

直流電流導致氮化鎵功率發光二極體發光效率衰減之因素

劉秉承 林睿蜻 林雲翔 黃文祥 廖豐標

大葉大學電機工程學系

515 彰化縣大村鄉山腳路 112 號

摘 要

近年來，高功率發光二極體的應用領域不斷地增加。除了交通號誌及戶外看板外，高功率發光二極體也逐漸在背光模組及固態照明等應用中佔有一席之地。

高功率發光二極體需要大電流驅動，使用時會產生大量的熱，進而影響發光二極體的性能，例如發光效率及可靠度。

這篇論文中，我們使用脈衝電流探討直流電流下，高功率氮化鎵發光二極體發光效率衰減的因素。藉由脈衝驅動，我們可以區分高功率氮化鎵發光二極體中接面溫度和注入載子濃度對發光效率衰減的影響。比較脈衝驅動跟直流驅動的量測結果後，我們證明高功率氮化鎵發光二極體發光率衰減主要是由於發光二極體的接面溫度和注入載子濃度所造成。

關鍵詞：發光二極體 (LED)，發光效率，接面溫度，載子濃度

A DC-Current-Induced Rollover of the Illumination Efficiency of GaN-Based Power

BING-CHENG LIU, RUEI-CHING LIN, YUN-HSIANG LIN, PATRICK HUANG and MICHAEL P. LIAO

Department of Electrical Engineering, Da-Yeh University

No. 112, Shanjiiao Rd., Dacun, Changhua, Taiwan 51591, R.O.C.

ABSTRACT

In recent years, applications of high-power light-emitting diodes (LEDs) have constantly increased. In addition to traffic signs and outdoor-boards, high-power LEDs have gained ground in applications to back-lighting systems and solid-state illumination.

High-power LEDs requiring high-current drives generate much heat, which in turn degrades the performance of devices in areas such as illumination efficiency and reliability.

In this research, pulse-driven currents were utilized to investigate DC-current-induced degradation of the illumination efficiency of GaN-powered LEDs. By using pulse-driven currents, the effects of junction temperature and carrier concentration on this type of degradation can be distinguished. By comparing the measurement results obtained from pulse- and DC-driven currents, it was verified that junction temperature and carrier concentration are the major causes of such DC-current-induced degradation.

Key Words: light-emitting diode, illumination efficiency, junction temperature, carrier concentration

一、前言

高亮度、高功率氮化鎵發光二極體的應用越來越廣泛，例如 LCD (liquid-crystal display) 的背光板和固態照明的光源應用都方興未艾 [8, 12]。高功率發光二極體的轉換效率或發光效率是上述應用時最重要的參數之一，這些應用都要追求高輸出功率和高發光亮度，其中 LED (light emitting diode) 的發光效率可以定義為光輸出功率對電輸入功率的比值。

當電流增加時，發光二極體的光輸出功率會趨向飽和，因此，發光二極體的發光效率趨向衰減。這個現象限制了發光二極體的光輸出功率。根據之前的研究，LED 的發光效率會受到接面溫度 (junction temperature, T_j) 的影響 [1, 5]。長時間使用高功率 LED 時，元件產生的熱會聚集在元件內部，因此，元件內部溫度將會升高。LED 所釋放的熱，是影響產品使用效率的關鍵，假如釋放的熱量愈大，LED 內部所產生的熱也會愈高，LED 的發光效率及使用壽命也會相對降低。因此，使用高功率發光二極體時，必須努力克服熱的問題。

現在 LED 的製造商也慢慢地重視這個問題。所以，在這一部份，LED 封裝的材料不斷地被研發出來，以因應持續提高 LED 亮度所產生高溫、高熱所帶來的影響。例如，之前 LED 所使用的封裝材料為環氧樹脂，其耐熱性較差，在 LED 本身的使用壽命未到達之前，環氧樹脂就已經出現劣化的現象。就目前而言，代替環氧樹脂的新封裝材料—矽樹脂，已經被開發出來。它具有較高的耐熱性，平均耐熱溫度可達 $150^{\circ}\text{C}\sim 180^{\circ}\text{C}$ ，也不會有變色的情形，且能夠分散藍色和近紫外光，抑制材料因電流和光線所帶來的影響，似乎是一項不錯的封裝材料。對使用者而言，將大大提高 LED 的使用效率及延長使用壽命。

另一方面，為了驗證從包裝階段到最後的系統的熱管理的效力，很多測量 LED 接面溫度的方法已經被發展。這些方法包括 LED 順向電壓方法 [10, 11]、拉曼頻譜的測量方法 [9]、電致發光的方法 [3] 與具鐳射照明搭配液體的結晶向列溫度測量方法 [6]。

然而，當 LED 的 DC (direct current) 注入電流增加時，注入載子濃度也隨之會增加。依照先前的研究，較佳的載子侷限可以提高 LED 的發光效率 [4]。換句話說，LED 發光效率的衰減不單只是受到 LED 接面溫度的影響。注入的直流電流增加導致發光效率降低的因素至少包含接面溫度和

載子濃度兩種。但是，相關的細節或定量的探討至今都還沒有被徹底研究。徹底了解功率發光二極體之發光效率衰減的原因可以對症下藥，有效地提高 LED 的發光效率。

在本文中，我們利用二極體順向電壓法來探討載子濃度和接面溫度對高亮度氮化鎵發光二極體發光效率衰減的影響。順向電壓法是非破壞性的量測，具有準確、方便等特性，因此被廣泛的使用在發光二極體接面溫度的量測 [10, 11]。順向電壓法包括兩次量測，一是校正量測，一是實際的 LED 接面溫度量測。校正量測時，順向脈衝電流注入置於烘箱中的 LED。量測時，重要的基本假設是脈衝電流產生的熱不會有意義的改變 LED 接面溫度。換言之，此時 LED 的接面溫度可視為和環境溫度或烘箱的設定溫度相同。校正量測建立各個注入電流所產生的順向電壓和接面溫度的對應關係。完成校正量測後，我們再注入各個順向 DC 電流，並量測其順向電壓。對照校正量測的結果後，可以得到不同直流電流產生的接面溫度。

在順向電壓法中，基本的假設是：在校正量測時，所注入的短脈衝電流不會影響發光二極體的接面溫度。這項假設的證明對量測的可行性是重要的。LED 接面溫度和脈衝工作週期的關係如圖 1 所示 [7]，其中脈衝的頻率是 10 Hz、脈衝的電流大小是 350 mA。當脈衝工作週期增加時，LED 的接面溫度隨之增加。當週期從 0.1% 增加到 0.2% 時，接面溫度上升了 0.3°C 。當週期從 0.1% 增加至 100% 時 (DC)，接面溫度上升到 99°C 。使用外插法分析結果，我們可以得到當工作週期為 0.1% 時，即脈衝寬度為 100 μsec ，接面溫度的增加值小於 0.3°C 。另外，當綠光功率 LED 的 DC 電流由 400 mA 切換為 10 mA 時，其熱轉換特性如圖 2 所示 [2]。在切換 100 μsec 後，LED 的接面溫度下降值小於 1°C ；切換 1 msec 後，LED 的接面溫度下降值小於 4°C 。基於上述實驗結果，證實使用順向電壓法時，所注入的脈衝電流不會有意義的影響接面溫度。

我們進一步應用上述特性，使用脈衝驅動電流，將接面溫度與載子濃度對發光效率衰減的影響予以區分。因此，我們可以分別得到 LED 接面溫度和注入載子濃度導致 LED 發光效率衰減的影響。在脈衝驅動方法中，我們先得到在 30°C 時，電流從 20 mA 到特定電流時的效率衰減；然後，得到各電流的接面溫度從 30°C 增加到特定直流電流產生的接面溫度時，所造成的發光效率衰減。最後，我們得到脈衝電流與直流電流造成發光效率衰減之關係，並加以比較。

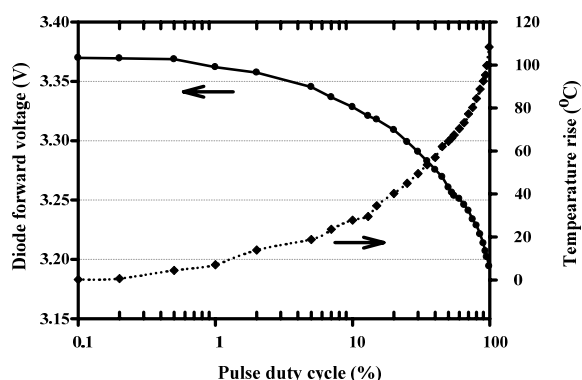


圖 1. 典型功率 LED 順向電壓（實線）、接面溫度（虛線）和脈衝工作週期的關係

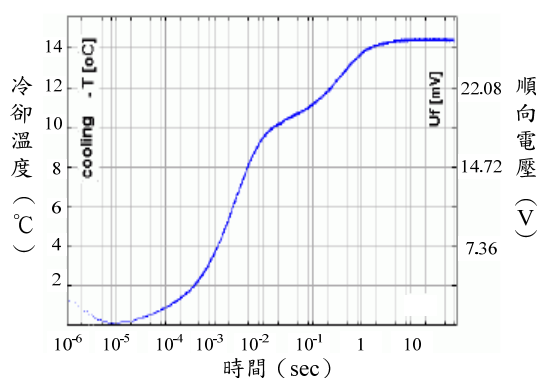


圖 2. 綠光功率 LED 的 DC 電流由 400 mA 切換為 10 mA 時的熱轉換特性 [2]

二、實驗結果與討論

我們使用直流和脈衝電流來量測 Cree 公司生產型號為 EZ1000 的高亮度氮化鎵白光發光二極體，LED 的發光面積是 1 mm^2 ，晶粒厚度是 $100 \mu\text{m}$ 。我們先取得在直流操作下，LED 的發光特性作為參考。圖 1 是一個典型高亮度 LED 的順向偏壓、光輸出功率和直流驅動電流的關係。其中，DC 驅動電流的量測範圍是從 20 mA 到 400 mA，光輸出功率是使用矽光偵測器量測得到。由圖中，我們可以看到發光二極體的發光效率趨向衰減。依前言討論，注入直流電流增加導致發光效率降低的因素至少包含 LED 接面溫度增加和注入載子濃度增加兩種。

然後，我們將 LED 放置於烘箱內，注入不同的脈衝電流，脈衝電流的頻率為 10 Hz，週期為 0.1%。因為注入的脈衝電流不會有意義的影響 LED 接面溫度，因此，使用脈衝電流量測時，LED 的接面溫度基本上和周圍的環境溫度相

同。

當固定脈衝電流時，相對也固定了載子的濃度，然後增加環境溫度，也就是 LED 的接面溫度；如此，我們可以得到 LED 接面溫度與發光效率的關係。另一方面，假設我們固定周圍環境溫度，也就是固定 LED 的接面溫度，當脈衝電流增加時，我們可以得到載子濃度與發光效率的關係。以這個方法，我們可以分別評估接面溫度和載子濃度對 LED 發光效率衰減的影響。

圖 3 是一個典型高功率 LED 的順向偏壓、光輸出功率和脈衝電流的關係。其中，脈衝驅動電流的量測範圍是從 20 mA 到 400 mA。這項量測是在一個固定溫度 30°C 的烘箱進行。我們看到發光二極體的發光效率趨向衰減。發光效率的衰減完全是因為注入的載子濃度增加，因為量測時，LED 的接面溫度是固定的。

表 1 列出使用脈衝驅動電流量測功率 LED 的順向電壓和光輸出功率。其中，脈衝驅動電流的量測範圍是從 20 mA 到 250 mA。量測中，LED 的接面溫度藉由設定烘箱在各 DC 電流產生的接面溫度而得到。各 DC 電流產生的接面溫度是預先使用順向電壓法取得。換言之，在相同電流下，DC 和脈衝驅動電流的 LED 有相同的接面溫度，只是前者由 DC 電流產生，後者由烘箱產生。LED 的發光效率定義為光功率輸出與電功率輸入的比值，因此我們可以得到在各 DC 電流產生的接面溫度下，各脈衝驅動電流產生的發光效率 $\eta(T_j)$ 。

表 1 也列出接面溫度為 30°C 時，各脈衝驅動電流產生的發光效率 $\eta(30)$ ，計算的數據是基於圖 2 的量測結果。為了比較數據，我們正規化發光效率 $\eta(\text{Temp})$ ；即 $\eta(T_j)$ 和

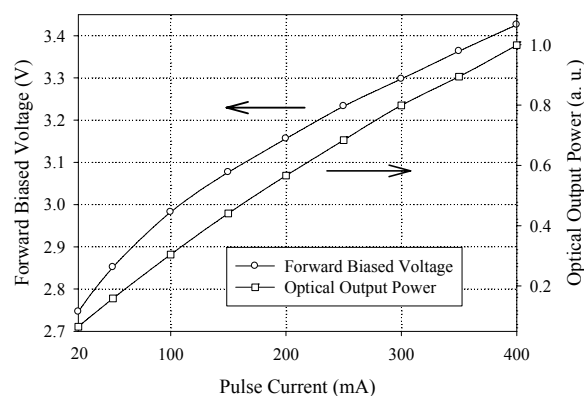


圖 3. 30°C 時，典型的功率 LED 的光輸出功率、順向電壓與脈衝驅動電流之關係圖

表 1. 不同脈衝電流及其對應接面溫度量測結果

注入脈衝電流 (mA)	20	50	100	150	200	250
接面溫度 (°C)	30	38	60	75	87	98
T_j 時順向電壓 (V)	2.746	2.827	2.876	2.920	2.972	3.004
T_j 時光輸出功率 (a. u.)	0.065	0.153	0.271	0.372	0.461	0.543
T_j 時的發光效率* 10^{-3} (a. u.)	1.183	1.084	0.942	0.849	0.775	0.723
30°C 時發光效率* 10^{-3} (a. u.)	1.183	1.114	1.021	0.955	0.897	0.846
正規化發光效率, $\eta(\text{Temp})$	1	0.973	0.923	0.890	0.865	0.855

$\eta(30)$ 的比值。在 20 mA 的脈衝電流驅動下，量測到的接面溫度也是 30°C。因為 $\eta(T_j)$ 和 $\eta(30)$ 相等， $\eta(\text{Temp})$ 是 1。在 250 mA 的脈衝電流驅動下，接面溫度從 30°C 上升到 98°C 時，在正規的發光效率 $\eta(\text{Temp})$ 是 85%。固定脈衝電流的 $\eta(\text{Temp})$ 會衰減純粹是因為高功率 LED 的接面溫度上升的緣故。

圖 4 是不同的正規化發光效率與驅動電流的關係，其中，驅動電流的範圍也是從 20 mA 到 250 mA。直流電流發光效率的計算是基於圖 5 的量測結果。 $\eta(\text{dc})$ 是另一個正規化發光效率；即某 DC 電流的發光效率和 DC 電流為 20 mA 時的發光效率的比值。當電流從 20 mA 增加到 250 mA 時，發光效率衰減為 60.4%。當直流驅動電流增加時，有幾個因素造成發光效率衰減，其中包含接面溫度增加和載子濃度增加。

圖 4 也顯示 30°C 時，脈衝電流增加造成的發光效率衰減。正規化發光效率 $\eta(\text{carrier})$ 是基於圖 4 的量測結果，也就是任一驅動脈衝電流的發光效率和 20 mA 的發光效率的比值。在 250 mA 時，正規化的發光效率衰減為 71.5%。這些量測都是在 30°C 時進行，脈衝驅動電流增加時，其正規

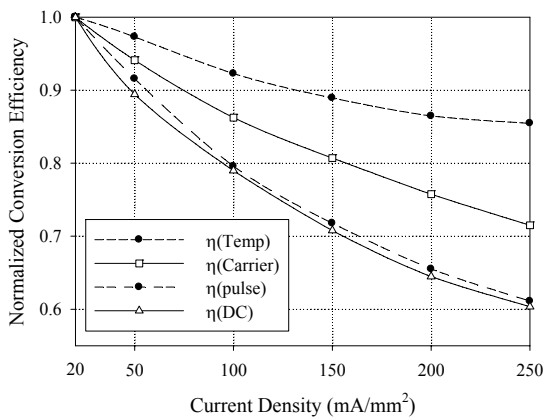


圖 4. 不同正規化轉換效率與電流的關係圖

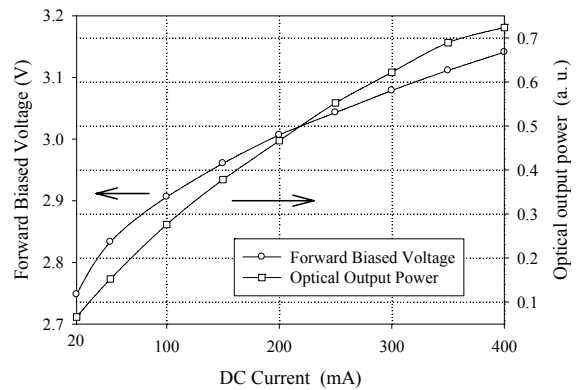


圖 5. 典型的功率 LED 的光輸出功率、順向電壓法與 DC 驅動電流之關係圖

化發光效率會衰減是因為載子濃度增加的緣故。

為完整起見，圖 4 也顯示表 1 中所得到的正規化發光效率 $\eta(\text{Temp})$ 。 $\eta(\text{Temp})$ 衰減完全是由於高功率 LED 接面溫度的上升的緣故。 $\eta(\text{carrier})$ 和 $\eta(\text{Temp})$ 都是由脈衝量測得到。一般而言， $\eta(\text{carrier})$ 的下降量約為 $\eta(\text{Temp})$ 下降量的兩倍；前者是因為載子濃度增加所造成的發光效率衰減，後者是因為接面溫度由 30°C 升高到直流電流接面溫度所造成的發光效率衰減。後者的溫度升高不是因為 DC 電流注入，而是烘箱所設定。

最後，我們定義另外一種正規化的發光效率 $\eta(\text{pulse})$ 為 $\eta(\text{carrier})$ 乘以 $\eta(\text{Temp})$ ，如圖 4 所示。 $\eta(\text{pulse})$ 代表在脈衝操作時，正規化發光效率的衰減是由增加的載子濃度和增加的接面溫度造成；即同時考慮兩種因素的結果。在電流 250 mA 時， $\eta(\text{dc})$ 和 $\eta(\text{pulse})$ 分別為 60.4% 和 61.1%；在 200 mA 時，分別為 64.5% 和 65.5%。比較圖 4 的 $\eta(\text{dc})$ 與 $\eta(\text{pulse})$ 後，我們證明接面溫度和載子濃度是造成直流電流驅動下高亮度 LED 發光效率衰減的主要原因。

三、結論

我們使用脈衝驅動電流研究直流偏壓時，高功率發光二極體發光效率衰減的因素。脈衝電流協助我們區別界面溫度與載子濃度在直流電流狀況下，造成發光效率衰減的效應。在脈衝電流操作中，我們得到了在 30°C 時電流從 20 mA 增加到特定電流的發光效率衰減；然後，在溫度從 30°C 升溫到直流電壓 DC 的界面溫度時，我們亦可以得到發光效率的衰減與界面溫度之間關係。比較脈衝電流與直流電流量測結果之後，我們證實界面溫度與載子濃度是影響直流電流造成高功率發光二極體發光效率衰減的主要因素。

參考文獻

1. Arik, M., J. Petroski and S. Weaver (2002) Thermal challenges in the future generation solid state lighting applications: Light emitting diodes. *Proceedings of IEEE Intersociety Conference on Thermal Phenomena*, 113-120. San Diego, CA.
2. Farkas, G., S. Haque, F. Wall, P. S. Martin, A. Poppe, Q. van Voorst Vader and G. Bogner (2004) Electric and thermal transient effects in high power optical devices. *Proceedings of the 20th IEEE SEMI-THERM Symposium*, San Jose, CA.
3. Fischer, P., J. Christen, M. Zacharias, V. Schwegler, C. Kirchner and M. Kamp (1999) Direct imaging of the spectral emission characteristic of an InGaN/GaN-ultraviolet light-emitting diode by highly spectrally and spatially resolved electroluminescence and photoluminescence microscopy. *Applied Physical Letters*, 75(22), 3440-3442.
4. Hansen, M., J. Piprek, P. M. Pattison, J. S. Speck, S. Nakamura and S. P. DenBaars (2002) High efficiency InGaN laser diodes with an improved quantum well capping configuration. *Applied Physical Letters*, 81(22), 4275-4277.
5. Huh, C., W. J. Schaff, L. F. Eastman and S. J. Park (2004) Temperature dependence of performance of InGaN/GaN MQW LEDs with different indium compositions. *IEEE Electron Device Letters*, 25(2), 61-63.
6. Lee, C. C. and J. Park (2004) Temperature measurement of visible light-emitting diodes using nematic liquid crystal thermography with laser illumination. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(7), 1706-1708.
7. Liao, M. P. (2007) Carrier concentration and junction temperature dependencies of illumination efficiency of GaN power light-emitting diodes. *Conference on Lasers and Electro-optics*, Baltimore, MD.
8. Nakamura, S. and S. F. Chichibu (2000) *Introduction to Nitride Semiconductor Blue Laser Diode and Light Emitting Diodes*. Taylor and Francis London, U.K.
9. Todoroki, S., M. Sawai and K. Aiki (1985) Temperature distribution along the striped active region in high power AlGaAs visible lasers. *Journal of Applied Physics*, 58(3), 1124-1128.
10. Xi, Y. and E. F. Schubert (2004) Junction-temperature measurement in GaN ultraviolet light-emitting diodes using diode forward voltage method. *Applied Physical Letters*, 85(12), 2163-2165.
11. Xi, Y., J. Q. Xi, Th. Gessmann, J. M. Shah, J. K. Kim, E. F. Schubert, A. J. Fischer, M. H. Crawford, K. H. A. Bogart and A. A. Allerman (2005) Junction and carrier temperature measurements in deep-ultraviolet light-emitting diodes using three methods. *Applied Physical Letters*, 86(3), 1907-1909.
12. Zukauskas, A., M. S. Shur and R. Gaska (2002) *Introduction to Solid-State Lighting*, Wiley, New York, NY.

收件：96.11.28 修正：97.03.06 接受：97.03.26