

利用非等向雷射蝕刻垂直結構GaN-基發光二極體表面以減少電流擁擠效應

陳聰敏、王水進*、汪楷茗、陳學龍、蔡維志、李偉吉、蔡慶忠

*國立成功大學 電機工程學系 微電子研究

* sjwang@mail.ncku.edu.tw

APPLIED PHYSICS LETTERS 90, 041115 (2007)

發

光二極體(LED)具有體積小、反應快、壽命長、不易衰減、轉換損失低、熱輻射小、量產容易、環保等優點，目前已被廣泛應用，如指示燈、螢幕背光源(Backlight)等。GaN-基發光二極體被開發出來後，LED業者就開始利用藍光LED，激發螢光粉產生黃光，再混光之後成了白色。因此GaN-基發光二極體加上螢光粉激發出白色，非常具有潛力被應用於未來白光照明科技。目前發光二極體之應用，係朝向更大功率與更高輸出效率之趨勢發展，惟目前大面積GaN-基白光LED之研發因受藍寶石絕緣基板、電極圖案設計、發光功率與散熱功能不佳等技術瓶頸，仍有極大改善與提昇之空間。因此，近年來有關GaN-基白光LED之相關研究與製造技術如磊晶成長、外部效率提昇、電極設計、高功率及高流明通量LED製造等方面，已廣見於國際期刊及光電產業技術報導，其效能與製造技術亦已不斷獲得改善，惟在因應白光照明及顯示應用上，更高效率、更大輸出功率、與更高流明通量已成為白光LED發展之必然趨勢。如何克服大面積情況下電流分佈不均、發光不均、散熱不良等現象、以及如何降低LED本身功率損失(power loss)、如何提昇LED之外部效率與流明通量、如何解決高流明通量下散熱等問題，已是現階段白光LED產業之重要課題。

本論文，提出利用區塊電鍍鍍為基板結合經非等向性雷射蝕刻半導體表層磊晶層 (n-GaN) 與透明導電層 (transparent conductive layer, TCL) 之新穎結構，以表層結構厚度漸變所產生之電阻變化促使各電流流通路徑上之總電阻趨於平衡，徹底改善GaN-基LED垂直結構仍存有電流及發光分布聚集於電極下方之問題，以提昇更高之發光功率及降低元件之串聯電阻，實現垂直結構LED達到高功率、高亮度、及高熱散失能力之目標。圖1所示為本論文所提出利用非等向雷射蝕刻垂直結構GaN-基發光二極體表面以減少電流擁擠效應之理論背景示意圖。

圖1(a)所示為未經非等向性雷射蝕刻處理之一般垂直型LED (Sample A)，圖1(b)所示為經非等向性雷射蝕刻處理之具表層TCL/n-GaN厚度漸變結構 (Sample B)。Sample B其中可能電流路徑一 (path 1) 及可能電流路徑二 (path 2) 為例，路徑一之電阻 R_1 ，路徑二之電阻 R_2+R_{TCL} ，因元件已經非等向性雷射蝕刻處理，中央厚度較薄其電阻 R_2 已被降低了，此導致 R_1 可以較接近 R_2+R_{TCL} (如蝕刻面之半徑、深度、及TCL之電阻率配合得好，甚至可以達到 $R_1=R_2+R_{TCL}$)，所以電極下方電流 (即流經路徑一之電流) 與遠離電極區域之電流密度 (即流經路徑二之電流) 可以較接近了，而元件之發光密度也可以較均勻。

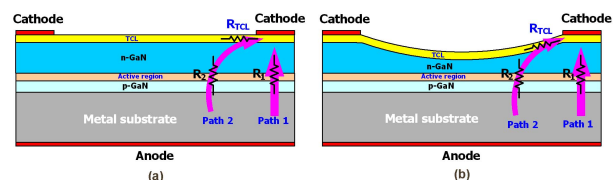


圖1、元件剖面結構示意圖，(a)一般具平板形TCL/n-GaN之VM-LED(sample A) (b)具表層TCL/n-GaN厚度漸變結構 (Sample B)。

為印證上述理論之合理性，我們以ISE-TCAD[10]進行模擬。模擬過程中，sample A 及 B之尺寸大小為 $1000 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$ ，n-GaN的參雜濃度及厚度分別為 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 及 $3 \mu\text{m}$ 。而sample B之n-GaN的蝕刻深度從邊緣至中央逐漸變化為 $0 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ，得到結果如圖2所示在驅動電壓4V下之電流分佈於兩側電極下方與透光區(亦即光析出區域)電流分佈密度幾乎一樣，減少了電流擁擠、降低了元件之串聯電阻，功率消耗明顯可以減低。

圖2之插圖分別顯示，Sample A 及Sample B之主動區發光，明顯可以看出Sample B不再如Sample A一樣電極下方大量發光卻被電極阻擋了，而其透光區下方發光量提升而不被電極所阻擋，所產生之光量應可以順利析出，以提升了出之光功率。本論文實驗所選用之發光二極體磊晶片是以長在藍寶石基板（sapphire substrates），多量子井氮化銦鎵(InGaN multiple-quantum-well, MQW)之2吋GaN-基晶片。

該LED結構包含有緩衝層、0.5- μm 厚之未參雜GaN層、3- μm 厚矽參雜之n-GaN cladding層、5週期GaIn/InGaIn之MOW、鎂參雜之p-cladding層、及0.15- μm 厚之鎂參雜GaIn層。在以雷射剝離技術(laser lift off, LLO)，將藍寶石基板(Al_2O_3)去除之前，先在平面式GaIn-基LED元件之p-GaN層面以e-gun成長歐姆接觸之Ni/Au電極，經過適當之退火溫度與時間，形成良好之歐姆接觸，接著將成長歐姆接觸之Ni(2.5 nm)/Au(4.5nm)電極後之GaIn-基LED元件浸泡在電鍍液內電鍍Ni基板，電鍍電流為1.7 A，工作溫度為55 持續90分鐘，其厚度約50 μm 。本論文中LLO技術所使用的準分子雷射系統為PS-2000型(Exitech Limited, U.K.) 248 nm脈衝式KrF雷射透過銅光罩到達透明之藍寶石基板，雷射能量在GaIn/sapphire介面處被吸收，造成GaIn分解以達成藍寶石基板剝離之目的。

以LLO技術將藍寶石基板(Al_2O_3)去除後，再以感應式耦合電漿 (inductive coupling plasma, ICP)技術蝕刻不需要之u-GaN之後再以KOH, HCl 與HCl溶液蝕刻n-GaN約10秒。隨後進行n-GaN表層之非等向雷射蝕刻使成凹型表面。如圖3所示，同樣之KrF準分子雷射系統以較低能量（400 mJ/cm^2 ）透過特殊設計之光罩並旋轉加工元件，以造成不等量之雷射到達n-GaN表面，而使得GaIn被分解之量不一，因此n-GaN之厚度由邊緣向中央逐漸變薄。

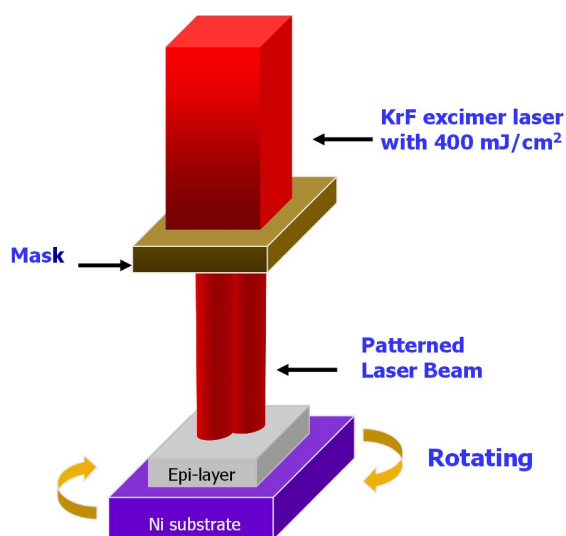


圖3、非等向雷射蝕刻系統架構示意圖。

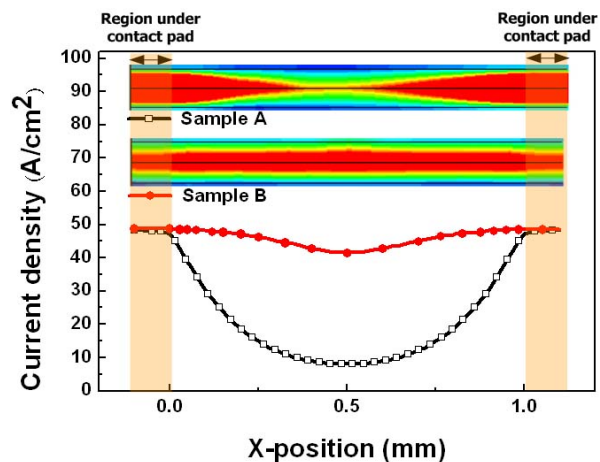


圖2、Sample A 及Sample B之主動區電流分佈及主動區發光分佈。

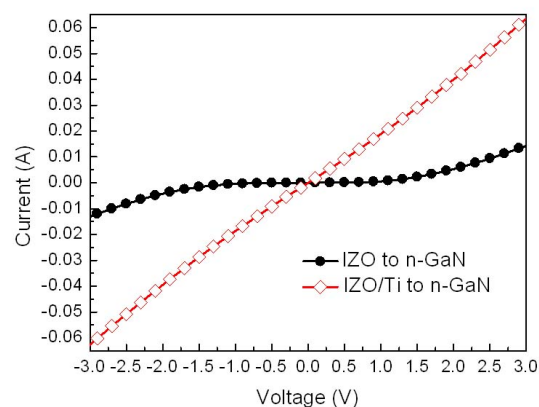


圖4、量測所得之IZO(300 nm)對n-GaN及IZO(300 nm)/Ti (2.5 nm)對n-GaN之I-V特性曲線。

為提昇接觸品質與去除Ga殘留，再次用鹽酸稀釋液，稀釋比率為1:1浸泡8秒。有關氧化銦鋅(Indium-Zinc-Oxide, IZO)之特性，我們實驗結果如圖4，IZO與n-GaN接觸特性為蕭特基接觸（Schottky contact），因此須先沉積一層金屬鈦薄膜約2.5 nm的厚度使其與n-GaN形成歐姆接觸（Ohmic contact）。在本研究中IZO之沉積，係使用射磁電管濺鍍系統沉積，IZO結合之前沉積之Ti薄膜以做為TCL。

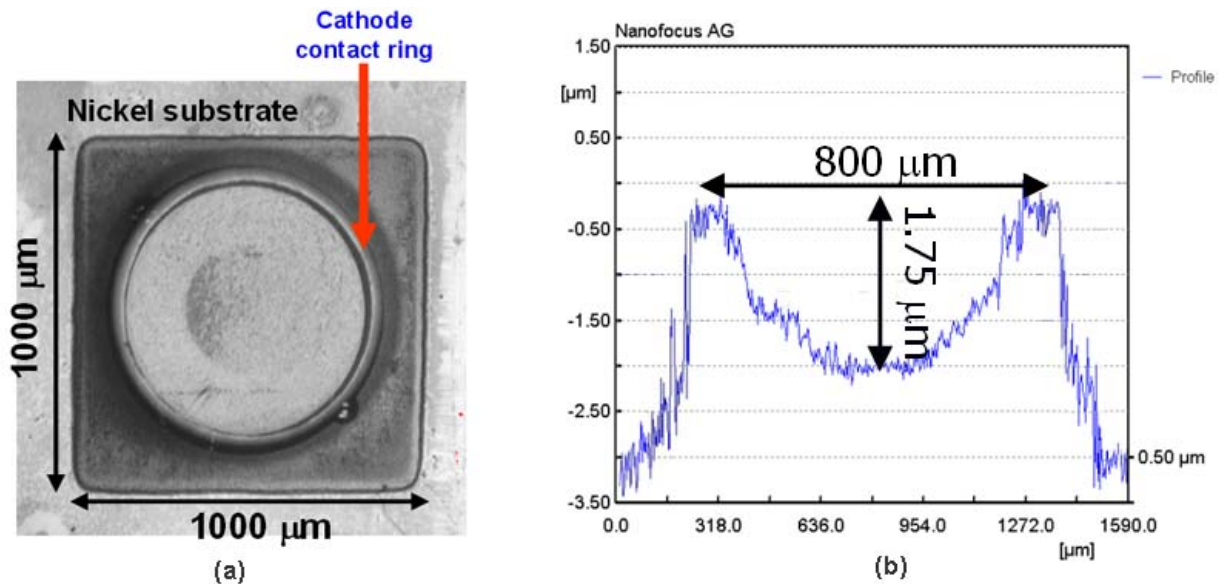


圖5、(a)非等向性雷射蝕刻n-GaN表面顯微鏡下所拍照圖(OM picture), (b)Nanofocus量測1-D曲線圖。

其中IZO成份為 90%wt In₂O₃ 及 10%wt ZnO。IZO薄膜厚度範圍在100-500 nm之間其穿透率 ≥80% 以上而其電阻率在 8×10^{-5} - 12.1×10^{-4} Ω·cm之間。IZO薄膜之穿透率及電阻率，因薄膜厚度而變化戶為消長，薄膜厚度大電阻率小穿透率低，反之薄膜厚度小電阻率大穿透率高。經由時驗結果歸納，300-nm-厚之IZO TCL可以使LEDs元件在串聯電阻、穿透率、及光稀出三方面得到最佳結果。在Ti(2.5 nm)薄膜及IZO(300 nm)薄膜依序沉積在凹型n-GaN表面形成漸變厚度TCL/n-GaN結構，之後再沉積Cr (15 nm)/Al (200 nm)/Cr (15 nm)/Au (800 nm) 等金屬做為陰極電極圈 (cathode contact ring)，至此我們所設計之結構其元件就算被製作完成。圖5為本研究所製作完成之一代表元件，在顯微鏡下所拍照圖片，我們可以清楚看出經非等向雷射蝕刻成凹型表面TCL/n-GaN結構其直徑約800 μm及中央蝕刻深度約1.75 μm。

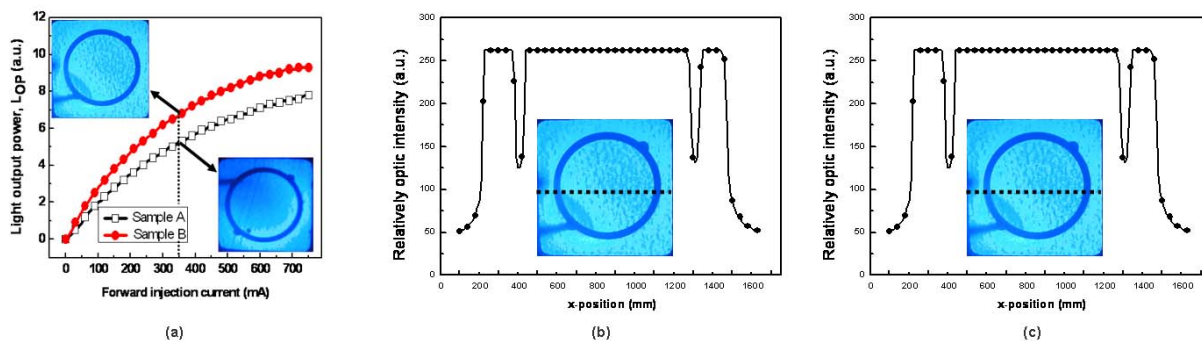


圖6、(a) Sample A及B之LOP-I 特性曲線圖。插圖為Sample A及B在 $I_f = 350$ mA之點亮圖。(b) Sample B及(c) Sample A元件點亮沿虛線處偵測之相對發光分佈。

為了特性比較，未經非等向雷射蝕刻元件也就是一般VM-LEDs元件也一併製作。圖6(a)為Sample A (一般VM-LEDs) 及Sample B (本論文所提出之元件) 經通電流點亮之亮度對電流 (L-I) 曲線圖，明顯可以看出Sample B之發光亮度比Sample A大。圖6(b)及(c)分別顯示Sample A及Sample B在電流 $I_f = 350$ mA時之沿著虛線所指之處的發光分佈，Sample B之發光區發光密度相對於Sample A較均勻。雖然，此一表面漸變厚度TCL/n-GaN結構設計尚未達最佳化，我們以50個實際完成之samples，量測取其平均結果，在點亮電流 $I_f = 350$ mA之下其LOP改善有38-26%之多。從發光分佈來看，表面漸變厚度TCL/n-GaN之元件，在發光均勻度也有相當大的改善。

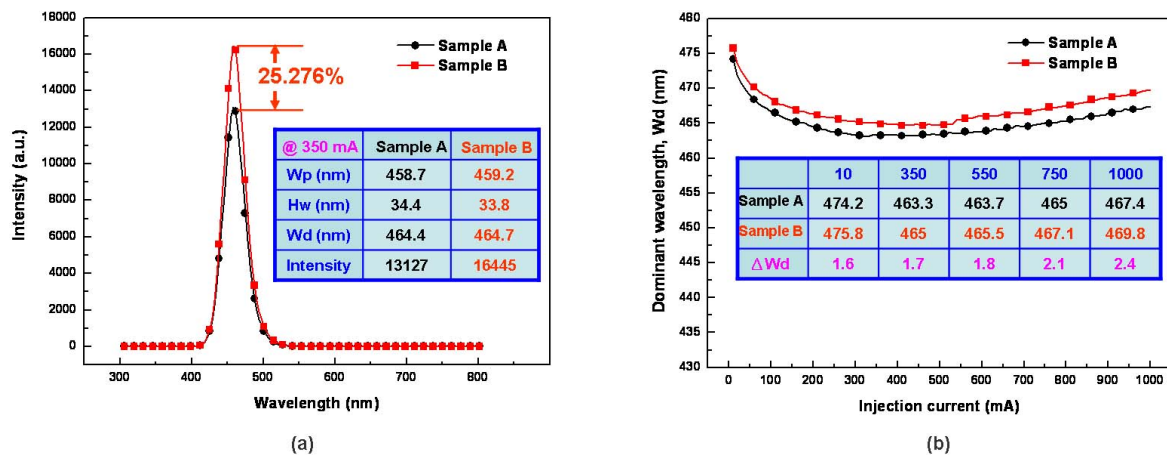


圖7、(a) Sample A及B在 $I_f = 350$ mA點亮之下量得之光譜圖 (EL spectrum)，(b)在 $I_f = 0\sim 1000$ mA之下主波長移位趨勢圖。

其次我們量測因電流增加而產生的主波長變化 (ΔWd)，以及在 $I_f = 350$ mA電流下的光譜圖。於 $I_f = 350$ mA電流下的光譜圖也可看出sample B元件Intensity明顯提升25.276%如圖7(a)所示，沒有因雷射蝕刻製程而對磊晶層有太大影響，反而擁有更低的半高寬值 (Full Width Half Magnitude, FWHM)，可發出更純的藍色光。圖7(b)所示之量測結果，發現sample A與sample B的主波長變化趨勢完全一樣，表示垂直結構的主波長無論是否有經過表面雷射處理，其變化小是因為金屬基板散熱較佳，元件操作時產生的熱量能快速散去，對元件較無影響。本論文所提出之理論，可以進一步在非等向雷射蝕刻製程最佳化以達串聯電阻更平衡，甚至於應用在凸型n-GaN表面形成漸變厚度TCL/n-GaN結構，詳細凸型及凹型n-GaN表面形成漸變厚度TCL/n-GaN最佳結構設計，目前正在進行中。

本論文提出藉由準分子雷射做非等向雷射蝕刻，使n-GaN表面形成漸變厚度TCL/n-GaN結構，以降低電流擁擠提昇發光均勻度。經由ISE-TCAD軟體模擬分析進行印證，發現該結構之LED，其主動區之電流及發光確實較均勻。藉由準分子雷射及光罩配合，我們已經可以成功於n-GaN層上取得所規劃之蝕刻形狀與深度之非等向型蝕刻結果。實驗結果顯示在一呈凹面蝕刻蝕刻深度為 $1.75\ \mu\text{m}$ 、直徑為 $800\ \mu\text{m}$ 之元件，其發光強度及發光均勻度已獲得極佳改善。整體之發光強度與無蝕刻之VM-LED比較，雖然表面工程技術尚未最佳化，已獲得約38-26%之增進。此一結果顯示本論文所提出之表層結構厚度漸變所產生之電阻變化促使各電流流通路徑上之總電阻趨於平衡之論點應屬正確無誤，希望藉此提供一個有效改善垂直結構大面積GaN-基LEDs電流擁擠之方法。