

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

設計與研製具繞射光學元件之綠色發光二極體/微型共振腔 發光二極體(I) 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 96-2221-E-182-050-
執行期間：96年08月01日至97年07月31日
執行單位：長庚大學電子工程學系

計畫主持人：蔡家龍

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：黃茹屏
碩士班研究生-兼任助理人員：林家慶
碩士班研究生-兼任助理人員：劉冠顯
博士班研究生-兼任助理人員：呂元傑

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97 年 10 月 19 日

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告 ☐ 完整報告

執行單位：長庚大學電子系

中 華 民 國 97 年 10 月 20 日

設計與研製具繞射光學元件之綠色發光二極體/微型共振腔發光二極體(I)

“Design and Fabrication of the Green Emission Light Emitting Diodes / Micro Cavity Light Emitting Diodes with Diffractive Optical Element for Plastic Optical Fiber Applications”

計畫編號：NSC 96-2221-E-182-050

執行期間：96 年 8 月 1 日 至 97 年 7 月 31 日

主持人：長庚大學電子所 蔡家龍 助理教授

1. 中文摘要

本文章中，將以雷射剝離技術(LLO)研製薄膜共振腔發光二極體(TF-RCLED)。實驗上， $\lambda/4$ 厚高反射率的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 薄膜和銀將分別被覆在LED上以形成微光學共振腔。我們將經由光輸出功率、外部量子效率、激發光譜、遠場角光強度分佈和眼圖的量測來評估元件特性的優劣。結果顯示，TF-RCLED在電流 20 mA，有較低的操作電壓 3.34 V，其最大光輸出功率在 140 mA下可達到 6.3 mW，在電流 4 mA下能有 5.5%的外部量子效率。此外TF-RCLED與正規sapphire基板的LED相比其較無散熱上的問題。同時TF-RCLED的視角小於正規LED，即在電流 60 mA下，為 146 度對 168 度。最後，受限於p-n介面電容過大導致TF-RCLED有限的調變頻寬，當資料在傳輸速率 100 Mbit/s下其眼圖會出現些許雜訊。

英文摘要

In this article, the laser lift-off (LLO) technique is used to fabricate the thin-film resonant-cavity light-emitting diodes (TF-RCLEDs). Experimentally, the high reflectivity mirrors of the $\lambda/4$ -thick $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ dielectric stacks and Ag layer were respectively induced into LED to form an optical microcavity. The performances of LEDs are characterized by light output power, external quantum efficiency, emission spectrum, angular-resolved intensity distribution, and

dynamic response. As a result, TF-RCLED exhibits a low operating voltage of 3.34 V at 20 mA, a maximum light output power of 6.3 mW at 140 mA, external quantum efficiency of 5.5 % at 4 mA, and cavity quality factor (Q) of 85 at $\lambda = 511 \text{ nm}$ at 20 mA. In addition, TF-RCLED shows temperature insensitivity as compared to the normal LED with sapphire substrate. Further, the 50% view angle of TF-RCLED is smaller than that of normal LED, i. e., 146° versus 168° at 60 mA. Finally, due to the limited modulation bandwidth of the TF-RCLED, the eye pattern becomes noisy as these device operated at data transmission rate of 100 Mbit/s. Further improve the dynamic characteristics can be achieved by optimizing the dimensions of the LEDs to reduce the parasitic capacitance.

2. 計畫的緣由與目的

近來III-V族氮化物半導體的發展已引起廣泛注意，主要原因為氮化物LED可應用在顯示器、交通號誌、車燈和LCD背光源等領域。通常氮化物LED的複合效率不佳，這是因為晶體高錯位密度導致結晶品質劣化及源於晶格不匹配造成極化效應所致。由於氮化物和空氣間折射係數差大，使得LED光萃取效率不高，臨界角大約是 23° ，所以光大部分因全內反射而引導到水平方向或者是再被內部材料吸收。為了減少全反射和改善光萃取效率，很多方法被提出以增加光子從半導體射出的機會，如設計LED側邊結構成具角度

的形貌，這將有助於光的萃取效率，實驗結果顯示效率提高了約~2 倍。此外，經由搭配使用微光學繞射元件和表面粗化方式也可增加光耦合至外界的數量。除了改變LED表面型態外，利用微光學共振腔也能增加光萃取效率，這是因為共振腔可改變光模態分佈使得光子傾向聚焦於垂直共振腔方向的萃取圓錐角度內。

另一方面，影響LED特性優劣的關鍵因素在於能否有效解決元件運作時所產生的焦耳熱。氮化物LED是成長在低熱導係數($\sim 35 \text{ Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)的藍寶石基板上，這將不利於p-n接面的熱散逸並進而影響到元件操作特性，因此研究以高熱傳導材料取代sapphire基板將有效解決元件散熱問題。

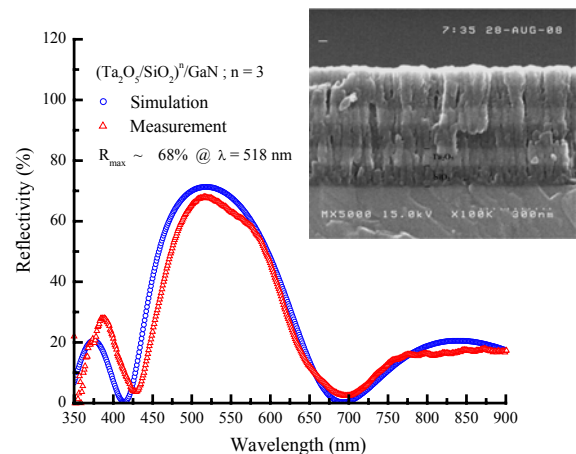
本篇內容中，我們將以雷射剝離技術(LLO)及介質型布拉格反射鏡(DBR)，研製510nm 薄膜共振腔發光二極體(TF-RCLED)。考量 Ta_2O_5 薄膜有良好化學、光學特性、熱穩定度以及高反射係數，我們將以 $\lambda/4$ Ta_2O_5 與 SiO_2 薄膜構成DBR，另外我們將做直流分析並討論元件的動態特性。如結果所示，和正規LED相比，TF-RCLED有更好的量子效率、方向性、光譜純度和調變速度。

3. 研究方法及成果

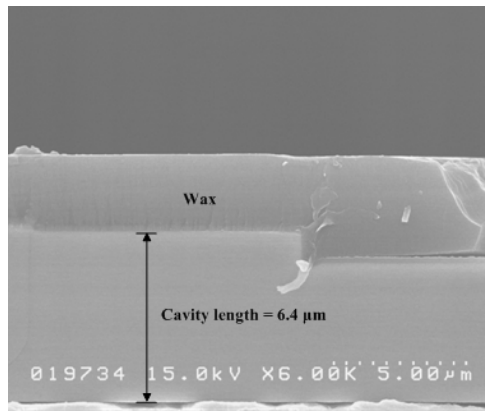
本實驗以MOVPE成長InGaN在c-face sapphire上，使用methyl-organometallics和 NH_3 當作source， Cp_2Mg 和 SiH_4 分別為p和n型摻雜源。正規LED的結構為，30-nm成核層、3.5- μm u-GaN、2.5- μm Si-doped n-GaN、InGaN-GaN MQWs、Mg-doped p-GaN，主動區由8對3 nm $\text{In}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}$ well和20 nm GaN barrier組成。

元件製程是以微影術、金屬化、LLO和封裝技術來研製表面發光LED元件。首先，以E-beam蒸鍍ITO當作透明導電層(250nm)在wafer上，並利用氧化物當作mask以ICP從

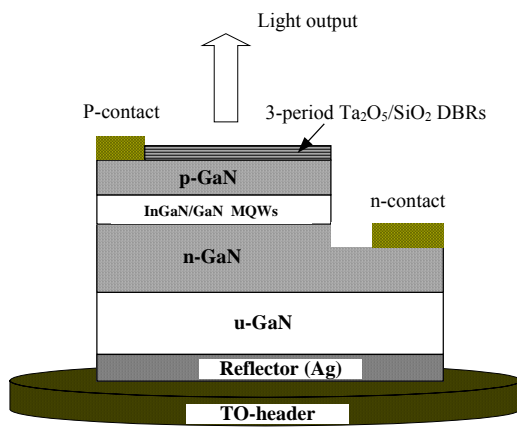
p-GaN表面蝕刻到n-GaN形成一 $250 \times 200 \mu\text{m}^2$ mesa，接著在TCLs及n-GaN上蒸鍍鉻金當作p(n)電極。為了實現共振腔，我們在LED上面鍍上 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 高反射的鏡子。圖一為三對 $\lambda/4$ 厚的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 布拉格反射鏡，在520 nm下， Ta_2O_5 和 SiO_2 折射係數約1.9、1.46。 Ta_2O_5 跟文獻資料比起相對較小，可能是因為密度不夠和薄膜結晶性不佳所致，然而在518 nm反射率可到68%足夠RCLED使用。此外，由於有效地控制薄膜厚度和折射率，所得結果非常符合計算值，如圖一。LLO製程之前，LED和Si基板暫時用wax黏在一起。將248 nm pulse laser聚焦在GaN、sapphire界面，分解GaN為Ga和 N_2 。整片wafer經過雷射照射過，GaN epilayer會和sapphire分離並且轉移到Si基板上，最後Ga以鹽酸去除。GaN表面粗糙度經AFM計算為14.8 nm。最後以反射率為97%的銀鍍在undoped GaN上當作TF-RCLED的bottom mirror，圖二顯示無基板LED的SEM剖面圖，共振腔長度大約6.4 μm 。在切成小塊狀後，把TF-RCLED chip鑲嵌在TO-64上，然後將wax溶解使得Si基板脫離，最後成品如圖二。在這研究中，LED使用Keithley Model 2400和Newport積分球來量測光輸出功率，此外，使用0.5m大小光柵，利用標準的lock-in技術以Si光二極體去量測EL光譜。



圖一 三對 $\lambda/4$ 厚的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 布拉格反射鏡



(a)

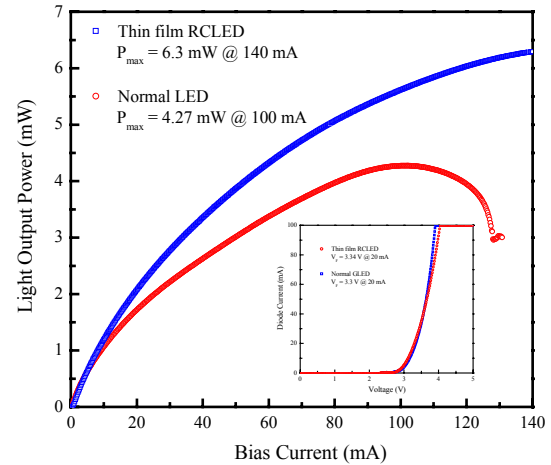


(b)

圖二 (a) 無基板 LED 的 SEM 剖面圖，共振腔長度大約 6.4 μm。(b) TF-RCLED 結構示意圖。

圖三顯示TF-RCLED和正規LED在 300K 時，光輸出功率、電壓和注入電流間的關係。TF-RCLED在電流 20 mA下，其操作電壓大約 3.34 V，和正規LED做比較，TF-RCLED 電特性不會隨著雷射剝離基板後而變差。注入電流在 100 mA以下，TF-RCLED的光輸出功率大於正規的LED。從圖顯示，在電流 100 mA，TF-RCLED的光輸出功率是正規LED的 1.5 倍，而且對應外部量子效率(η_{ext})分別為 2.31 和 1.79。另一方面，正規LED隨著電流增加到 97 mA，其光輸出功率也隨之增加，大約在電流 97 mA即飽和，當操作電流超過 105 mA時，則逐漸地降低。這意味著引入微光學共振腔，因為光學干涉效應，使橫向光

導引至萃取圓錐體內而明顯的改善光萃取效率。除此之外，因為p-n接面(p-n junction)產生的熱可垂直地傳導到封裝基座上，因此TF-RCLED能有效的操作在較高電流並擁有較高的光輸出功率。



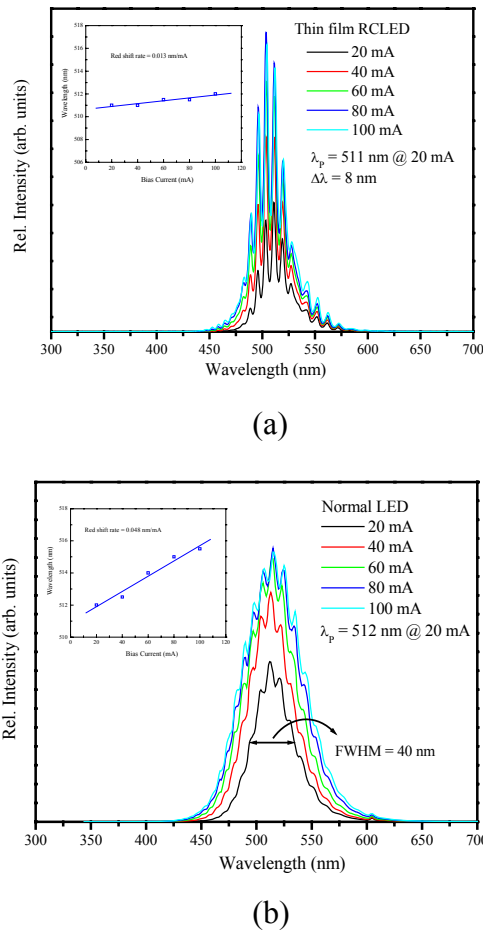
圖三 TF-RCLED 和正規 LED 在 300K 時，光輸出功率、電壓和注入電流間的關係。

圖四(a) & (b)為室溫下，TF-RCLED 和正規 LED 在不同電流下的 EL 頻譜，在圖中皆插入電流對峰波長關係的圖表。起源於光學干涉效應及較長的共振腔體，在 TF-RCLED 的 EL 頻譜上有許多強烈的 Fabry-Perot 模態出現。另外，鄰近模態間距是 8 nm，在 $\lambda = 511$ nm，20 mA 下對應於共振腔體的品質因素(cavity quality factor)為 85。理論的模態間距 $\Delta\lambda$ 定義如下：

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_o^2}{2 n_{eff} L}$$

其中 λ_o 為真空中波長，L 為共振腔長度， n_{eff} 為有效折射率。將 $\lambda_o = 511$ nm， $n_{eff} = 2.39$ 在 510 nm，共振腔長度(cavity length)約 6.4 μm代入，理論上的模態間距為 8.5 nm。因此，量測值與計算是大致一致的。因為 RCLED 的光萃取效率與共振腔長度成反比，故共振腔長度盡可能的縮小是必要的。實驗上，希望讓共振腔接近光的波長使得共振腔內僅容許單一 Fabry-Perot 模。因此，可

使用乾蝕刻(dry-etch)減少TF-RCLED的有效共振腔長度以改善元件特性。

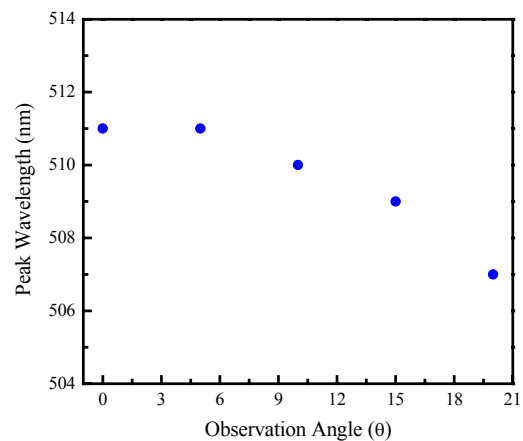


圖四 (a) & (b)為室溫下，TF-RCLED 和正規 LED 在不同電流下的 EL 頻譜。

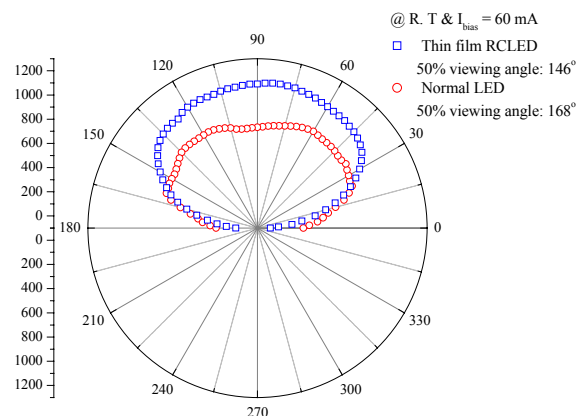
另一方面，正規 LED 在電流 20 mA 其峰波長在 512 nm，而且半高寬(Full Width at Half Maximum, FWHM)為 40 nm。此外，當注入電流從 20 mA 增加到 100 mA，其峰波長變化從 518 nm 到 521.5 nm。對於一般 InGaN LED，因為量子侷限史托克效應(quantum-confinement Stark effect)以及局部狀態填滿效應，當電流增加會使得波長產生藍移，但本實驗正規 LED 由於焦耳熱(Joule heating)，會有一紅移： 0.048 nm/mA 。相對的，TF-RCLED 紅移速度為 0.013 nm/mA ，表示較少的溫度敏感性。此外，峰波長對注入電流關係可以被拿來預估其熱特性。TF-RCLED 和正規 LED 當電流從 20 mA 變化到 100 mA 時，其接面溫度分別增加 18 度

和 64 度，這表示 TF-RCLED 的熱消散能力比正規 LED 好。

一般來說，RCLED 的發射波長和觀測視角(相對於垂直方向)有關。圖五顯示，視角從 0 度增加到 25 度，發射波長從 511 nm 往短波長移動到 504.5 nm。因為隨著角度的增加，光學共振腔長度減少，為了滿足建設性干涉條件，使得共振腔波峰產生藍移。圖六是 TF-RCLED 和正規 LED 在室溫下，所量測的遠場強度分佈(angular-resolved intensity distribution)圖。TF-RCLED 的視角小於正規的 LED，在電流 60 mA 下，TF-RCLED 為 146 度，正規的 LED 則為 168 度。由於共振腔效應，發射光會沿著垂直方向前進，因此，TF-RCLED 的方向性及 EL 強度均較正規的 LED 更為優越。

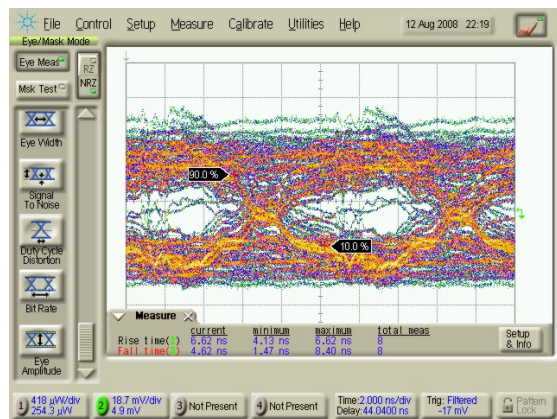


圖五 不同觀測視角下對應的 RCLED 發射波長



圖六 TF-RCLED 和正規 LED 在室溫下，量測所得的遠場強度分佈圖。

對於數位通訊，傳輸位元率代表元件可以被調製的快慢，是一項很重要的指標參數。在此研究中，偏壓電流和nonreturn-to-zero (NRZ) pseudorandom bit sequence (PRBS) 一起疊加至To-package RCLED上。之後，光耦合入塑膠光纖(POF)中並在末端以頻寬 100 MHz的silicon detector來偵測光信號，對應的信號將顯示在寬頻示波器上。圖七為TF-RCLED的眼圖，量測條件為操作電流 100 mA、100 Mbit/s、 $V_{pp} = 1.55$ V以及PRBS = 2^7-1 。從圖中顯示，上升時間(rise time)和落下時間(fall time)分別為 6.6 ns和 4.6 ns。然而，眼圖有輕微地雜訊當資料傳送速率在 100 Mbit/s，這可能歸咎於大元件尺寸，因此使得TF-RCLED調變速度受限。雖然大的元件尺寸可以產生較高的光輸出功率，但過大的接面電容造成RC時間常數增加並進而影響元件動態特性。



圖七 TF-RCLED的眼圖，量測條件為操作電流 100 mA、100 Mbit/s、 $V_{pp} = 1.55$ V 及PRBS = 2^7-1 。

4. 結論與討論

我們已經成功研製出薄膜共振腔發光二極體(TF-RCLED)。TF-RCLEDs 顯示在 20 mA，有較低操作電壓 3.34 V，和在電流 140 mA，有最大光輸出功率 6.3 mW。因為 p-n 接面(p-n junction)產生的熱可垂直地傳導到封裝基座，TF-RCLEDs 在操作範圍 20 mA 到 100 mA 下，增加的接面溫度只有 18 度。此外，TF-RCLEDs 在電流 60 mA 時，其 50%

視角為 146 度。這些結果均較正規的 LED 佳。最後，因為 TF-RCLEDs 頻寬有限，當資料操作在傳送速率 100 Mbit/s 時，眼圖變得有輕微地雜訊。

計畫成果自評

本計畫主要之具體貢獻有：

- 1.完成薄膜共振腔發光二極體研製
- 2.完成介質型布拉格反射鏡研製
- 3.計畫成果已投稿 JVST B (2008)

且本計畫研究項目之適用應用領域計有：

- 1.短距離塑膠光纖通訊
- 2.工廠自動化設備
- 3.汽車工業
- 4.全彩顯示器

致謝

此計畫感謝國科會予以提供經費支助(NSC 96-2221-E-182-050)。

參考資料

1. B. Gil, *Group III Nitride Semiconductor Compounds – Physics and Applications*, chapter 4 (Clarendon Press: Oxford, 1998).
2. H Benisty, H. D Neve, and C Weisbuch, *IEEE J. Quantum. Electron.* 34, 1612 (1998).
3. J. S. Lee, J. Lee, S. Kim, and H. Jeon, *IEEE Trans. Electron. Dev.* 55, 523 (2007).
4. J. Wierer, M. R. Krames, J. E. Epler, N. F. Gardner, and M. G. Craford, J. R. Wendt, J. A. Simmons, and M. M. Sigalas, *Appl. Phys. Lett.* 84, 3885 (2004).
5. C. H. Chiu, M. H. Lo, T. C. Lu, P. Yu, H. W. Huang, H. C. Kuo, and S. C. Wang, *J. Lightwave. Technol.* 26, 1445 (2008).
6. H. Yokoyama, *Science* 256, 66 (1992).
7. T Egawa, B Zhang, H Ishikawa, *IEEE Electron. Dev. Lett.* 26, 169 (2005).
8. S. J. Wang, K. M. Uang, S. L. Chen, Y. C. Yang, S. C. Chang, T. M. Chen, C. H. Chen, and B. W. Liou, *Appl. Phys. Lett.* 87, 011111 (2005).
9. S.V. J. Chandra, S. Uthanna, and G. M. Rao, *Appl. Surf. Sci.* 254, 1953 (2008).

10. Y. S. Choi, M. Iza, E. Matioli, G. Koblmüller, J. S. Speck, C. Weisbuch, and E. L. Hua, *Appl. Phys. Lett.* 91, 061120 (2007).
11. S. Chichibua, T. Azuhata, T. Sota, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* 69, 4188 (1996).
12. C. F. Chu, F. I. Lai, J. T. Chu, C. C. Yu, C. F. Lin, H. C. Kuo, S. C. Wang, *J. Appl. Phys.* 95, 3916 (2004).
13. S. Y. Huang, R. H. Horng, H. C. Kuo, and D. S. Wu, *J. Electrochem. Soc.* 154, H962 (2007).
14. J. Dorsaz, H. J Bühlmann, J. F Carlin, N Grandjean, and M Ilegems, *Appl. Phys. Lett.* 87, 072102 (2005).