

應用於製備垂直結構氮化鎵基發光二極體之錫-基金屬基板技術

郭鴻毅、王水進*、王培任、汪楷茗、陳聰敏、管鴻

*國立成功大學電機資訊學院微電子工程研究所教授

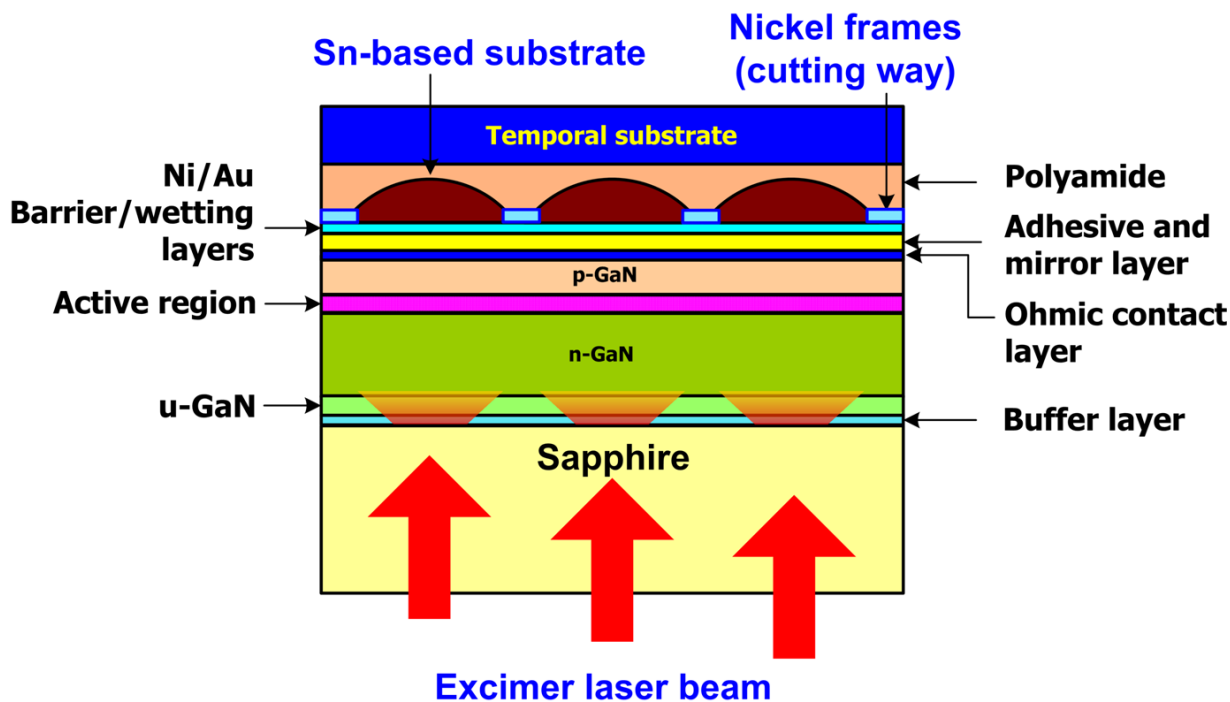
* sjwang@mail.ncku.edu.tw

APPLIED PHYSICS LETTERS 92, 021105 (2008)

近年來，發光二極體(light-emitting diode, LED)產業率皆積極投入發展高效能氮化鎵基(GaN-based)白光發光二極體(white LEDs)研發以作為液晶電視之背光模組、閃光燈以及一般照明等應用[1-2]。為克服傳統使用藍寶石絕緣基板、以 p 型氮化鎵(p -GaN)為最上層、電流橫向導通之水平結構氮化鎵基LED(regular LEDs)所衍生之電流聚積(current crowding)、非均勻出光與熱堆積(thermal accumulation)等問題，利用雷射剝離(laser lift-off, LLO)與電鍍或晶元鍵著(wafer bonding)等技術置換藍寶石絕緣基板以進行垂直結構氮化鎵基LEDs之製作，已為新一代之製程技術[2-5]。本實驗團隊近期曾發表一整合選擇性電鍍鎳基板與區塊雷射剝離技術(patterned LLO)，以製備具免切割金屬基板垂直結構氮化鎵基LEDs ((Vertical structure Metal substrate LEDs, VM-LEDs)[4]，其優勢除可有效增強發光強度、低元件順向壓降外，更避免一般厚膜金屬基板切割不易之問題。



錫-基鎵材金屬因具有較佳之電導與熱導能力，已被廣泛使用之晶粒黏著製程，亦常見用於高效能LEDs之封裝。本研究旨在提出一整合錫-基鎵球與金/鎳濕潤阻障層作為VM-LEDs免切割金屬基板之新穎技術，與先前電鍍金屬或鍵著基板技術比較，實驗證實可擁有大幅縮短基板置換製程時間、降低生產成本、與優異的光電特性等之優點。



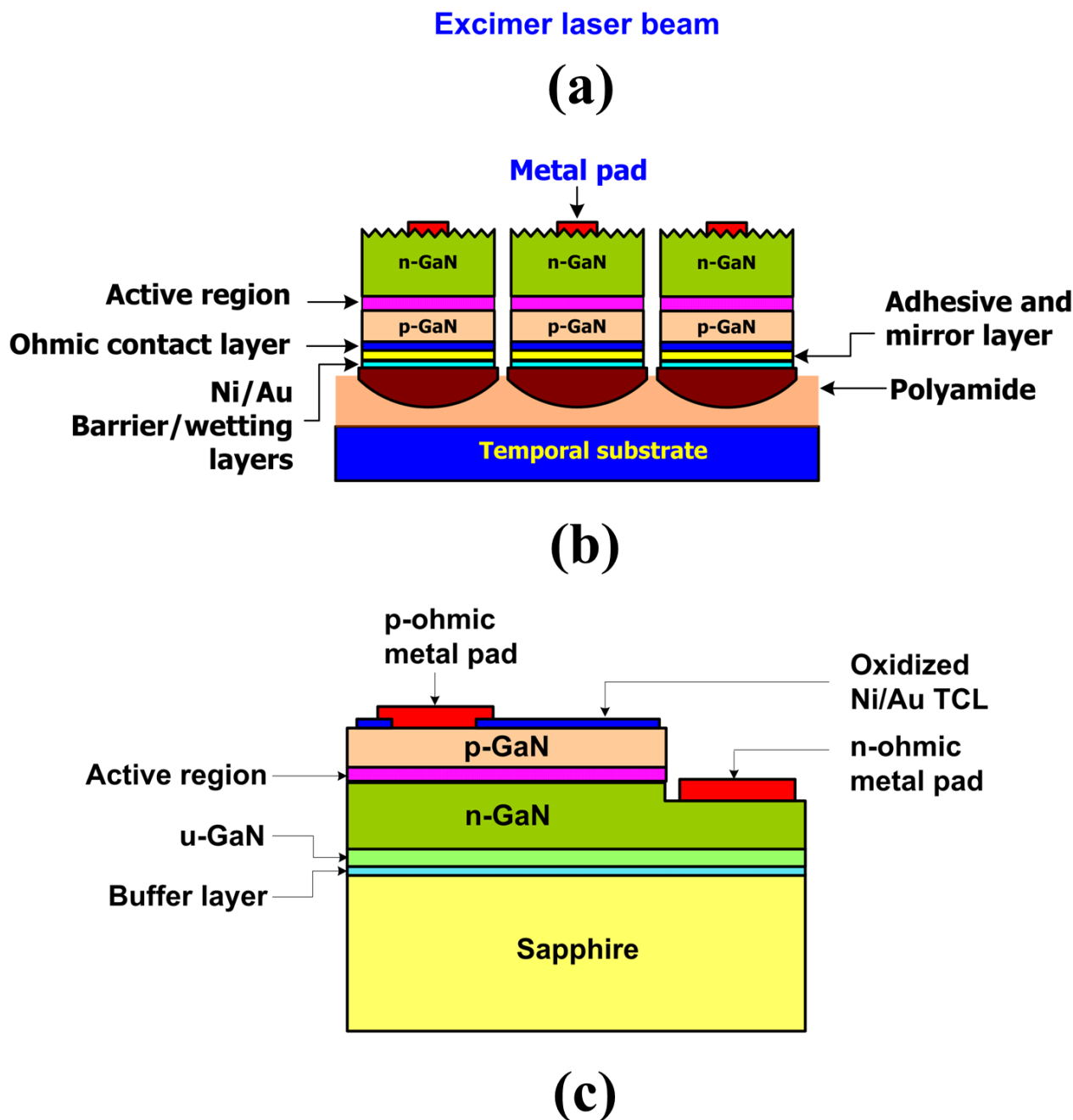


圖1、整合錫-基鋅球與金/鎳濕潤阻障層之VM-LEDs關鍵製程示意圖。(a)植球、迴鍍與LLO階段製程，(b) n-GaN表面粗化與電極製作階段製程，(c)傳統橫向結構regular LED結構示意圖。

圖1(a)與(b)所示為本研究所採用整合錫-基鋅球與金/鎳濕潤阻障層之VM-LEDs關鍵製程示意圖。本實驗所使用的氮化鎵晶元試片係以MOCVD成長於藍寶石基板之上[6]。經標準清潔程序後，於試片之p-GaN上以電子束蒸著系統(e-beam)依序沉積歐姆金屬接觸、鏡面反射/附著層、鎳阻障層與金濕潤層。此處所使用之歐姆接觸為氧化鎳金(oxidized Ni/Au)，而鏡面反射與附著層為鈦/鋁/鈦/金(Ti/Al/Ti/Au)結構[4]。

為免除整面金屬基板切割不易之困擾，預先以厚光阻SU8-2035定義出 $750 \times 750 \mu\text{m}^2$ 之元件區域(device region)與 $90 \mu\text{m}$ 寬之切割道(cutting way)後，於定電流1.7 A下，進行選擇性電鍍鎳10分鐘以形成厚為 $10 \mu\text{m}$ 之鎳網格於切割道上供植置錫-基鋅球時之對準與固著。植球製程所使用之錫-基鋅球之直徑為 $350 \mu\text{m}$ 。之後，以快速升溫退火機台(RTA)於 $280-300^\circ\text{C}$ 區間進行迴鍍90秒形成區塊化錫-基金屬基板[圖1(a)]。原切割道上供植球對準/固著之鎳金屬網格，於迴鍍過程中因其與下層結構間熱膨脹係數之差異而自行移除(self-removed)。此一新穎製程與習知整面電鍍金屬基板技術相較，可大幅縮短基板形成時間。此外，尚可藉由調變錫基鋅球的合金成份與比例，進一步提升其熔點並改善熱導，以利所製得LED無礙於印

刷電路板之表面黏著製程應用[7]。

將完成區塊化錫-基金屬基板製備之試片，妥善黏著於矽暫時基板後，即進行區塊雷射剝離(LLO)製程。此一LLO製程係透過光罩定義雷射光束之大小($620 \times 620 \mu\text{m}^2$)、圖案與雷射擊發區間之控制，於藍寶石基板與氮化鎵磊晶之介面引發氮化鎵區塊化解離反應，精確定義出元件發光區(emission area)之大小與切割道之距離[圖1(a)]，其間GaN解離反應所需能量約為 $850 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ [4, 6]。宜注意，為避免磊晶層結構邊緣於LLO製程發生碎裂、提升製程良率，雷射反應區域面積(亦即元件之實際發光面積)與金屬基板面積(亦即網格面積)之比例，必須限制小於1之範圍內。本研究採用數值為0.82。最後，將經LLO製程處理後之試片置於 40°C 加熱平台上10分鐘，將藍寶石基板移除。

移除藍寶石基板後試片上磊晶層表面係為一低摻雜氮化鎵(*u*-GaN)層，俟以電感式耦合電漿乾蝕刻系統(inductively coupled plasma)去除後，即裸露出底層*n*-型氮化鎵(*n*-GaN)。於此，我們將此試片置於6 mol、 60°C 之氫氧化鉀溶液90秒對*n*-GaN進行表面粗化處理以增強光析出能力並改善其電性[6]。接著，以1:1之鹽酸(HCl)與純水(H_2O)混合液及氫氟酸(HF)洗滌以及*e*-beam沉積所需之Ti/Al/Ti/Au電極金屬。至此即完成區塊化錫-基金屬基板VM-LEDs之製備[圖1(b)]。為驗證本研究提技術之進步性，我們亦利用同一磊晶基板進行傳統水平結構橫向導通regular LED之製備，以進行元件之光電特性比較。

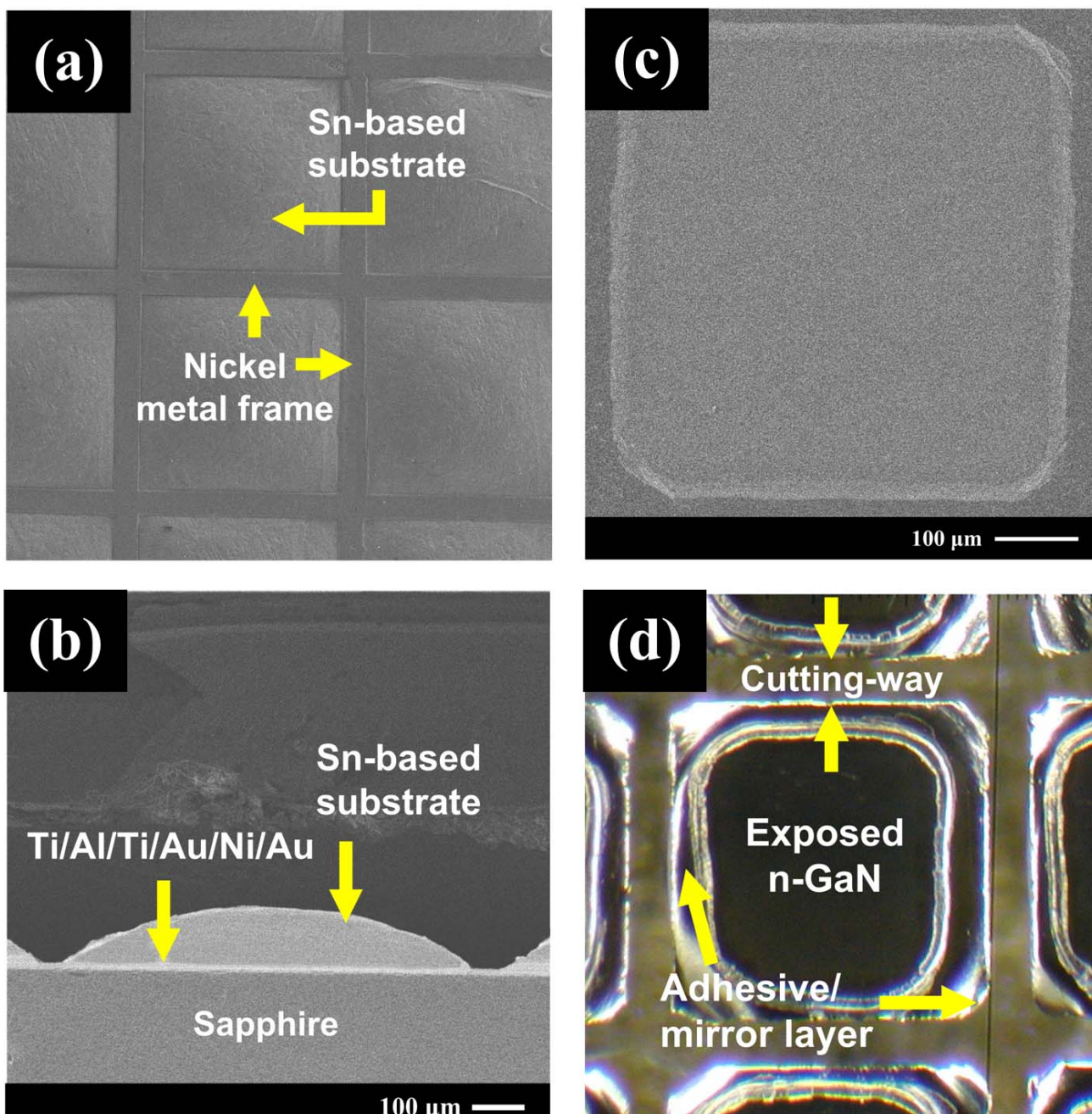




圖2、整合錫-基鋅球與金/鎳濕潤阻障層之VM-LEDs於各關鍵製程階段之電子顯微鏡及光學顯微鏡照片。(a)完成錫球迴錫基板後之上視圖，(b)完成錫球迴錫基板後之側向剖面圖，(c)完成LLO製程後所裸露出之 n -Ga N 磊晶表面，(d)鎳金屬網格自行移除後試片之上視圖。

圖2(a)所示為實驗試片完成錫球迴錫後形成錫-基金屬基板試片之上視圖，所製得之基板上方略呈橢圓型狀，主因錫基合金之內聚力所致。圖2(b)所示為完成錫球迴錫基板後之側向剖面圖，其中顯示磊晶與基板介面間具有良好的平坦度。圖2(c)所示為完成LLO製程後所裸露出之 n -Ga N 磊晶平滑完整表面。圖2(d)清楚的顯示切割道上之鎳金屬網格於RTA迴錫後，已確實完整自行移除。

圖3所示為所製備VM-LEDs與regular LEDs之實驗電流-電壓(I-V)特性曲線圖。於順向電流(injection current, I)為350 mA之操作條件下，VM-LEDs與regular LED之順向壓降 V_F (串聯電阻 R_s)分為3.46 V(1 Ω)與4.51 V(3 Ω)。VM-LED較低之 V_F 與 R_s 值，主因其 n -Ga N 向上的垂直導通結構。基本上， n -Ga N 之片電阻較 p -Ga N 小，有助於電流之擴散；而其VM-LED垂直導通之路徑長度僅為磊晶厚度($\sim 4 \mu\text{m}$)，遠小於regular LEDs其橫向導通於正負兩電極間之路徑長度($\geq 100 \mu\text{m}$)。若進一步與習知選擇性電鍍鎳金屬基板[4]及電鍍銅基板技術[5]所製備之元件I-V特性比較，本研究所製備VM-LEDs之發光面積雖較小，其於順向壓降之特性仍相當優異。圖3之內插圖為VM-LEDs與regular LEDs之反向I-V特性曲線，顯示VM-LEDs之反向特性略遜於regular LEDs。此結果應係肇因於所採用區塊LLO製程雷射能量分佈不均，導致多重量子井(multi-quantum-wells, MQWs)磊晶結構區域之線狀錯位(threading dislocations)密度增大或晶方週邊損傷[8]所致。此一現象預期於LLO製程能量最適化後將可獲改善。

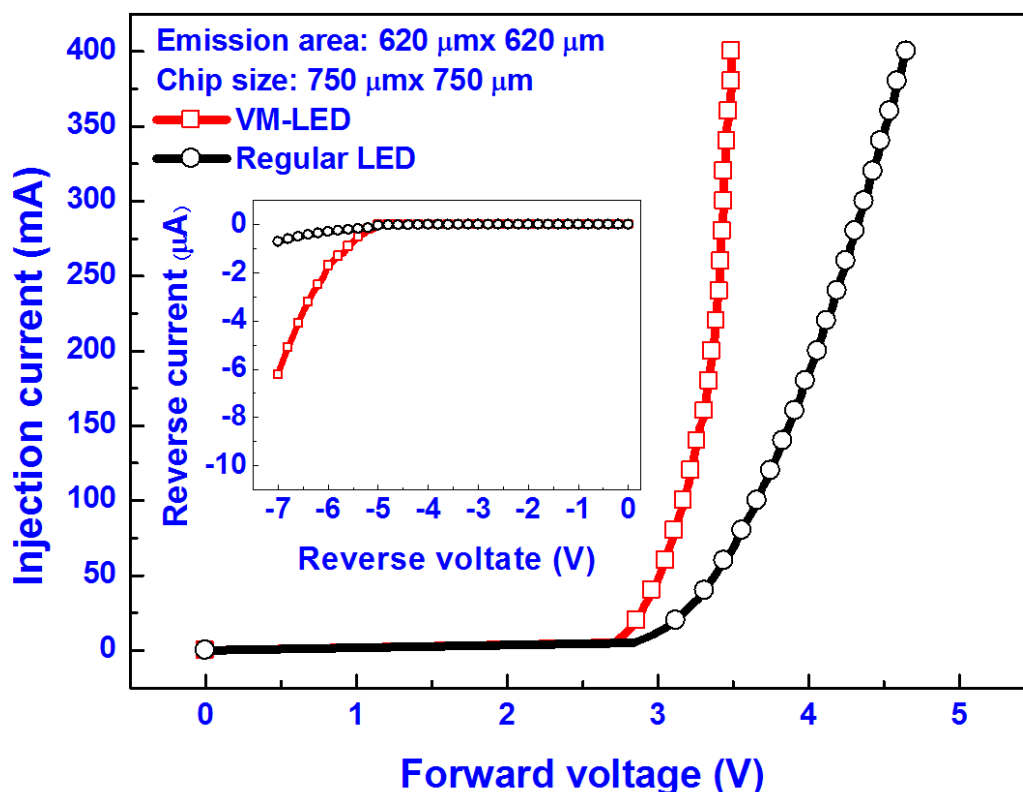


圖3、所製備VM-LEDs與regular LEDs量測之典型順向電流-電壓特性曲線比較圖。內插圖為其反向電流-

電壓特性曲線比較圖。

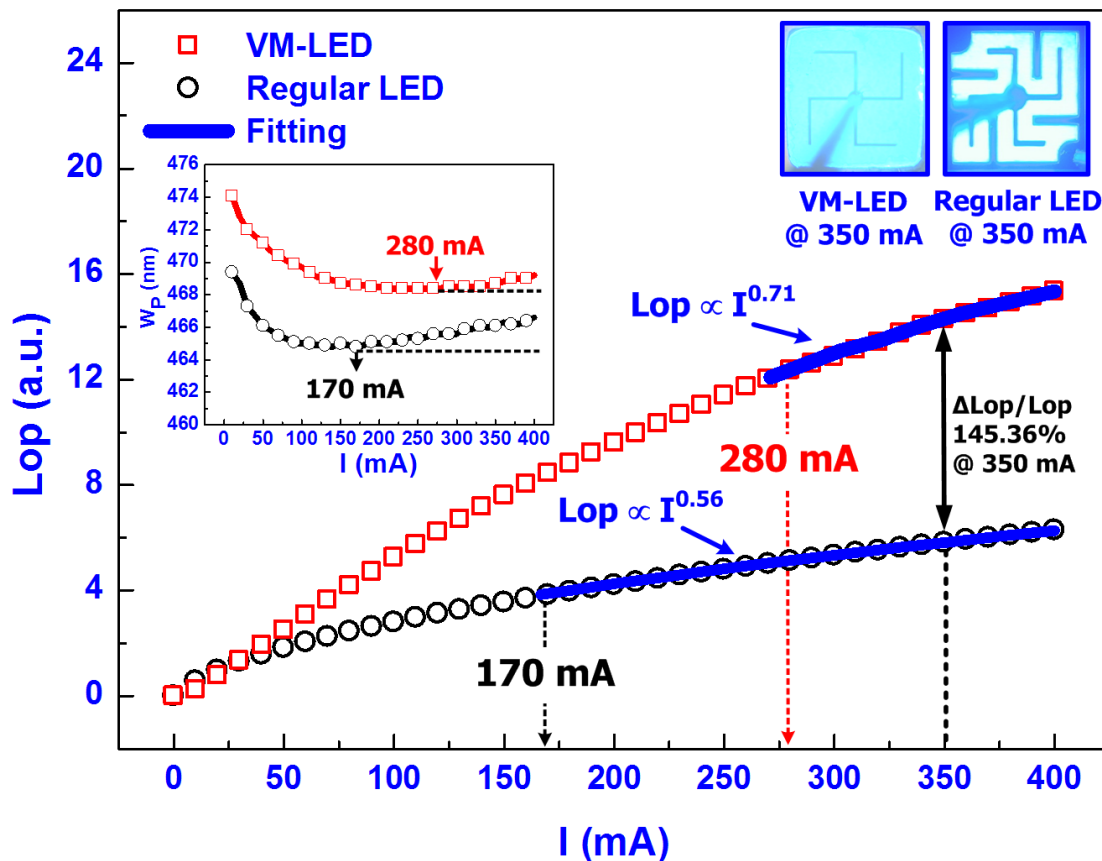


圖4、所製備VM-LEDs與regular LEDs之典型電流-光輸出特性曲線比較圖。內插圖為其電流-峰波長特性曲線比較圖，右上方為元件於350 mA操作下之發光照片。

圖4所示為VM-LEDs與regular LEDs之典型光輸出-電流($Lop-I$)特性曲線比較圖。於 $I=350$ mA時，VM-LEDs之相對光輸出(即 $\Delta Lop/Lop$)較regular LEDs增強約145.36%。統合VM-LEDs光、電特性之提升表現，其光電轉換效率(即 $\lambda=P_o/P_e$ ，其中 P_o 為元件光輸出，而 P_e 為電輸入功率)達regular LEDs之3.2倍。此一光電轉換效率之提升主要應係來自垂直結構本身提供了極佳的電流擴散使得 V_F 與 R_s 下降，及其擁有相對較大之有效發光區域與較多之光反射，以及表面粗化所增強之光析出效果。當我們進一步針對 $Lop-I$ 特性以 $Lop \propto I_m$ 之關係式進行曲線近似(curve fitting)以分析其輻射復合效率(radiative recombination efficiency)，可發現在較大電流下(≥ 280 mA)VM-LEDs與regular LEDs之 $Lop-I$ 特性曲線可分別以 $Lop \propto I^{0.71}$ 及 $Lop \propto I^{0.56}$ 近似表示。此一結果揭示，VM-LEDs在大電流操作時，其光輸出擁有相對較佳之電流響應。

圖4之內插圖所示為此兩種元件之電流-峰波長圖相依曲線比較圖。於低電流範圍條件下，兩者之峰波長皆因能帶填充效應(band-filling effect)而往較短之波長移動，是所謂藍移(blue-shift)[9-11]。隨注入電流之增加，因寄生串聯電阻 R_s 及載子非輻射性復合(non-radiative recombination)而產生之焦耳熱(Joule heating)將逐漸積聚，導致能帶填充效應被超越，使得峰波長之變化趨勢返折往長波長移動(即紅移)[10]。比較VM-LEDs與regular LEDs兩者，此一返折點分見於 $I=280$ mA與 $I=170$ mA，而於VM-LEDs上之紅移趨勢較為平緩。此顯示所本研究所研發之區塊化錫-基金屬基板技術確實可提升元件之熱散逸能力，可有效減緩熱積聚及延遲紅移之發生。

在本文當中，我們提出一區塊化錫-基金屬基板技術，此一技術整合了區塊化LLO、錫-基鋁球與金/鎳濕潤

阻障層以實現一種適合免切割金屬基板VM-LEDs之優異製備技術。實驗結果顯示，在 $I=350$ mA時，VM-LEDs之光輸出較regular LEDs之增強幅度達145.36%，且 V_F 減少1.05 V，此二優勢使得VM-LEDs整體光電轉換效率達regular LEDs之3.2倍。預期此一區塊化錫-基金屬基板技術於高功率GaN-基LED之製作上將極具應用潛力，極有助於固態照明產業之進一步發展。

參考文獻：

- J. J. Wierer *et al.*, Appl. Phys. Lett., 78, 3379 (2001)
- W. S. Wong *et al.*, Appl. Phys. Lett., 75, 1360 (1999)
- T. Fujji *et al.*, Appl. Phys. Lett., 84, 855 (2004)
- S. L. Chen *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 19, 351 (2007)
- W. Y. Lin *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 17, 1809 (2005)
- K. M. Uang *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 45, 3436 (2006)
- G. Elger *et al.*, Microsystem Technology, 7, 239 (2002)
- Y. S. Wu *et al.*, Peng, Appl. Phys. Lett., 90, 251110 (2007)
- Y. Li *et al.*, J. Lumin., 122-123, 567 (2007)
- T. Mukai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 11B, L1358 (1998)
- T. Kuroda *et al.*, Appl. Phys. Lett., 76, 3753 (2000)

Copyright 2008 National Cheng Kung University