

利用不同成長溫度之電洞注入層 對氮化物系列藍光發光二極體效應之研究

*王俊凱、江國璋

南臺科技大學電子工程系

ckwang@stust.edu.tw

摘要

本研究是針對具電洞注入層(hole injection layer, HIL)之氮化鎵系列(GaN-based)藍光發光二極體(light-emitting diodes, LEDs)的光電特性進行探討。HIL 分別以 730、750 與 780 °C 的溫度成長於最後一層位障(last barrier, LB)與電子阻擋層(electron blocking layer, EBL)之間，其厚度為 16 nm 且為 p 型氮化鎵(p-GaN)。實驗結果顯示，HIL 成長溫度為 730、750 與 780 °C 之 LED，在 120 mA 下的光輸出功率分別為 114.6、112.5 與 110.5 mW，而效率衰減(efficiency droop)幅度則分別為 24.6、25.0 與 23.5%。730 °C 之 HIL LED 具較佳光輸出功率，這是因為此樣本之 HIL 具有較多的電洞濃度，且增加電洞的注入效率。也因此此樣品在低溫 EL 之光強度衰減與 V_f 變化都較其他兩者小。相對地，780 °C 之 HIL LED 具較低 efficiency droop，這是因為此樣本的電流散佈較佳，且電洞分佈在主動區中較為均勻。也因此此樣品在 V_f 、hot/cold factor 與抗靜電能力皆具有較佳的結果。

關鍵詞：氮化鎵、發光二極體、電洞注入層

Investigating the Effect of Nitride-Based Blue Light Emitting Diodes Using Hole Injection Layer with Different Growth Temperatures

Chun-Kai Wang, Kuo-Wei Chiang

Department of Electronic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

In this study, the electrical and optical properties of GaN-based blue light-emitting diodes (LEDs) with hole injection layer (HIL) were investigated. A 16-nm-thick p-GaN HIL inserted between last barrier (LB) and electron blocking layer (EBL) was grown at 730, 750, and 780 °C. The light output powers of LEDs for HIL grown at 730, 750, and 780 °C were 114.6, 112.5, and 110.5 mW, respectively. The efficiency droop ratios of LEDs for HIL grown at 730, 750, and 780 °C were 24.6, 25.0, and 23.5%, respectively. The LED with HIL grown at 730 °C has a better light output power. This is because this sample has more hole concentrations, and the injection efficiency of the hole increases. Therefore, the light intensity decay and V_f variation of this sample for the low-temperature electroluminescence (EL) were smaller than for other samples. In contrast, the LED with HIL grown at 780 °C has a lower efficiency droop. This is attributed to the better current spreading and more uniform hole distribution in the active region. Thus, the V_f , hot/cold factors, and Electrostatic Discharge (ESD) ability of this sample show better performance.

Keywords: GaN, LEDs, hole injection layer

Received: Oct. 11, 2016; first revised: Nov.3, 2016; accepted: Feb., 2017.

Corresponding author: C. -K. Wang, Department of Electronic Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology, Tainan, Taiwan.

壹、前言

雖然氮化鎵系列(GaN-based)發光二極體(light-emitting diodes, LEDs)至今已被廣泛探討,技術也越來越成熟,但仍有許多地方值得去研究,特別是在效率下滑效應(efficiency droop)這個區塊更是重要,而造成 efficiency droop 主要可能的原因如:磊晶品質[1-2]、極化現象[3-5]、載子侷限能態[6-7]、歐傑複合[8-10]、電洞注入效率低[11-12]、熱擁擠[13-14]和電子溢流[11, 15]等等。而在上述原因中,又以電洞注入效率低與電子溢流最為關鍵,通常在傳統氮化鎵系列 LED 結構內會在主動區與 p 型半導體層之間做一層電子阻擋層(electron blocking layer, EBL)來阻擋具有較高遷移率電子的溢流。但是主動區內的最後一層位障(last barrier, LB)與 EBL 之間會因為材料極化效應而造成能帶傾斜,雖然對於電子能提高導帶上的位障高度,但相對地對於電洞來說也提高了價帶上的位障高度。因此在小電流注入時,能有效地阻擋電子溢流,進而達到較高的量子效率,但在高電流注入時,效率卻可能比無 EBL 結構來的低,原因在於電洞注入效率過低的關係。因此在有 EBL 結構下的 LED,如何同時改善電子溢流與電洞注入效率的問題,進而有效地改善 LED 特性與降低 efficiency droop 效應。

本研究將針對此問題提出改善之方法,我們將在 LB 與 EBL 之間插入一層電洞注入層(hole injection layer, HIL),並探討改變 HIL 的成長溫度對氮化鎵系列藍光 LED 之光電特性與發光效率之影響。

貳、研究方法

本實驗中的所有氮化鎵系列藍光 LED 皆使用有機金屬氣相沉積系統(MOCVD)在 c-face(0001)的藍寶石(sapphire)基板上成長薄膜。如圖 1 所示,本實驗中氮化鎵系列藍光 LED 的成長順序說明如下:在基板表面清潔後,以 550 °C 低溫,通入三甲基鋁(TMAI)與氨氣(NH₃),在藍寶石基板上先成長一層 30 nm 厚的氮化鋁(AlN)緩衝層(buffer layer),作用為降低藍寶石基板與氮化鎵間晶格不匹配的問題(lattice mismatch ~ 16%)。接著將 MOCVD 腔體溫度升至 1050 °C,在緩衝層上成長出厚度為 3 μm 的未摻雜氮化鎵(un-doped GaN)薄膜。隨後在相同的條件下通入矽烷(SiH₄),在未摻雜氮化鎵上成長厚度為 3 μm 的 n 型氮化鎵(n-GaN)薄膜,摻雜濃度約為 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,摻雜矽的施體為 LED 提供電子。n 型氮化鎵成長完成後,接著成長應力釋放層(pre-strain layer),由十對的 In_{0.05}Ga_{0.95}N/GaN 超晶格結構(short-period superlattice, SPS)所組成,其中一對的厚度為 2 nm。然後再應力釋放層上成長六對 In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN 多重量子井(multi-quantum wells, MQWs)結構,此 MQWs 發光主動區包含了六層 3 nm 厚的氮化鎵量子井,成長溫度為 750 °C,並分別被七層 6 nm 厚的氮化鎵量子位障隔開,成長溫度為 860 °C。隨後往上成長鎂摻雜濃度為 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 的 p 型氮化鎵作為 HIL,其成長厚度為 16 nm,之後將溫度調升至 1000 °C 成長十對摻雜鎂原子的 p 型氮化鎵/氮化鎵(p-Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN)超晶格結構做為 EBL,其中摻雜濃度為 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,一對厚度分別為 3 nm/3 nm。最後,相同溫度下成長厚度為 80 nm 摻雜鎂原子的 p 型氮化鎵(p-GaN)覆蓋層,摻雜濃度約為 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。本實驗設計總共有三種樣品,其中的差異為 HIL 之成長溫度,其成長溫度分別為 730、750 以及 780 °C。為了利於後續論文中各項分析的描述,HIL 成長溫度為 730 °C 之樣品命名為 LED A,750 °C 為 LED B,780 °C 則為 LED C。完成各層磊晶薄膜成長後,將成長完成的試片利用爐管在溫度為 700 °C 及氮氣(N₂)環境下,將 p 型氮化鎵中摻雜的鎂原子活化成電洞。

接下來,元件製程的部分說明如下:利用半導體製程之微影技術,以及感應耦合離子電漿(inductively-coupled plasma, ICP)乾式蝕刻技術將 LED 晶粒大小定義出來,本實驗晶粒尺寸大小設計為 $580 \times 1140 \mu\text{m}^2$,如圖 1 所示。然後,再利用 ICP 乾式蝕刻技術將晶粒部分區域的磊晶層從 p 型氮化鎵表面蝕刻至 n 型氮化鎵區域,使得 n 型氮化鎵裸露出來以利後續製作 n 型金屬電極。接著,利用濺鍍法(sputter)將厚度為 70 nm 的透明導電層氧化銦錫(indium tin oxide, ITO)薄膜製作於 p 型氮化鎵上,作為 p 型氮化鎵之歐姆接觸層以及電流散佈層(current spreading layer)。最後,再利用電子束蒸鍍法(e-beam evaporation)分別於 ITO 表面上製作 p 型電極以及 n 型氮化鎵表面上製作 n 型電極,電極的組成元素分別是,銀/金(30 nm/500 nm)為 p 型電極,以及鈦/鋁/鈦/金(15 nm/450 nm/50 nm/500 nm)為 n 型電極。以上之步驟說明為

LED 晶粒之前段製程。再來後段製程部分，首先利用研磨機將 LED 晶粒之背面藍寶石基板研磨至基板厚度只剩下 90 μm，最後再利用雷射切割機將每一顆 LED 晶粒分割出來完成製作。為了量測上方便，我們將完成製作的 LED 晶粒利用 TO-39 做成簡單的金屬罐封裝型(metal can package)，並且沒有使用環氧樹脂(epoxy resin) 或矽膠(silicone)來封裝。

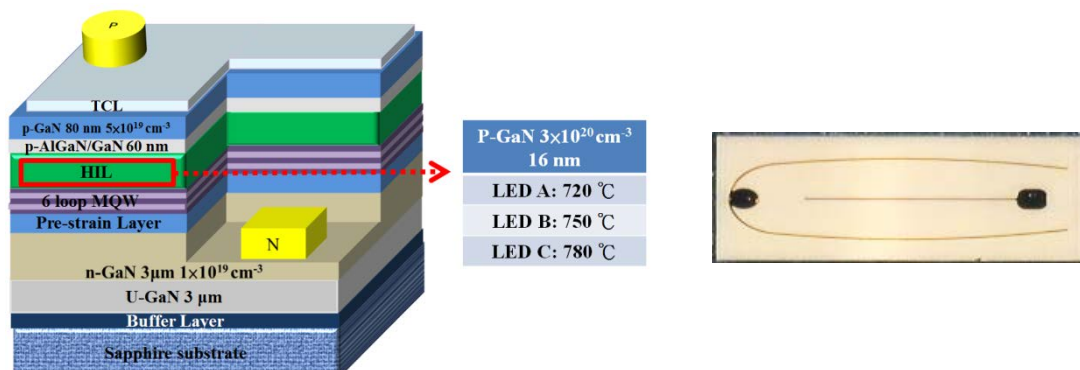


圖 1 本實驗所使用的 LED 晶粒結構參數及電極設計示意圖

參、實驗結果與討論

圖 2 顯示了在不同注入電流下，LED 的光輸出功率特性曲線圖。我們可以發現 LED A、LED B 以及 LED C 在 120 mA 操作電流下，光輸出功率分別為 114.6、112.5 以及 110.5 mW。其中 LED A 展現最佳的光輸出功率，且 LED A 分別比 LED B 與 LED C 提升了 1.9 及 3.7% 的光輸出功率。文獻中曾指出，當成長 p 型氮化鎵磊晶層時，在固定鎂原子的流量下，如果成長的溫度較低，則會有較多的鎂原子能夠被摻雜進入 p 型氮化鎵中而形成受體，因此成長溫度低的電洞濃度會比成長溫度較高的樣品來的高，使其可提供相對較多的電洞濃度注入至量子井中，使得輻射複合率增加進而增強光輸出功率[16]。同理，LED A 結構中的 HIL 成長溫度相對較低，所以電洞濃度相對於 LED B 與 LED C 較高出許多，因此 LED A 之 HIL 可以注入更多的電洞進入量子井中，進而展現出最佳的光輸出功率。

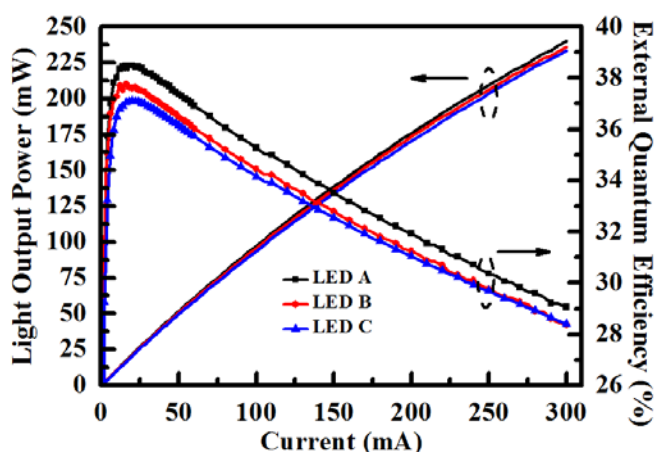


圖 2 LED 光輸出功率與外部量子效率之特性曲線圖

利用不同電流下光輸出功率之數據，透過下列公式(1)可以計算出 LED 之外部量子效率(external quantum efficiency, EQE)：

$$EQE = \frac{P/h\nu}{I/e} \tag{1}$$

如圖 2 LED 外部量子效率之特性曲線圖所示，我們發現到三種 LED 之 EQE 數值大小的趨勢與光輸出功率強度相符。LED A 外部量子效率比 LED B 與 LED C 分別提升 1.9 與 3.9%。另外，特別要注意的是在 efficiency droop 部分，LED A、LED B 與 LED C 的 efficiency droop 比例(i.e. 注入電流為 300 mA 下的 EQE 數值比上 EQE 的最大數值)分別為 24.6、25.0 與 23.5%，由結果可知 LED C 的 efficiency droop 程度卻是最小的，此現象的原因我們認為可能是有其他因素造成，將於後續做進一步地探討。

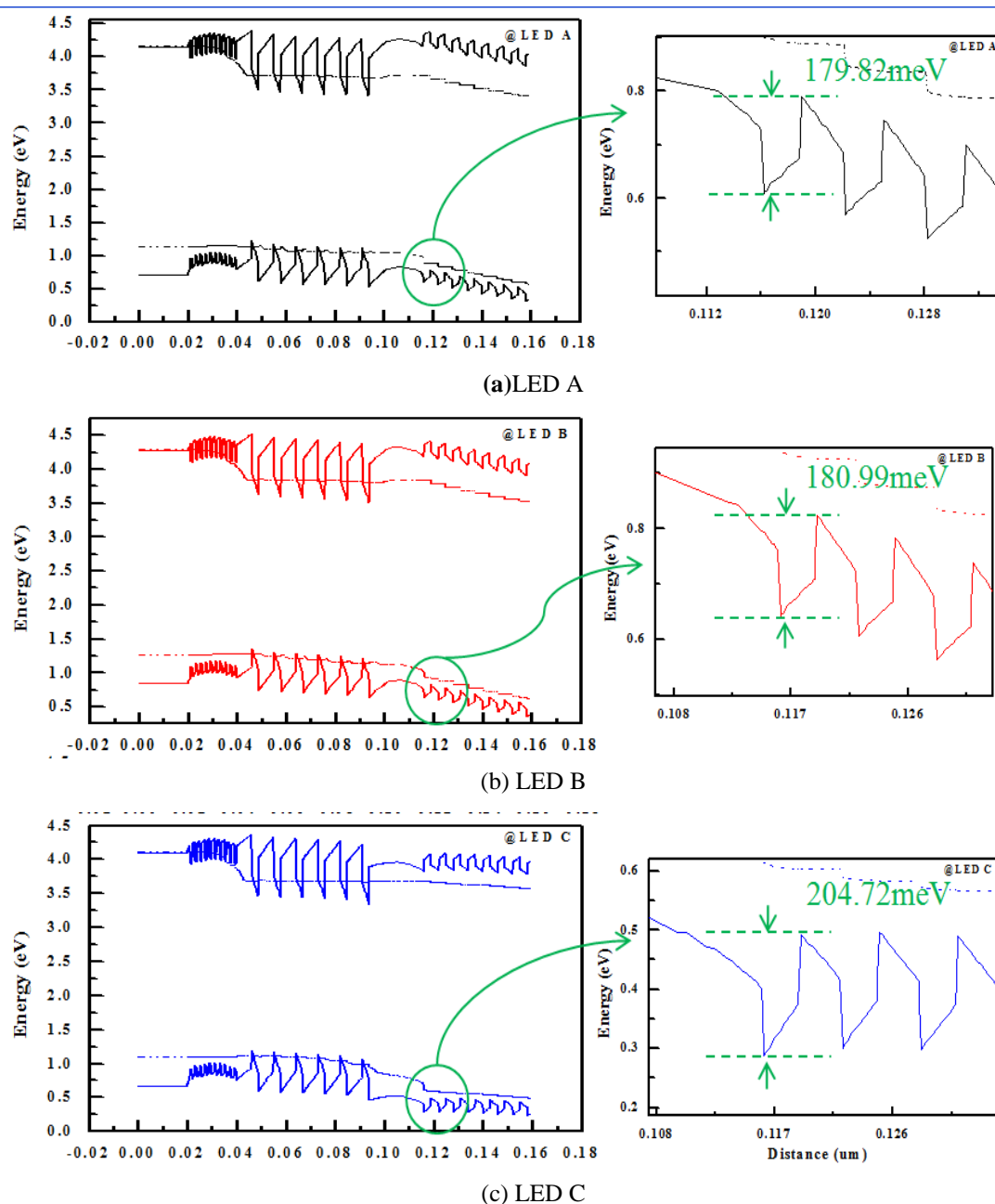


圖 3 利用 APSYS 模擬軟體模擬之 LED 能帶圖

為了進一步了解各樣品 efficiency droop 的差異性，我們依據元件實際結構設計使用 Crosslight Software Inc.所開發的 Advance Physical Model of Semiconductor Devices (APSYS)模擬軟體進行模擬[17]。首先，本模擬軟體雖然不能模擬 HIL 於不同溫度下成長的情形，但是我們已知 LED A 之 HIL 成長溫度較低會有相對較高的電洞濃度，加上以目前的文獻報導及磊晶技術的進步，Mg 原子摻雜活化成 p-type 電洞濃度的活化率約為 10%左右。因此在模擬中假設 LED A、LED B 以及 LED C 於不同 HIL 成長溫度

下所造成該層在電洞濃度上的差異分別為 4.2×10^{19} 、 3×10^{19} 以及 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 來進行模擬。圖 3(a)、(b) 與(c)分別為 LED A、LED B 以及 LED C 利用 APSYS 模擬軟體所模擬出來的 LED 能帶圖。從圖 3(a)、(b) 與(c)中可以明顯地發現由於 HIL 電洞濃度上的差異造成最後一層能障(last barrier)與 p 型氮化鋁鎵/氮化鎵超晶格結構 EBL 之間的能帶彎曲傾斜程度有所不同。接著，我們將 HIL 與 EBL 區域的價電帶能帶圖局部放大。從能帶放大圖中可以清楚地看出 LED A、LED B 與 LED C 在靠近 HIL 之 EBL 結構的價電帶能障高度分別為 179.82、180.99 與 204.72 meV。其中，LED C 的價電帶能障高度比其他樣品多了約 25 meV 左右，這是因為 EBL 的能帶整體被往下拉，此現象造成 LED C 的電洞相對較難以注入到主動區內。接著，圖 4 顯示為 p 型氮化鋁鎵/氮化鎵超晶格結構 EBL 中電洞濃度的分佈圖。從圖中 EBL 電洞濃度分佈中可以清楚地看出 LED C 在 EBL 中堆積較高的電洞濃度，我們認為當電洞在 EBL 傳輸時，LED C 由於 EBL 的價電帶能障高度較高，因此電洞較容易被堆積在 EBL 之中，因為 LED C 之電洞比較難以跨越過 EBL 能障，所以會往橫向進行傳輸，當堆積到一定數量之後，才會注入到主動區之中，該現象會使得注入的電洞在主動區中會有較好的分佈情形，這也是為什麼圖 2 中之 LED C 會具有較少 efficiency droop 的原因。

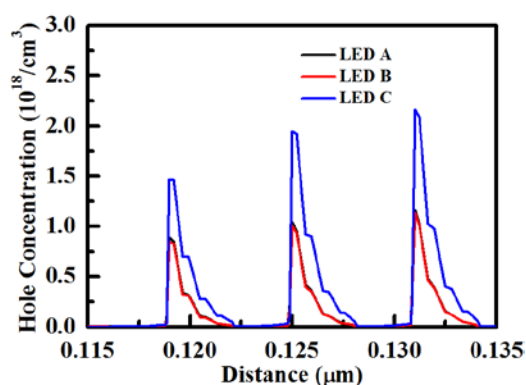


圖 4 EBL 結構中電洞濃度的分佈圖

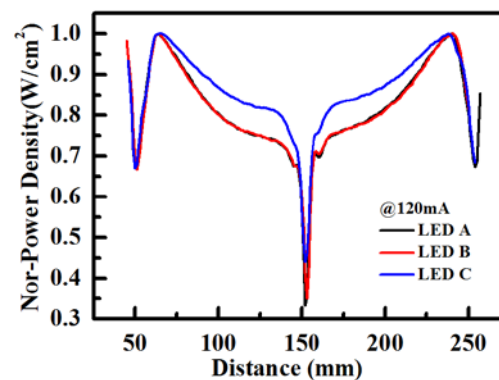


圖 5 LED 在操作電流為 120 mA 下的光分佈圖

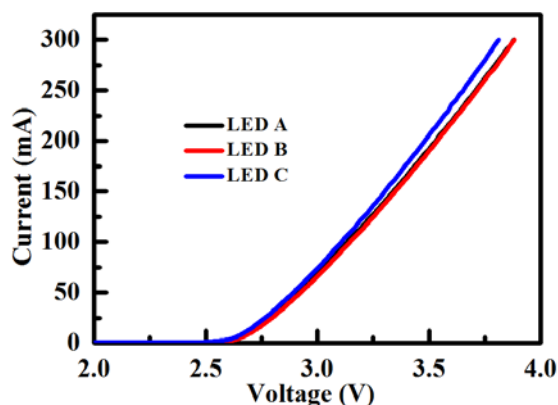


圖 6 LED 順向電壓電流之特性曲線圖

為了進一步確認電洞具有橫向傳輸以及較均勻地分佈於整個元件之主動區中，我們使用高精度的 CCD 輝度計系統來偵測 LED 的光功率分佈情形。為利於後續的比較，我們將統一每種樣品的積分時間，及固定圈選 CCD 輝度計系統偵測 LED 發光區域的大小來做高斯計算。圖 5 顯示為三種 LED 於 120 mA 操作電流下之光場分佈圖，而且為了利於比較，我們分別將三種 LED 的光場大小作正規化。另外，圖中光場強度驟降的部分源自於 LED 金屬電極遮蔽效應所造成。從圖中的結果，我們可以明顯地發現 LED C 有較平緩的光場強度變化斜率，這也就表示其發光分佈的均勻性較佳。此結果更驗證上段敘述 LED C 之電洞在價電帶能障較高的 EBL 中，確實會有橫向傳導擴散的行為發生，使 LED C 之注入電流散佈能力

提升，且較均勻地分佈於整個元件中。因此再次證明為什麼圖 2 中之 LED C 會具有較少 efficiency droop 的原因。另一方面，電流橫向散佈較好的樣品 LED C，其反應出的串聯電阻(series resistance, R_s)值與順向電壓(V_f)也會比較低。圖 6 為 LED 順向電壓電流之特性曲線圖，其中 LED A、LED B 與 LED C 在操作電流 120 mA 下的順向電壓(V_f)分別是 3.22、3.23 和 3.18 V。經計算 LED A、LED B 與 LED C 的 R_s 分別為 3.368、3.439 和 3.209 Ω ，此量測結果證明 LED C 因為元件電流散佈能力提升，確實在 R_s 部分是比其他兩者樣品來的小，使得其具有最小的 V_f 。

此外，我們都知道一般發光二極體的熱源分別來自於非輻射複合所產生的晶格熱振動(聲子)與電流流經路徑所造成的焦耳熱，本文假設於非輻射複合所產生的晶格熱振動(聲子)相同的情況下，比較焦耳熱所造成的差異化。電流流經路徑所造成的焦耳熱如公式(2)所示：

$$P_{heat} = I^2 \times R_s \tag{2}$$

由公式(2)可得知，當流經半導體的電流越大所產生的焦耳熱也就越高，這也是為什麼 LED 通常在電流擁擠的區域內其溫度都會較高的原因。另外，電流擁擠程度通常也與電流散佈能力有關，LED 的電流散佈能力較好的話，則元件的 R_s 會比較小，在相同注入電流的情形下，產生的焦耳熱也會因此比較低。本文中，我們透過熱影像溫度分析系統(thermal image system, TIS)拍攝物體所散發出來的熱輻射轉換成溫度數值，藉此來判斷何者的電流散佈能力較佳[18]。圖 7 為紅外線熱影像分析圖，從圖中可以發現 LED C 的整體溫度為最低。另外，我們將溫度的分佈情形數據化如表所示，不管是平均溫度或是最高溫度，LED C 都是比其他兩者要低，而這樣的溫度差異性，主要在於 LED C 的電流散佈能力較其他兩者好，降低了電流擁擠情形以及具有較小的 R_s ，所以使其產生的焦耳熱較小。

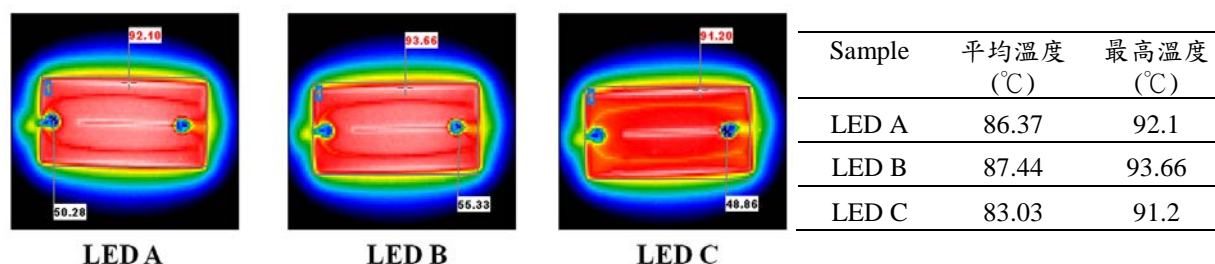


圖 7 紅外線熱影像分析圖及溫度數據

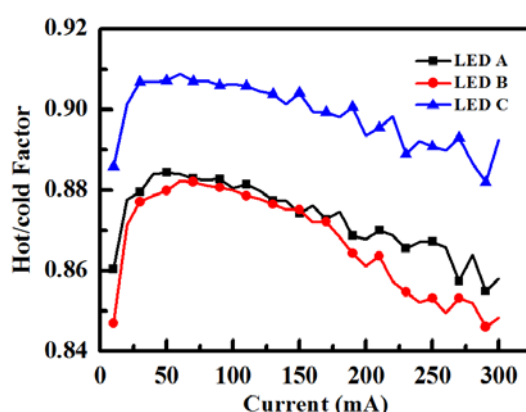


圖 8 不同注入電流下 LED hot/cold factor 之特性曲線圖

在 LED 樣品亮度對於溫度依賴性量測上，我們進行 hot/cold factor 的量測分析。hot/cold factor 是 LED 亮度對於溫度變化的關係，以目前學術及產業界來說尚未有一定的標準規則，而本實驗則定義 hot/cold factor 為 LED 光輸出亮度在高溫 90 °C 下與低溫 30 °C 下的比值，如公式(3)所示。而從公式中我們也可

瞭解到當 hot/cold factor 的值越接近 1 時，代表 LED 隨溫度升高而衰減的光輸出強度較少，也就是指該 LED 較不受溫度升高的影響。

$$\text{hot/cold factor} = \frac{\text{power at } 90^{\circ}\text{C}}{\text{power at } 30^{\circ}\text{C}} \quad (3)$$

圖 8 為 LED 在不同注入電流下的 hot/cold factor 特性曲線圖，以大趨勢來說 LED A、LED B 與 LED C 都有隨著電流增加 hot/cold factor 的值都有衰減的現象，其原因歸究於當溫度升高時，溫度給予電子電洞額外能量，產生熱逃脫的現象，導致電子電洞脫離量子井侷限的情形變嚴重，進而使輻射複合機率及光輸出功率的下降。從結果圖中可以看到 LED C 的 hot/cold factor 比其他元件更接近於 1，這也代表 LED C 受環境溫度變化的影響較小。如上述，因 LED C 的電洞在量子井中分佈較 LED A 與 LED B 為均勻，因此載子在各個量子井中應處於較低的能階，在高溫環境中時，載子較不易因獲得能量而逃脫；相對地，LED A 與 LED B 因載子在量子井中分佈不均的關係，所以當獲得能量時，載子相對地較容易越過能障而逃脫出主動區，造成發光效率衰減。

在低溫環境之 LED 光電特性分析上，本實驗先利用銀膠將 LED 黏於罐型封裝(TO-CAN)上，並置入烤箱烤 3 分鐘後使其黏著穩固，再利用超音波鋸線機將 LED 與 TO-CAN 接腳做連結，隨後我們會再用 HP4156C 系統量測其反向漏電流(I_r)，以確保該 LED 並沒有因為打線的過程而受到破壞，其標準以反向電壓-5 V 時，LED I_r 數值低於 $1 \mu\text{A}$ 。然後將 TO-CAN 置入低溫 EL 量測系統之冷凝頭中，隨後將其腔體抽真空至 10 mTorr 以下，接著利用溫度控制器與氮氣壓縮機配合對冷凝頭進行降溫，該實驗設定環境溫度範圍為 30 ~ 300 K，並以 30 K 為一個 step 從 300 K 開始降溫，量測電流為 120 mA 來探討 LED 電子電洞的行為與光強度的變化。圖 9 為 LED A、LED B 與 LED C 在注入電流 120 mA 及不同溫度下之光強度特性圖，從圖中可清楚地發現所有樣品隨著環境溫度由室溫降低，光強度皆有先上升後下降再上升的趨勢。有文獻認為當溫度由室溫降至低溫時，因為 LED 中的缺陷捕捉載子半徑會隨著溫度降低而變小，所以非輻射複合率也會相對減少，以至於 LED 輻射複合率增加而電致發光強度因此提升[19-20]；不過，當溫度降至 210 K 以下時，光強度有衰減的現象產生，這是由於 LED p-GaN 與 n-GaN 因材料濃度特性的關係，在低溫時難以活化出載子，造成載子濃度減少，使得在主動區量子井中的載子數目大幅下降，造成電子與電洞輻射複合率降低[21-23]；而當溫度降至 60 K 以下時，由於氮化鎵半導體塊材 p-GaN 與 n-GaN 本身的濃度會有回升的現象產生，使得 LED 光強度在 60 K 以下時又會有些微回升的狀況發生。此外，圖 9 可以觀察到 LED A 在強度衰減的幅度是三者當中最小的，這樣的明顯差異是因為 LED A 本身電洞注入層濃度較高，能提供的載子數相對較多，所以當溫度降低時，整體能傳輸注入至主動區的載子數目也相對較多，因此光強度衰減的幅度較小；而對於 LED C 來說，因電洞注入層本身的濃度最低，所以受低溫影響時，光強度衰減幅度則會較大。

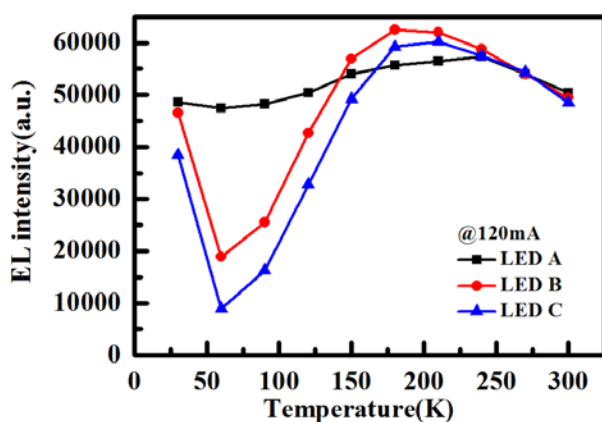


圖 9 在 120 mA 下不同溫度之光強度特性圖

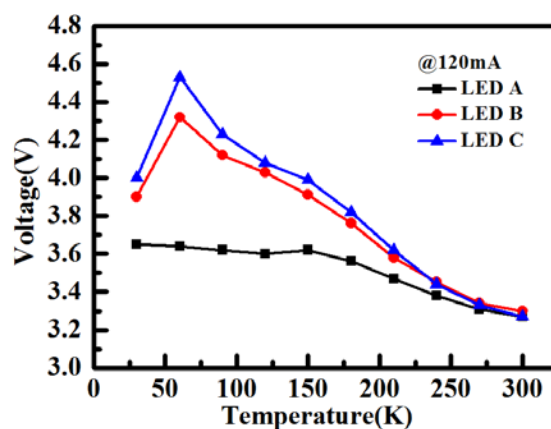


圖 10 在 120 mA 下不同溫度之順向偏壓特性圖

如圖 10 所示，在注入電流 120 mA 及不同溫度下之 LED 順向偏壓之特性圖中，我們可以明顯地看到順向電壓隨著溫度下降有先上升後下降的趨勢。其中，我們認為有兩種因素可能是造成 LED 電壓增加的原因：(I)當溫度從 300 K 降至 60 K 左右時，氮化鎵半導體 p-GaN 與 n-GaN 載子濃度的減少，造成 LED 需要被加上更大的電壓才能來注入相同的電流。再從導電率公式(4)來看：

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \quad (4)$$

隨著濃度的下降確實與其成正比的導電率也會下降，因此 LED 的導電率下降，即電阻率增加，所以 LED 的操作電壓也因此上升。(II)由底下公式(5)Varshini equation 所示，我們亦可發現當溫度降低時，將造成材料能隙(E_g)變大，進而使得 LED V_f 上升[24-26]。不過，以上這兩個原因，又以(I)的影響最為顯著，為造成 LED 順向電壓隨著溫度下降而上升的主要原因。

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \quad (5)$$

另一方面，當溫度再從 60 K 持續往下下降時，此時 V_f 反而有些微反轉的趨勢。如先前所提到的，當溫度越降越低時，半導體塊材本身的濃度會有些許回升的現象產生，使得導電率有所回升，因此造成 LED V_f 下降 [27]。此外，如圖 10 中仍可以發現 LED A 的電壓起伏較其他兩者樣品來的小，這原因主要是 LED A 本身電洞注入層濃度較高，使其導電率較高，所以在電壓上的起伏並不會太大；而對於 LED C 來說，因本身電洞注入層濃度最少，所以當溫度降低時，在 V_f 上的起伏也會最大。

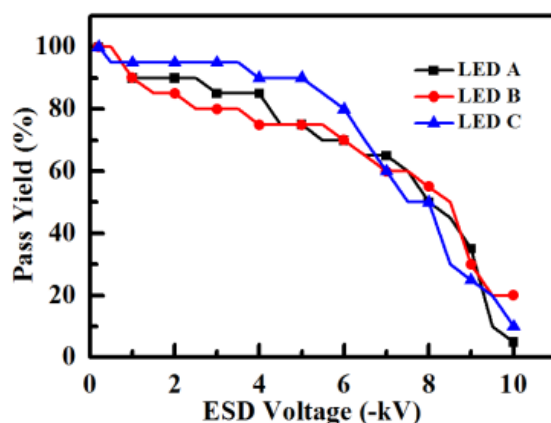


圖 11 LED 抗靜電能力測試之良率曲線圖

最後在 LED 抗靜電能力分析上，我們以模擬人體放電模式(human body model, HBM)，對三種樣品進行靜電放電(electrostatic discharge, ESD)測試。如圖 11 LED ESD 的良率曲線結果所示，我們可發現在電壓低於-6 kV 以下時，LED C 展現出較佳的 ESD 特性，其中在電壓為-6 kV 時，LED A、LED B 與 LED C 的良率分別是 70、70 與 80%。這樣的趨勢與先前的電流散佈結果相符合，因此我們推斷 LED C 因電流散佈能力比其他兩者樣品好，使得電荷不易集中在同一處，造成 LED C 較不易被靜電擊穿。至於，在電壓高於-6 kV 以上時，由於電壓及電場過大的原因，所以三者的抗靜電能力則無明顯差異。

肆、結論

實驗結果顯示，在電特性上 LED C 因改善了電流散佈，使得在 V_f 特性上較其他兩者佳。而光特性部分，因為當磊晶層成長溫度較低的關係，使得 LED A 的電洞濃度比 LED B 與 LED C 高，因此光強度分別較 LED B 與 LED C 提升了 1.85 與 3.74%。而在 efficiency droop 部分，我們認為因為 LED C 有較佳的電洞分佈，造成 efficiency droop 程度比 LED A 與 LED B 來的小。

不同環境溫度進行光特性量測結果顯示，在高溫方面，由 hot/cold factor 量測得知，LED C 對高溫依賴性較低，主要是因為 LED C 的電洞分布比其他元件較為均勻；而在低溫 EL 量測結果顯示，LED A 在光強度衰減趨勢較其他兩者小，其原因為電洞注入層本身濃度較高，較不受低溫影響，反觀 LED C 因電洞注入層本身濃度較少的關係，所以在光強度衰減方面較為嚴重。

至於在可靠度之靜電放電測試結果可發現，在電壓-6 kV 時，LED A、LED B 與 LED C 的存活率分別為 70、70 與 80%。這是因為 LED C 具有較佳的電流散佈能力，使其不易被靜電擊穿，因而提升樣品的抗靜電能力。

最後，我們認為在低溫成長 HIL 的 LED 小電流下是因為提升了電洞注入的效率，因此具有較佳的發光效率；相對地，在高溫成長 HIL 的 LED 大電流下是因為電洞橫向散佈能力提升，因此具有較少的 efficiency droop 現象，同時操作電流下的電壓值也相對比較低。另外，再加上熱效應及 hot/cold factor 特性也都較佳。由上述的實驗結論，我們認為低溫成長 HIL 的 LED 在小電流下的特性較佳，因此較適合應用於元件尺寸較小的產品。至於高溫成長 HIL 的 LED 則適合於元件尺寸較大或高功率元件的產品應用。

參考文獻

- [1] B. Monemar and B. E. Sernelius. (2007). Defect related issues in the “current roll-off” in InGaN based light emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 91(18), 181103.
- [2] T. Wei, L. Zhang, X. Ji, J. Wang, Z. Huo, B. Sun, Q. Hu, X. Wei, R. Duan, L. Zhao, Y. Zeng, and J. Li. (2014). Investigation of Efficiency and Droop Behavior Comparison for InGaN/GaN Super Wide-Well Light Emitting Diodes Grown on Different Substrates, *IEEE Photonics Journal*, 6(6), 8200610.
- [3] M. F. Schubert and E. F. Schubert. (2010). Effect of heterointerface polarization charges and well width upon capture and dwell time for electrons and holes above GaInN/GaN quantum wells, *Appl. Phys. Lett.*, 96(13), 131102.
- [4] T. M. Hsu, C. Y. Lai, W. H. Chang, C. C. Pan, C. C. Chuo, and J. I. Chyi. (2004). Electroreflectance study on the polarization field in InGaN/AlInGaN multiple quantum wells, *Appl. Phys. Lett.*, 84(7), 1114.
- [5] G. Chen, Z. L. Li, X. Q. Wang, C. C. Huang, and X. Rong. (2013). Effect of polarization on intersubband transition in AlGaIn/GaN multiple quantum wells, *Appl. Phys. Lett.*, 102(19), 192109.
- [6] S. Hammersley, D. Watson-Parris, P. Dawson, M. J. Godfrey, T. J. Badcock, M. J. Kappers, C. McAleese, R. A. Oliver, and C. J. Humphreys. (2012). The consequences of high injected carrier densities on carrier localization and efficiency droop in InGaN/GaN quantum well structures, *J. Appl. Phys.*, 111(8), 083512.
- [7] X. A. Cao and Y. Yang. (2010). Electroluminescence observation of nanoscale phase separation in quaternary AlInGaIn light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 96(15), 151109.
- [8] E. Kioupakis, P. Rinke, K. T. Delaney, and C. G. Van de Walle. (2011). Indirect Auger recombination as a cause of efficiency droop in nitride light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 98(16), 161107.
- [9] Z. H. Zhang, W. Liu, Z. Ju, S. T. Tan, Y. Ji, Z. Kyaw, X. Zhang, L. Wang, X. W. Sun, and H. V. Demir. (2014). InGaN/GaN multiple-quantum-well light-emitting diodes with a grading InN composition suppressing the Auger recombination, *Appl. Phys. Lett.*, 105(3), 033506.
- [10] J. Piprek, F. Romer, and B. Witzigmann. (2015). On the uncertainty of the Auger recombination coefficient extracted from InGaN/GaN light-emitting diode efficiency droop measurements, *Appl. Phys. Lett.*, 106(10), 101101.
- [11] B. C. Lin, K. J. Chen, C. H. Wang, C. H. Chiu, Y. P. Lan, C. C. Lin, P. T. Lee, M. H. Shih, Y. K. Kuo, and H.

- C. Kuo. (2014). Hole injection and electron overflow improvement in InGaN/GaN light-emitting diodes by a tapered AlGaN electron blocking layer, *Opt. Express*, 22(1), 463-469.
- [12] C. S. Xia, Z. M. S. Li, Z. Q. Li, Y. Sheng, Z. H. Zhang, W. Lu, and L. W. Cheng. (2012). Optimal number of quantum wells for blue InGaN/GaN light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 100(26), 263504.
- [13] J. Senawiratne, A. Chatterjee, T. Detchprohma, W. Zhao, Y. Li, M. Zhua, Y. Xia, X. Li, J. Plawsky, and C. Wetzel. (2010). Junction temperature, spectral shift, and efficiency in GaInN-based blue and green light emitting diodes, *Thin Solid Films*, 518(6), 1732-1736.
- [14] B. L. Hancock and M. Holtz. (2014). Straightforward electrical measurement of forward-voltage to investigate thermal effects in InGaN/GaN high-brightness light-emitting diodes, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 32(6), 061209.
- [15] X. Ni, X. Li, J. Lee, S. Liu, V. Avrutin, U. Ozgur, H. Morkoç, A. Matulionis, T. Paskova, G. Mulholland, and K. R. Evans. (2010). InGaN staircase electron injector for reduction of electron overflow in InGaN light emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 97(3), 031110.
- [16] C. H. Liu, R. W. Chuang, S. J. Chang, Y. K. Su, L. W. Wu, C. C. Lin. (2004). Improved light output power of InGaN/GaN MQW LEDs by lower temperature p-GaN rough surface, *Mater. Sci. Eng. B-Adv. Funct. Solid-State Mater.*, 112(1), 10-13.
- [17] APSYS. (n.d.). Retrieved from <http://www.crosslight.com/products/apsys/>
- [18] Y. Z. Chiou, T. H. Chiang, D. S. Kuo, S. J. Chang, T. K. Ko, and S. J. Hon. (2011). The reliability analysis of GaN-based light-emitting diodes with different current-blocking layers, *Semicond. Sci. Technol.*, 26(8), 085005.
- [19] C. M. Lee, C. C. Chuo, J. F. Dai, X. F. Zheng, and J. I. Chyi. (2001). Temperature dependence of the radiative recombination zone in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diodes, *J. Appl. Phys.*, 89(11), 6554.
- [20] N. Otsuji, K. Fujiwara and J. K. Sheu. (2006). Electroluminescence efficiency of blue InGaN/GaN quantum-well diodes with and without an n-InGaN electron reservoir layer, *J. Appl. Phys.*, 100(11), 113105.
- [21] C. L. Yang, L. Ding, J. N. Wang, K. K. Fung, W. K. Ge, H. Liang, L. S. Yu, Y. D. Qi, D. L. Wang, Z. D. Lu, and K. M. Lau. (2005). Thermally activated carrier transfer processes in InGaN/GaN multi-quantum-well light-emitting devices, *J. Appl. Phys.*, 98(2), 023703.
- [22] A. Hori, D. Yasunaga, A. Satake and K. Fujiwara. (2001). Temperature dependence of electroluminescence intensity of green and blue InGaN single-quantum-well light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 79(22), 3723.
- [23] P. Bakmiwewa, A. Hori, A. Satake, K. Fujiwara. (2004). Temperature-dependent electroluminescence anomalies influenced by injection current level in InGaN single-quantum-well diodes, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 21(2-4), 636-640.
- [24] Y. F. Wu, H. P. Hsu, and T. Y. Liu. (2012). Thermal effect on the electroluminescence of InGaN/GaN multiquantum-well light-emitting devices, *Sol. St. Elec.*, 68, 63-67.
- [25] W. Zhao, X. Fei, J. Ma, and Y. Luo. (2007). Study of temperature-dependent electroluminescence in the high-power blue InGaN/GaN multiple quantum wells light-emitting diodes, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 238-239.
- [26] X. A. Cao, and S. F. LeBoeuf. (2007). Current and Temperature Dependent Characteristics of

Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes, *IEEE Trans. Electron Devices*, 54(12), 3414-3417.

[27] S. M. Sze. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*. New York, NY: John Wiley & Sons.