled DFB lasers with a current-blocking Grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 1438-1441, 1996.
- [5] G. P. Li, T. Makino, R. Moore, and N. Puetz, "1.55- $\mu\text{m}$  index/gain coupled DFB lasers with strained layer multiquantum-well active grating," *Electron. Lett.*, vol. 28, pp. 1726-1727, 1992.

- [6] Y. Luo, Y. Nakano, K. Tada, T. Inoue, H. Hosomatsu, and H. Iwaoka "Purely gain-coupled distributed feedback semiconductor laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, pp. 1620-1622, 1990.
- [7] J. Lowery and D. Novak, "Performance comparison of gain-coupled and index-coupled DFB semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, pp. 2051-2063, 1994.
- [8] 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- $\mu\text{m}$  uncooled InGaAsP-InP DFB laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 1240-1242, 2002.
- [9] D. G. Knight, W. T. Moore, and R. A. Bruce, "Growth of semi-insulating InGaAsP alloys using low-pressure MOCVD," *J. Cryst. Growth*, vol. 124, pp. 352-357, 1992.
- [10] T. Nakamura, T. Okuda, R. Kobayashi, Y. Muroya, K. Tsuruoka, Y. Ohsawa, T. Tsukuda, and S. Ishikawa, "1.3- $\mu\text{m}$  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.
- [11] J. Jin, J. Shi, and D. Tian, "Study on high-temperature performances of 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsP-InP strained multiquantum-well buried-heterostructure lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 276-278, 2005.
- [12] Y. Liu, J. K. White, D. Plumb, R. V.enty, and I. H. White, "Enhanced 10-Gbit/s link performance for directly modulated complex-coupled DFB lasers via resonance frequency, damping rate, and chirp," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 11, pp. 1112-1120, 2005.
- [13] C. W. Hu, F. M. Lee, K. F. Huang, M. C. Wu, C. L. Tsai, Y. H. Huang, and C. C. Lin, "Uncooled 1.3  $\mu\text{m}$  complex-coupled DFB BH laser diodes with the Fe-doped InGaAsP/InP hybrid current-blocking grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, (in press) 2006.
- [14] M. Levinshtein, S. Rumyantsev, and M. Shur, in *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, vol. 2 p. 156, World Sci. Pub. Co., Singapore, 1996.
- [15] T. L. Paoli, "A new technique for measuring the thermal impedance of junction lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-11, pp. 498-503, 1975.
- [16] N. Hwang, S. G. Kang, H. T. Lee, S. S. Park, M. K. Song, and K. E. Pyun, "An Empirical reliability prediction method for 1.55  $\mu\text{m}$  InGaAs/InP MQW-DFB laser diodes," in *IEEE Proc. Electronic Components and Technology Conf.*, pp. 1269-1271, San Jose, California, U.S., 1997.

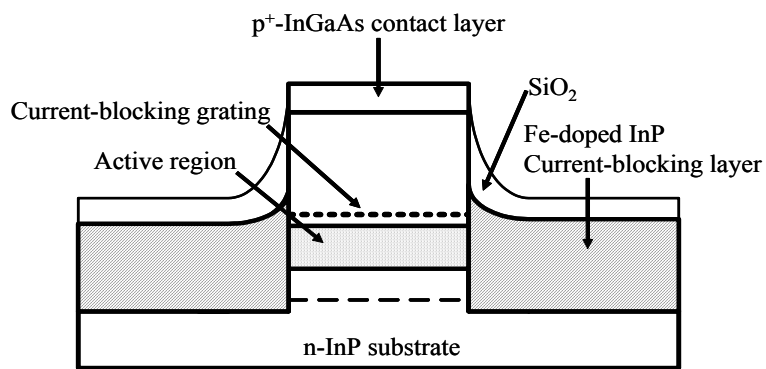
40 nm Fe-doped InGaAsP
40 nm Fe-doped InP
i-InGaAsP GRIN-SCH confinement layer (100 nm)
5 nm $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.66}\text{P}_{0.34}$ wells (0.85% compressive strain) 9 nm $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}_{0.37}\text{P}_{0.63}$ barriers (0.45% tensile strain) 5 pairs
i-InGaAsP GRIN-SCH confinement layer (100 nm)
n-InP buffer layer (400 nm)
InP substrate

$\text{p}^+$ -InGaAs contact layer
p-InP waveguide layer
40 nm Fe-doped InGaAsP
40 nm Fe-doped InP
i-InGaAsP GRIN-SCH confinement layer (100 nm)
5 nm $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.66}\text{P}_{0.34}$ wells (0.85% compressive strain) 9 nm $\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}_{0.37}\text{P}_{0.63}$ barriers (0.45% tensile strain) 5 pairs
i-InGaAsP GRIN-SCH confinement layer (100 nm)
n-InP buffer layer (400 nm)
InP substrate

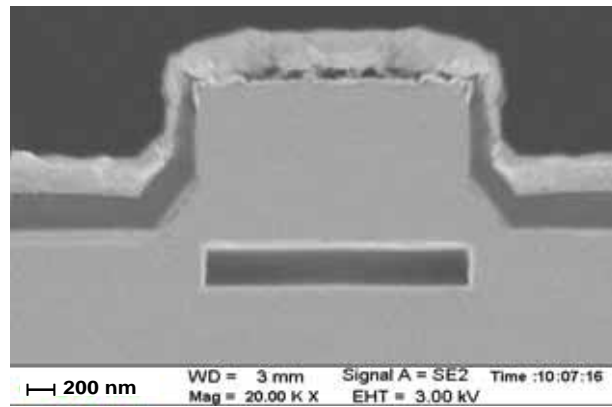
圖一. (a)分佈回授型雷射之基本結構及(b)二次磊晶之完整雷射結構



(a)

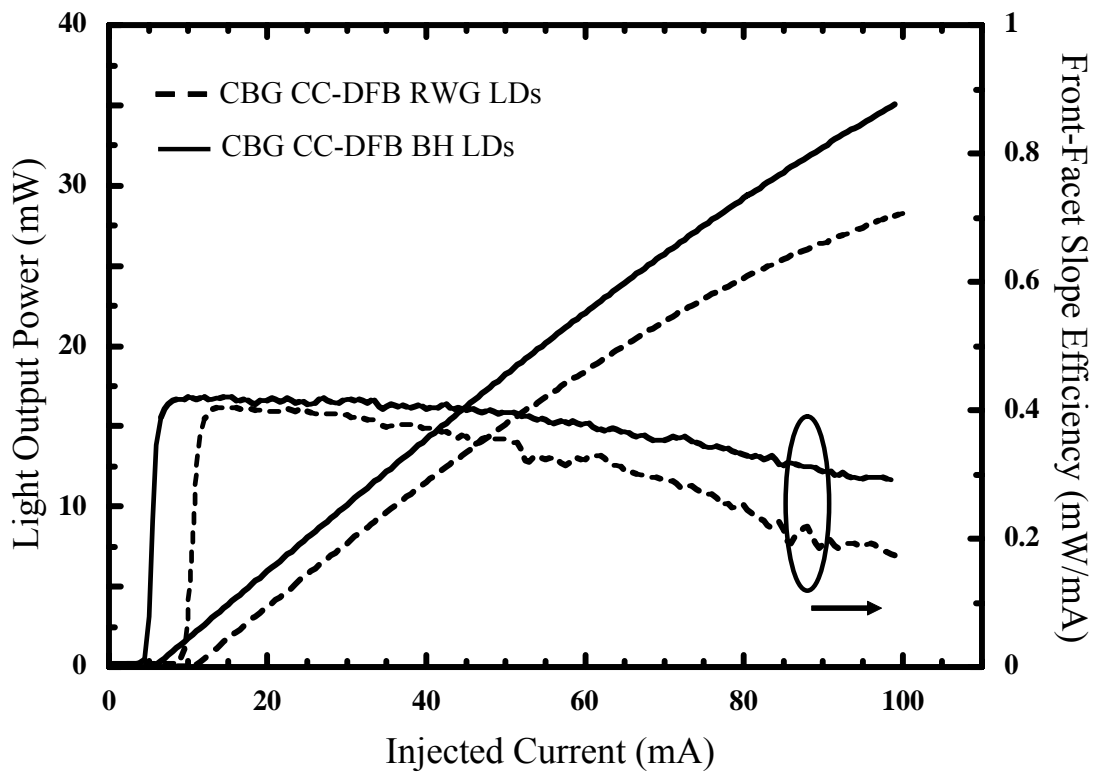


(b)



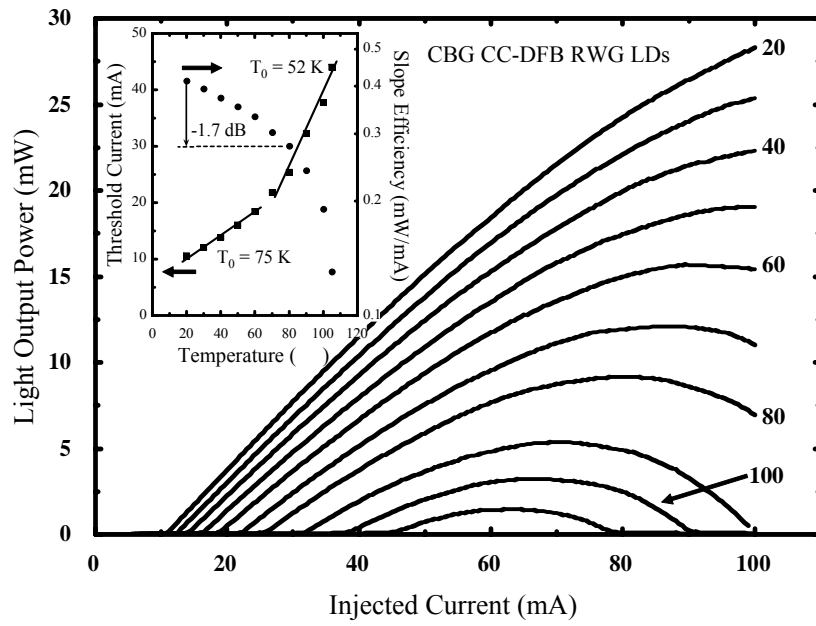
(c)

圖二. (a) SEM cross-section image of 1.3  $\mu\text{m}$  CBG CC-DFB LDs. (b) Schematic device structure and (c) SEM image of the completed CBG CC-DFB BH LDs across the ridge stripe.

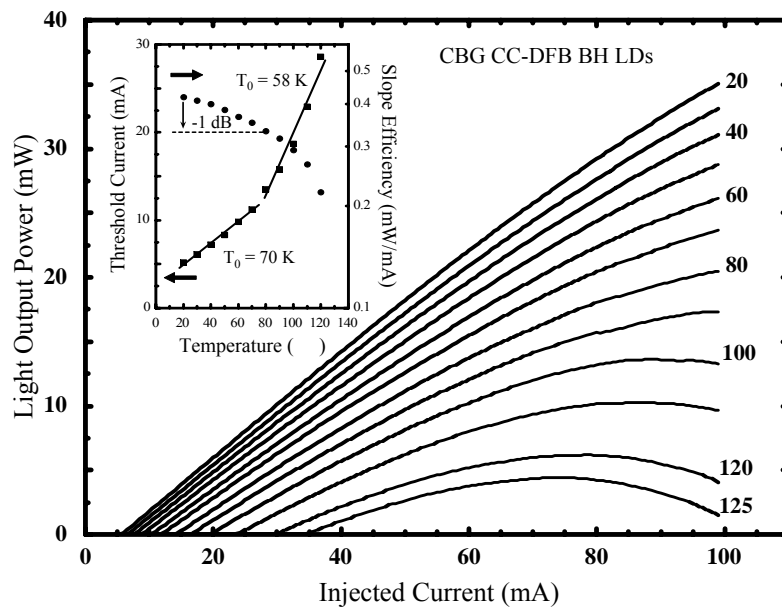


圖三. Light output power and front-facet slope efficiency ( $\eta_d$ ) at 20  $\mu\text{m}$  as a function of injection current for both LDs with an as-cleaved front facet and a high-reflectivity coating ( $\sim 92\%$ ) applied to the rear facet.



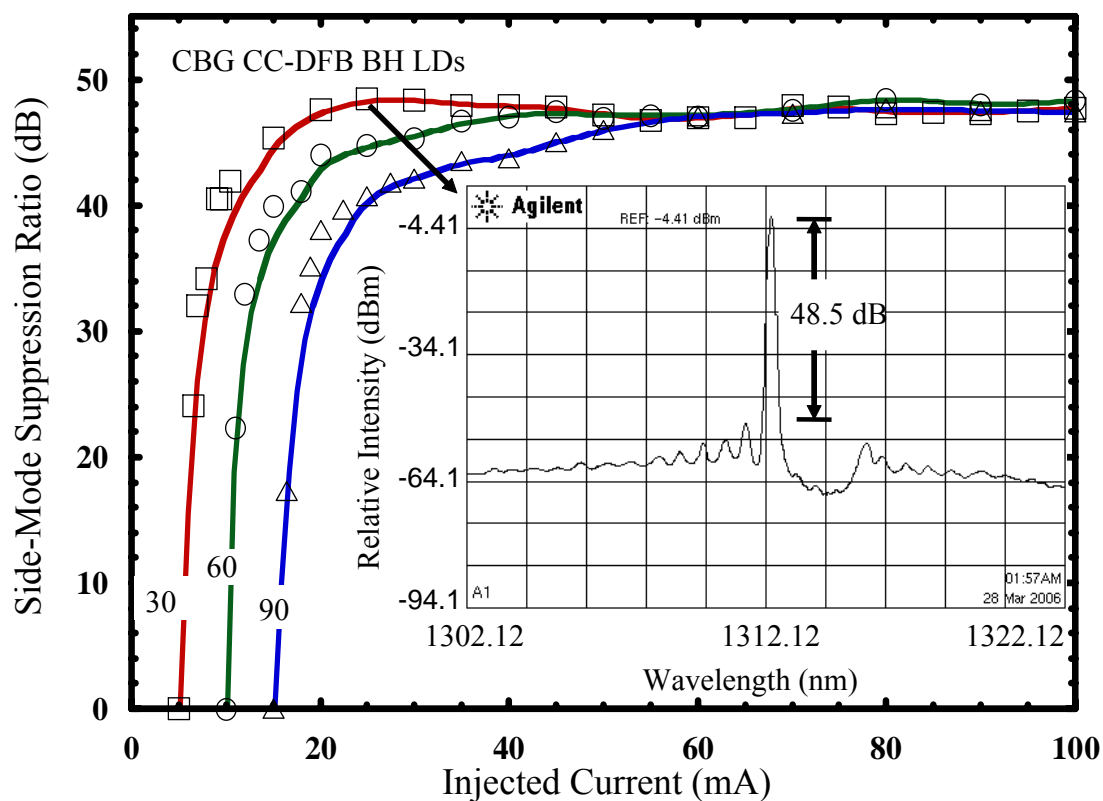


(a)

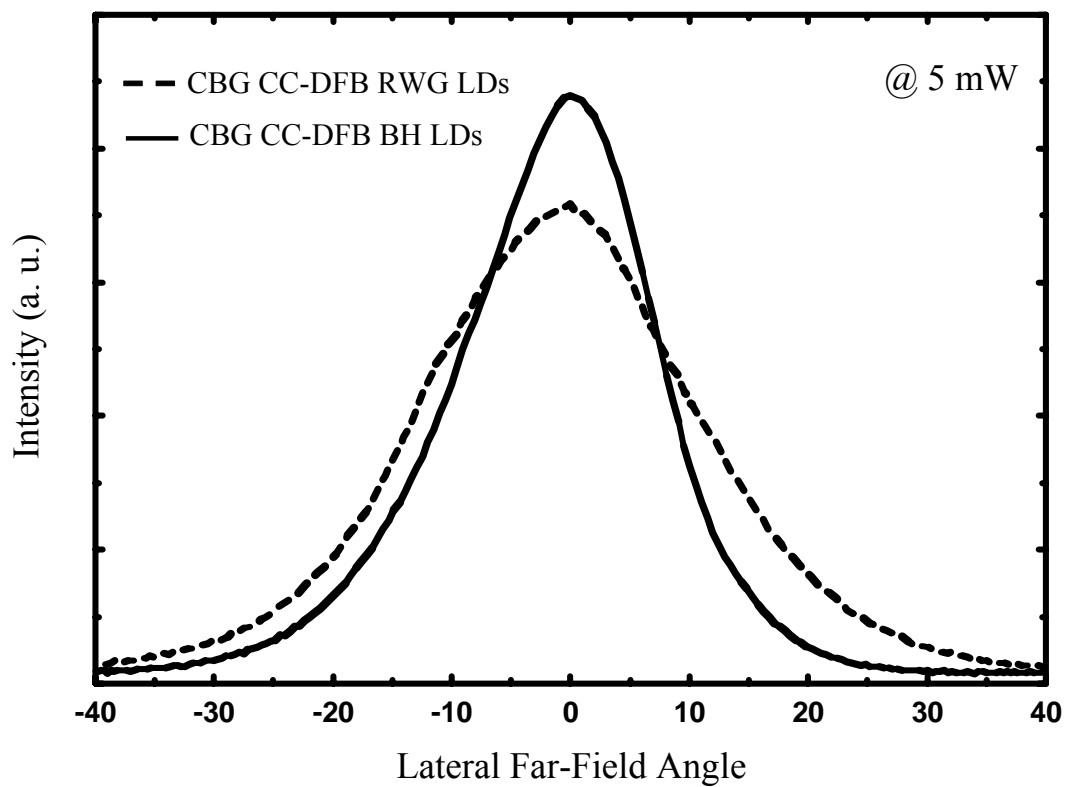


(b)

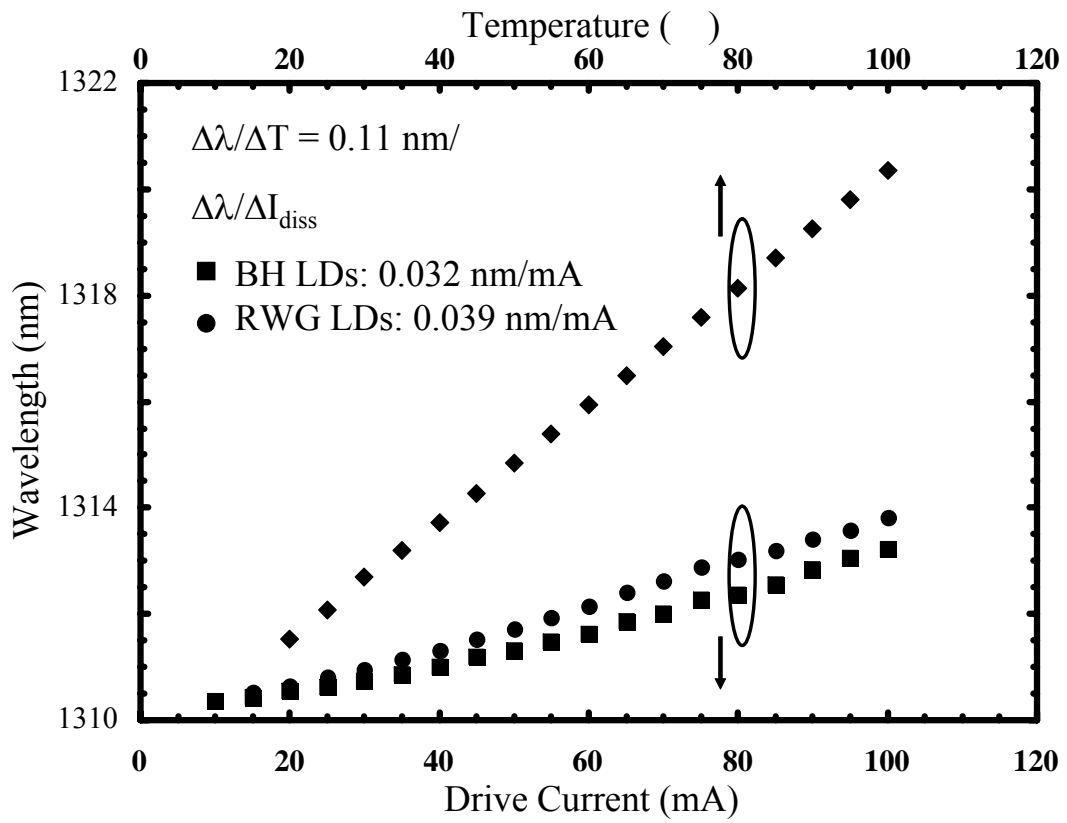
圖四. Light output power versus injected current (L-I) characteristics at various temperatures for the 300- $\mu$ m-long CBG CC-DFB (a) RWG and (b) BH LDs with an as-cleaved front facet and a high reflectivity coating ( $\sim 92\%$ ) applied to the rear facet. The insets show the temperature dependence of threshold current and front-facet slope efficiency for both LDs.



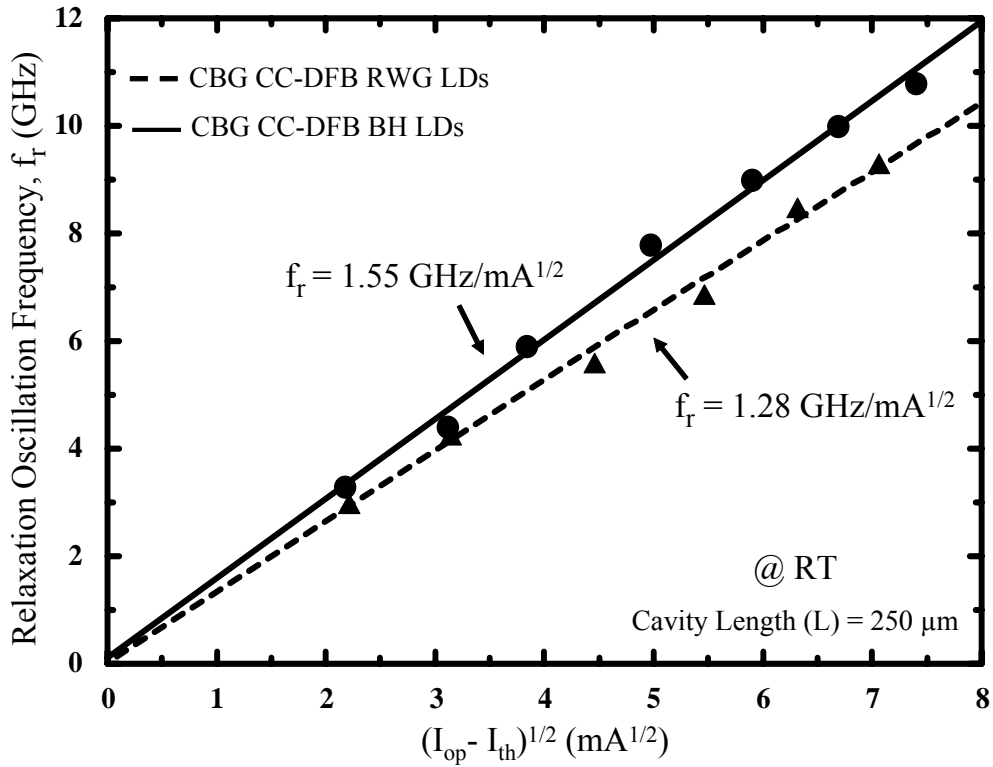
圖五. Side-mode suppression ratio (SMSR) against the injected current at 30, 60, and 90 for the CBG CC-DFB BH LDs. The inset shows the lasing spectrum obtained at a drive current of 25 mA with the SMSR of 48.5 dB.



圖六. The measured lateral far-field patterns at the 5-mW light output power from the front facet of CBG CC-DFB RWG (dashed line) and BH (solid line) LDs.



圖七. Dependence of the lasing wavelength of the DFB mode on the ambient temperature and the dissipated input current.



圖八. (a) Frequency response for the 1.3 μm CBG CC-DFB BH LDs at various DC bias currents. The inset of Fig. 7(a) shows the 3-dB frequency at a bias current of 50 mA and 30, 60, and 90 (b) Relaxation oscillation frequency ( $f_r$ ) against the square root of bias current above the threshold  $(I_{op} - I_{th})^{1/2}$  at room temperature.