

空調系統旁通氣流冷卻高瓦數 LED 多晶模組研究

Study of Air-conditioning System Bypass Gas Flow Cooling High Power LED Multichip Module

許智能^{1*}、黃俊傑²、黃建和³、王麒鈞³、王偉權³、謝能文³
Chih-Neng Hsu^{1*}, Chun-Chieh Huang², Jian-He Huang³, Chi-Chun Wang³,
Wei-Chuan Wang³, and Neng-Wen Hsieh³

^{1*} 國立勤益科技大學冷凍空調與能源系助理教授

² 國立勤益科技大學冷凍空調與能源系碩士生

³ 國立勤益科技大學冷凍空調與能源系大學生

^{1*,2,3} Department of Refrigeration, Air Conditioning and Energy Engineering,
National Chin-Yi University of Technology

^{1*}E-mail: cnhsu@ncut.edu.tw

NSC 101-2622-E-167-014-CC3

摘要

本研究採用氮化銦鎵(InGaN)多晶片做高瓦數 LED (Light Emitting Diode)特性研究。其研究方法是以鋁擠型材和空調系統旁通氣流冷卻法做多晶 LED 構裝模組實驗研究，探究其熱傳特性的現象研究，以改善其性能，並幫助 LED 系統熱傳設計與組裝之參考依據。本研究構裝結構為矽基材，並使用銅材質，以利於熱傳導，再搭配空調系統旁通氣流冷卻法散熱，以增加多晶片 LED 熱傳、壽命、可靠度、減少光衰現象等特性，並使用恆溫恆濕機做環境溫度控制，觀察溫度變化及穩定性。最後，將依成果以不同瓦數等級重新定義區分 LED 之分類。

關鍵字詞：LED、空調系統、旁通氣流、冷卻法

Abstract

This paper focus on the indium Gallium Nitride (InGaN) multi-chip for high power LED heat transfer and thermal cooling analysis. This study based on multi-chip LED experimental of aluminum extrusion heat sink and air-conditioning system bypass gas flow cooling approach. An investigation of the heat transfer characteristics of the phenomenon of variation in order to improve performance and to help LED system as reference guideline for thermal design and assembly. This package structure could use the silicon substrate material and fill the copper material increase thermal conduction, and use the air-conditioning system bypass gas flow cooling approach. It will enhance to increase LED thermal cooling, long life, reliability, and reduce optics lumen decay phenomenon and so on. Finally, there are results according to different power rating to redefine the LED classifications.

Keywords: LED, Air-conditioning System, Bypass Gas Flow, Cooling Approach

1. 前言

近來，許多電子商品以輕薄短小為發展趨勢，如智慧型手機、顯示晶片、LED、汽機車、醫學設備、交通號誌、商店招牌、3C 產品、照明燈具、...等 LED 應用領域，如圖 1 所示。然而，電子設備所產的熱會影響晶片的運作、縮短壽命、降低效率、...等元件造成傷害，尤其熱是電子設備設計時所需改善的重點。

從愛迪生發明第一顆燈泡開始至今 LED 誕生，專家學者不停的創新研發，降低成本，提高燈泡的亮度、效率、壽命，使燈泡可以照亮全世界，突破照明，發揮優點，改善缺點，且具有低污染、高效率、高壽命、...等優勢，儼然成為照明市場中的一顆閃亮巨星。雖然

LED 有許多優點，但整體結構容易受熱的影響，使發光效率降低，需增加 Tj 熱傳，以增加效能和性能。本研究依不同瓦數及散熱片做區分，而進行 LED 多晶模組熱傳實驗研究，以了解結構可靠度及熱傳，作為未來性能設計改善的依據。



圖 1.LED 應用領域

2.LED 原理與文獻回顧

2-1.LED原理

發光二極體(LED)利用電能直接轉化為光能的原理，在半導體內正負極兩個端子施加電壓，當電流流經P(+)/N(-)型界面，使電子與電洞相結合時，剩餘能量便以光的形式釋放發光，依其使用的材料的不同，其能階高低使光子能量產生不同波長的光，如圖2所示。

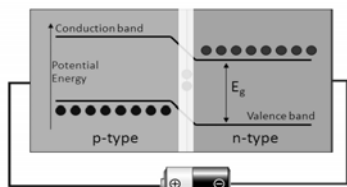


圖2.電流流經P(+)/N(-)型界面發光

2-2.文獻回顧

LED 能夠成為新世代的照明燈具，歸功於 LED 的發光晶片所致，在 1907 年 H. J. Round 發現晶體可輸入能量使其發光，且比燈泡所需的能量也較低，進而引起各界的高度興趣。將 LED 商業化是在 1962 年由奇異公司(GE)的 Nick Holonyak 製作第一顆紅光 LED 打入照明市場，成為新一代的照明產品，卻也發現 LED 所產生的熱，成為首要解決的問題[1]，但經由各界共同努力研發之後，已將 LED 的效率、可靠度與顏色大幅提升，如圖 3 所示 LED 發展演進趨勢。



圖 3.LED 發展演進趨勢(拓璞產業研究所)

David W. Vandepol et al. [2]於 1974 年得知將熱移除而使用散熱片作為較好的熱傳方式，且鰭片較長的散熱片，散熱效果佳，對於往後的電子產品散熱模組上，有著極大的改善。Robert et al. [3]在 2005 年想出若要製作白光，可利用藍光搭配紫外光製成白光 LED，或是利用磷光劑的方式，可讓 LED 發光效率超過 80 lm/W，已算是高功率型的 LED。Kuan Chun Chen et al. [4]使用三色混光的原理製造白光，則利用紅光晶粒和綠光晶粒與藍光晶粒三種不同顏色的晶粒，製作出同等白光的效果，但仍有散熱的問題需解決。Dongmei Li et al. [5]認為 LED 的光輸出效率卻只有 10%~20%的能量釋出，其餘 80%~90%的能量以熱的形式釋放，所以認為當 LED 在運作時溫度最好操作是在 100°C 以下為較佳。

LED 其最大隱憂則為熱所引起的 LED 損耗，降低 LED 的效率及壽命，故在 2000 年 Ji Cheng Lin [6]提出陶瓷作為封裝材料稱為 C-TSOP (Ceramic Thin Small Outline Package)，並以 LOC (Lead on Chip)增加散熱效率稱為 LOC-TSOP，並使用有限元素法進行分析之。Mehmet Arik et al. [7]發現 LED 晶片若以矽作為

材料熱傳導性會較好，雖然矽晶片的傳導性較高，也是需要於 LED 封裝上配置散熱裝置以對流方式解熱，降低能量所產生的熱影響晶片的運作。Liulin Yuan [8]將 LED 封裝中的底部矽材，製作出許多的微小通道，以利於空氣流動達到解熱目的。

Xiaobing Luo et al. [9]利用熱網路的方式估算散熱片的最高溫度，避免因 LED 的熱影響輸出光效率、可靠度、耐久度、...等。Rathin Mandal et al. [10]使用覆晶的方式，銅材質可改善散熱效率，因為材料的膨脹係數不匹配，會產生翹曲的現象，造成結構的傷害。

Ankur Jain et al. [11]提出封裝上若總熱阻降低，能夠更有效的將熱導出，以提升 LED 的效率及壽命，因此在製作 LED 時，封裝材料的選擇就格外重要。Kai Shing Yang et al. [12]發現除了 LED 封裝外，電路板會影響熱阻的大小。2009 年 Adam Christensen et al. [13]針對 LED 的散熱片間距作比較，發現散熱片的間距愈寬，使熱能有效的散出，若較緊密者，則反之。

Bohan Yan et al. [14]提出介電層若受到熱的影響，則影響高功率 LED 的效率，所以熱對於 LED 的影響不僅僅是封裝或晶片，其他部份也會造成不良。Liuxi Tan et al. [15]針對高亮度 LED 研究發現因熱所產生的缺失，則有裂紋發生，將降低 LED 的發光效率。

國內有一些研究在探討高亮度 LED 吸頂燈具之散熱研究[16]、高功率發光二極體熱傳途徑分析研究[17]、陣列式高功率 LED 均勻散熱研究[18]、以 EHD 技術增加 LED 散熱效率之研究[19]、高亮度 LED 散熱系統之熱傳及效益研究[20]、高功率 LED 散熱模組之效益研究[21]、LED 散熱模組性能實驗與熱流場數值模擬[22]、LED 構裝體之熱分析與量測[23]、多晶片 LED 構裝體之熱和光場分析與量測[24]、高功率 LED 構裝體與其模組之熱阻分析與量測[25]。

對於在自然對流增強散熱模組應用有高功率 LED 燈之研究[26]、散熱鰭片幾何尺寸對高功率 LED 模組熱傳性能之研究[27]、不同幾何造型散熱器應用在 LED 散熱之研究[28]、LED 模組之熱分析[29]、高功率 LED 熱效應之研究[30]。大功率 LED 散熱系統研究[31]、散熱座的材質與形狀對高功率 LED 嵌燈散熱效果之研究[32]、陶瓷燈具內高功率 LED 散熱基板形狀之熱傳分析[33]、發光二極體最佳化散熱模組研究[34]等國內外文獻回顧探討。

3. 研究方法

3-1.熱傳理論模式

熱傳遞有三種方式：熱傳導、熱對流與熱輻射。由圖 4 所示之 LED 經由電流通過後使晶片產生熱源，當晶片接合溫度 T_j 大於環境溫度 T_a ，此時溫度梯度則產生，晶片所產生之熱藉由物體介質之熱傳至環境，接著由環境的空氣流體做強制對流散熱，再加上發光的熱輻射而逐漸散熱至環境，此三種現象為 LED 的熱傳機制。

3-2.散熱片模式

圖 5 中 T_w 為散熱片壁面平均溫度， T_b 為散熱片根部之溫度， T_∞ 為環境溫度(若 $T_b > T_\infty$)，由於散熱片

上的溫度 T_f 會隨著散熱片長度增加而下降。最有效率的方法就是將散熱片溫度分布的效應整合成一個修正係數，稱為散熱片效率 $\eta_f = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{Q}{h \cdot A_f (T_b - T_\infty)}$ ，其中 Q

為散熱片真正熱傳量， Q_{max} 為散熱片最大熱傳量 ($T_f=T_b$)， A_b 為基部面積， A_f 為散熱片面積， T_w 為管壁平均溫度，而表面效率 $\eta_o = \frac{\text{熱交換器真正熱傳量}}{\text{熱交換器表面最大熱傳量}(T_f = T_w)}$

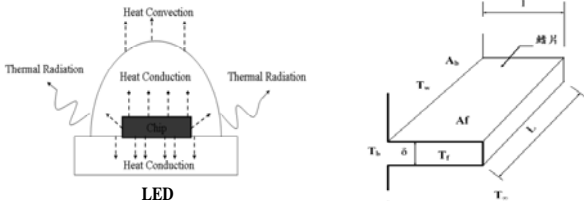


圖 4.LED 基本熱傳模式 圖 5.散熱片溫度變化

3-3.空調系統旁通氣流冷卻法

本研究以空調系統管路旁通氣流冷卻法概念對單顆多晶片 LED 構裝模組提出熱傳研究。由於多晶片 LED 超高瓦數($\geq 50W$)商品研發逐漸量產，也逐漸使用於室內大面積照明，對於解熱傳和均熱更是需要高流量低溫穩定流體強制冷卻方可有效降低 T_j 溫度，增加使用壽命。因此可以使用現有室內空調系統管路旁通冷流體冷卻散熱片和 LED 模組，可以有效降低溫度，減少其他散熱器(水冷、熱管、制冷晶片、Vapor Chamber)的重量、滲水、功率負載、均熱不均等裝置。而且可以使用空調系統變風量控制做冷卻流量的調整，以適時達到溫度冷卻、流量調節、節能等效益。

3-4.LED 熱阻模式

電子構裝散熱中，熱阻常用來計算電子構裝散熱的效能，也是構裝熱傳設計上重要的參數，當構裝結構熱阻阻值越大，表示熱傳遞越不易，構裝結構散熱能力就越差；反之，熱阻越小，則散熱能力越好。LED 結構熱阻計算方式又分為 T_j 至 T_a 和 T_j 至 T_{c2} 的計算，如圖 6 所示。

$$T_j = T_a + \theta_{ja} \times W; \theta_{ja} = T_j - T_a / W$$

$$T_j = T_{c2} + \theta_{jc} \times W; \theta_{jc} = T_j - T_{c2} / W$$

其中 T_j 為晶片接合溫度($^{\circ}C$)。 T_a 為環境溫度($^{\circ}C$)。 θ_{ja} 為 T_j 至 T_a 之間構裝材料的熱阻抗($^{\circ}C/W$)。 θ_{jc} 為 T_j 至 T_{c2} (T_{c2} case)之間構裝材料的熱阻抗($^{\circ}C/W$)。 W 為 LED 發熱消耗功率(Watt)。

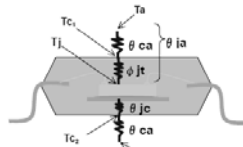


圖 6.熱阻模式

3-5.LED 模型與尺寸參數

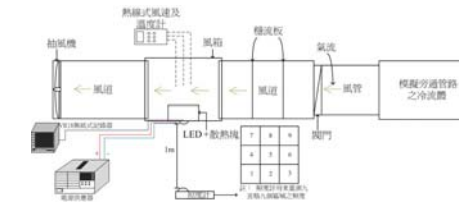
採用錫/鉛(63/37)板作為藍寶石基板與矽基座之間的緩衝層，在矽基座上方覆蓋著透明矽膠。分析瓦數為多晶 6Wx5、多晶 25Wx3、多晶 50Wx2、多晶 60Wx2、多晶 100Wx1 等實驗，如表 1 所示。

表 1.LED 瓦數、晶片、尺寸、模型、散熱片

瓦數	顆數	晶片型	尺寸	模型	鋁擠型散熱片
6W	5	多晶片	$\phi 12mm \times H 1.6mm$		
25W	3	多晶片	$\phi 20mm \times H 2mm$		
50W	2	多晶片	46mm x 40mm x 4mm		
60W	2				
100W	1				

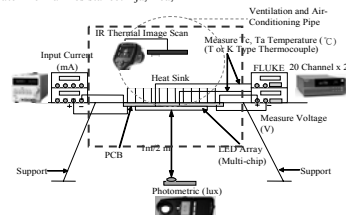
4. 實驗設備與架設

實驗系統主體外觀與量測設備架設如圖 7 所示說明。



a.實驗系統主體外觀圖

Input Current: 100mA, 350mA, 500mA, 700mA
Measure Time: 0~100msec, 0~1,000msec, 0~8,000msec
Measure Temp.: Tc, Ta ($^{\circ}C$)
Calculate Power Consumption: Watt
Calculate Thermal Resistance: Rja, Rca,
Calculate Junction Temp.: Tj
Plot ΔT_c vs. ΔT_j Correlation Figure
Calculate Efficiency: lm/W
Calculate lighting: lux



b.實驗量測設備架設

圖 7.實驗系統主體外觀與量測設備架設

5. 結果與討論

實驗散熱片材質是採用鋁製型散熱片，如表 1 所示，其散熱片尺寸為 250mm x 125mm x 69mm、 $K=200W/m_K$ ，散熱片厚度 0.5mm~10mm，散熱片與散熱片間的距離為 15.6mm~10.4mm，當流體流入散熱片時，由於散熱面積的增加，散熱速率增快熱傳性能相對就提升。環境溫度設定為 $25^{\circ}C$ 。

多晶 LED 運作時各晶片皆會產生熱，造成溫度分布不均的現象，進而產生單點溫度較高位置，稱之為熱點(Hot Spot)，若未採取對熱點合適的散熱方式，可能使 LED 晶片的效率下降，甚至於燒毀。為找到多晶 LED 熱點位置，使用 50W 的 LED，如圖 8 所示，在 LED 背面固定 5 條 T-type Thermocouple 線位置，以無紙式紀錄器進行溫度的紀錄，其結果如圖 9 所示，接近中央為溫度最高點，由此發現多晶 LED 熱點分布多集中於中央位置，因此實驗皆以量測多晶 LED 背面中心點 T_{c2} 。

首先實驗是多晶 LED 6Wx5 顆，經由 6000 秒自然對流實驗得知圖 10 之 T_{c2} 最高是 $51^{\circ}C$ ，符合 T_{c2} 最佳規格 $45^{\circ}C \sim 55^{\circ}C$ 之間，最高亦不超過規格 $85^{\circ}C$ 上限。再經由 T_j 公式計算後，則 T_j 是 $100^{\circ}C$ (圖 11)，

亦未超過 T_j 規格 125°C 。因此，此鋁擠型散熱片還能夠於解 $6\text{W}\times 5$ 顆 LED 的 T_j 溫度。

圖 12 是多晶 LED $25\text{W}\times 3$ 顆的實驗，由於總瓦數以高達 75W ，顯然比前述 30W 更高，已不適合做自然對流實驗，因此採用本研究空調系統強制冷卻多晶片 LED 的構想做 T_{case} 冷卻實驗($V_{\text{avg}}=1.26\text{m/sec}$ ， $Q=10.14\text{CMM}$)，結果成效相當好，將 T_{case} 溫度控制於 55°C 內，未超過 85°C ，而 T_j 計算後，則 T_j 最高是 97°C ，亦未超過 T_j 規格 125°C 。

圖 13 是做多晶 LED $50\text{W}\times 2$ 顆的自然對流實驗，由於此類 LED T_j 溫度是 150°C ，可是經由 T_{case} 實驗後發覺 T_{case} 溫度已超過 85°C ，經 T_j 計算後，果然超出 T_j 規格 150°C 。因此為了 T_j 安全起見， 50W 之上的超高瓦數 LED 於本研究中則一定使用空調系統旁通冷卻法散熱多晶片 LED，避免 LED 晶片 T_j 損毀。

圖 14 實驗的瓦數高於圖 13 實驗的瓦數，為了避免 T_{case} 和 T_j 溫度過高而損毀，所以一開始則應用本研究方法做強制冷卻多晶 LED $60\text{W}\times 2$ 顆的實驗($V_{\text{avg}}=1.43\text{m/sec}$ ， $Q=10.2\text{CMM}$)研究，結果很明顯的達到冷卻散熱效果， T_{case} 為 60°C 未超過規格 85°C 上限， T_j 為 126°C 亦未超過規格 150°C ，很明顯的只要流量流速、材料選擇、散熱方式控制得宜，是可達到 LED 解熱和均熱的成效。

圖 15 是 $100\text{W}\times 1$ 顆 T_{case} 溫度測試實驗和 T_j 溫度計算的結果，實驗方法依然是空調系統強制冷卻法，其速度是 $V_{\text{avg}}=1.4\text{m/sec}$ ，流量是 $Q=10.3\text{CMM}$ ，而 T_{case} 為 71°C 未超過規格 85°C 上限， T_j 為 136°C 亦未超過規格 150°C 。

使用恆溫恆濕機，做環境溫度控制，使溫度隨時間變化，觀察 LED 之散熱能力。結果顯示(圖 16)將環境溫度控制在 $25^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 之間循環， 50W 的 LED 之 T_{case} 溫度可隨之變化，當環境溫度 25°C 時， T_{case} 溫度為 46°C ，環境溫度下降至 15°C 時， T_{case} 溫度為 37°C 。此結果得知，環境溫度變化時，溫差並不會影響散熱能力，而造成效率衰落，壽命減少，循環測試後更可驗證其穩定性， T_{case} 溫度皆維持在 85°C 之下。

由此可知鋁擠型散熱片於自然對流之下，有足夠能力解低瓦數多晶片 LED $6\text{W}\times 5$ 顆。若再適時搭配空調系統旁通冷卻法，則可解決中瓦數、高瓦數、超高瓦數多晶片 LED，使得 T_{case} 和 T_j 會穩定的操作在規格內，而且壽命將會穩定的使用在 $8\sim 10$ 萬小時。因此強制對流冷卻效果佳，可不需要使用到價格昂貴、特殊設計的熱管，也不需要使用水冷、vapor chamber... 等等散熱器，即可達到規格的要求。

表 1 是 $6\text{W}\times 5$ 顆、 $25\text{W}\times 3$ 顆、 $50\text{W}\times 2$ 顆、 $60\text{W}\times 2$ 顆、 $100\text{W}\times 1$ 顆的亮度九宮格測試，即可得知平均值是 $606\sim 2796\text{ Lumens}$ ，已達到照明亮度需求規範，因此可使用於室內外照明，而且具有環保節能效益。表 2 是 LED 平均照度(Lux)，其平均值是 $168\sim 1748\text{ Lux}$ 。

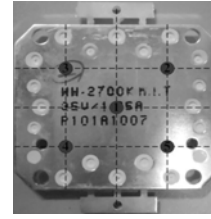


圖 8.LED 背面固定 T-type Thermocouple 線位置圖

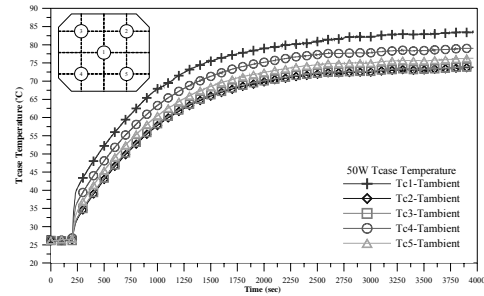


圖 9.LED 背面 5 點溫度曲線

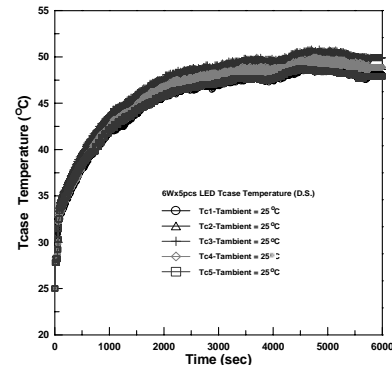


圖 10.6W x 5 顆 T_{case} 溫度測試(自然對流)

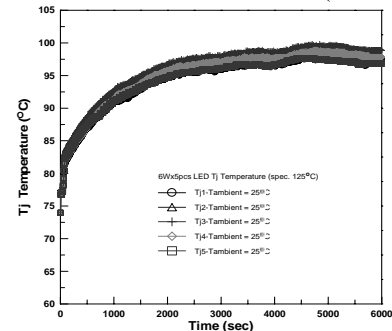


圖 11.6W x 5 顆 T_j 溫度計算(自然對流)

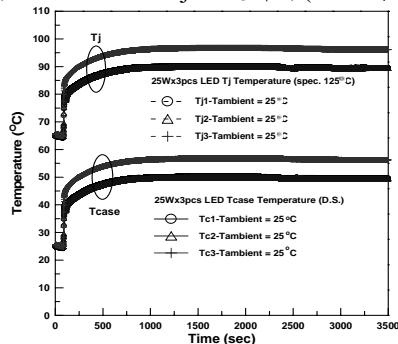


圖 12.25W x 3 顆 T_{case} 溫度測試及 T_j 溫度計算
($V_{\text{avg}}=1.26\text{m/sec}$ ， $Q=10.14\text{CMM}$)

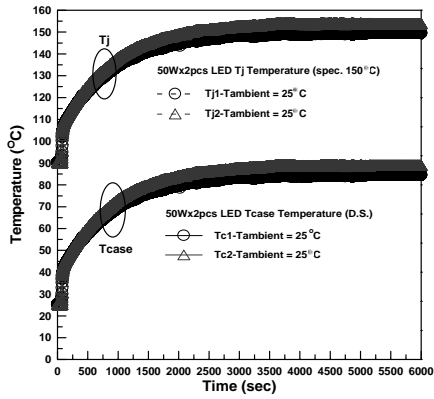


圖 13.50W x 2 顆 Tcase 溫度測試及 Tj 溫度計算
(自然對流)

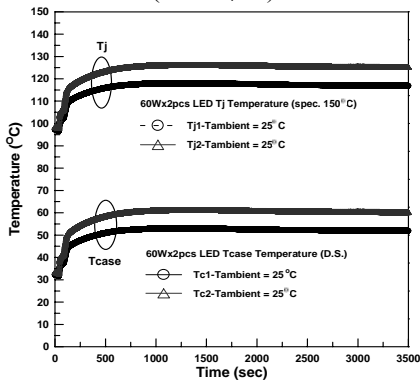


圖 14.60W x 2 顆 Tcase 溫度測試及 Tj 溫度計算
(Vavg.=1.43m/sec, Q=10.2 CMM)

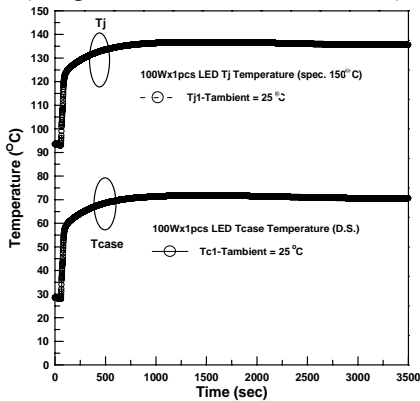


圖 15.100W x 1 顆 Tcase 溫度測試及 Tj 溫度計算
(Vavg.=1.4m/sec, Q=10.3 CMM)

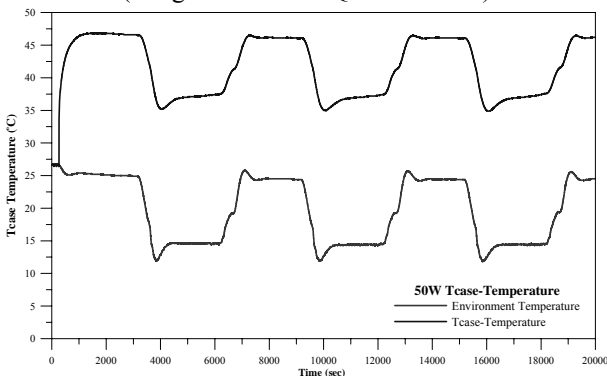


圖 16. 50W Tcase 動態測試

表 1. LED 平均流明數(Lumens)

瓦數	數量	平均流明數
6W	5	606 lumens
25W	3	1431 lumens
50W	2	1770 lumens
60W	2	2781 lumens
100W	1	2796 lumens

表 2. LED 平均照度(Lux)

瓦數	數量	照度
6W	1	168Lux
9W	1	275Lux
16W	1	617Lux
25W	1	755Lux
50W	1	1403Lux
60W	1	1748Lux

6. 結論

經由高散熱之鋁擠型散熱片搭配空調系統旁通冷卻法實驗,可有效的達熱傳效果。因此依據實驗結果,綜合幾項結論:

1. 實驗中的 Tcase 溫度可計算出晶片 Tj 溫度,且隨著輸入瓦數增加,而 Tj 溫度亦升高,故需做解熱對策。
2. 從 6Wx5 顆 LED 實驗得知,在中央位置 LED 溫度較高,兩側漸低 2°C,最外側則比中央 LED 溫度較低 3°C~4°C,則呈現向左右兩側漸擴散之逐漸外移散熱分布。
3. 另外實驗中發覺銅/鋁金屬基板散熱較佳,而傳統 PCB 因為傳導性能低(<10W/m_K),較不適用於高瓦數 LED 使用。
4. 空調系統旁通強制冷卻法實驗(25W x 3 顆、60W x 2 顆、100W x 1 顆)結果證實,其溫度符合 Tj 規格 125°C 和 150°C 以內。Tcase 溫度也低於 85°C。
5. 亮度測試也都符合室內照明規範至少流明數是 500 Lumens。
6. 運用恆溫恆濕機做不同溫度下之測試,驗證 25°C~15°C 環境溫度下,依然 Tcase 溫度也低於 85°C,可以正常操作。
7. 當溫度做循環控制,如同室內環境溫度變化,結果證實 LED 可承受室內溫差變化,Tcase 溫度也低於 85°C。
8. 最後本研究分析顯示,可將成果依不同瓦數等級重新定義區分 LED 的分類,因此分類為低瓦數是 ≤ 10W; 中瓦數是 10W~30W; 高瓦數是 30W~50W; 超高瓦數是 ≥ 50W。因為 LED 瓦數設計和製程技術已越來越高,已可以隨著客製化做開發,未來勢必更需要做解熱法的深入探究。

7. 誌謝

本研究為國科會小產學研究計畫 NSC 101-2622-E-167-014-CC3 之經費補助,以及捷利科技股份有限公司的支持,使本計畫得以順利進行,特此

致上感謝之意。

8. 參考文獻

1. Mehmet Arik, James Petroski, and Stanton Weaver, "Thermal Challenges in the Future Generation Solid State Lighting Applications: Light Emitting Diodes," Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp. 113-120, 2002.
2. David W. Vandepol and James K. Tierney, "Free Convection Heat Transfer from Vertical Fin-Arrays," IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging, Vol. PHP-10, No. 4, pp. 267 - 271, December, 1974.
3. Robert and Karlicek, "High Power LED Packaging," IEEE Conference on Lasers & Electro Optics(CLEO), Vol. 1, pp. 337 - 339, 2005.
4. Kuan Chun Chen, Y. K. Su, C. L. Lin, Yu-Hsuan Lu, Wen-Ling Li, Ricky W. Chuang, Jin-Quan Huang, and Shi-Ming Chen, "Thermal Management and Novel Package Design of High Power Light-Emitting Diodes," Electronic Components and Technology Conference, pp.795 - 797, 2008.
5. Dongmei Li, G. Q Zhang, Kailin Pan, Xiaosong Ma, Lei Liu, and Jinxue Cao, "Numerical Simulation on Heat Pipe for High Power LED Multi-Chip Module Packaging," International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT HDP), pp. 393-397, 2009.
6. Ji Cheng Lin and Kuo Ning Chiang, "Thermal Mechanical Analysis of Novel C-TSOP Using Nonlinear FEM Method," Int'l Symp on Electronic Materials & Packaging, pp. 371-377, 2000.
7. Mehmet Arik, Charles Becker, Stanton Weaver, and James Petroski, "Thermal Managment of LEDs package to system," Third International Conference on Solid State Lighting, Proc.of SPIE, Vol. 5187, pp. 64-75, 2004.
8. Liulin Yuan, Sheng Liu, Mingxiang Chen, and Xiaobing Luo, "Thermal Analysis of High Power LED Array Packaging with Microchannel Cooler," IEEE, pp. 1-5, 2006.
9. Xiaobing Luo, Wei Xiong, Ting Cheng, and Sheng Liu, "Design and Optimization of Horizontally-located Plate Fin Heat Sink for High Power LED Street Lamps," 2009 IEEE, 2009 Electronic Components and Technology Conference, pp. 854-859, 2009.
10. Rathin Mandal, Mui Yc, and Zhang Hengyun, "Effect of Intergrated Heat Spreader on Thermal Performance and Bump Joint Reliability for Flip Chip Packages," IEEE, pp. 786-792, 2008.
11. Ankur Jain, Robert E. Jones, Ritwik Chatterjee, and Scott Pozder, "Analytical and Numerical Modeling of the Thermal Performance of Three Dimensional Integrated Circuits," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 33, Issues 1, pp. 56-63, 2009.
12. Kai Shing Yang, Yu Lieh Wu, Ing Young Chen, and Chi Chuan Wang, "An Investigation of Thermal Spreading Device with Thermal via in High Power LEDs," IEEE, pp. 195-198, 2009.
13. Adam Christensen, and Samuel Graham, "Thermal Effects in Packaging High Power Light Emitting Diode Arrays," Applied Thermal Engineering, Vol. 29, Issues 2-3, pp. 364-371, 2009.
14. Bohan Yan, Jiun Pyng You, Nguyen T. Tran, Yongzhi He, and Frank G. Shi, "Influence of Die Attach Layer on Thermal Performance of High Power Light Emitting Diodes," IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Issue 99, pp. 1-6, 2009.
15. Liuxi Tan, Jia Li, Kai Wang, and Sheng Liu, "Effects of Defects on the Thermal and Optical Performance of High-Brightness Light-Emitting Diodes," IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING, Vol. 32, No. 4, pp. 233-240, 2009.
16. 陳昭宇, 高亮度 LED 吸頂燈具之散熱研究, 長庚大學/機械工程研究所/96/碩士。
17. 鍾正發, 高功率發光二極體熱傳途徑分析研究, 國立中山大學/機械與機電工程學系研究所/95/碩士。
18. 黃嘉勝, 陣列式高功率 LED 均勻散熱研究, 和春技術學院/電機工程研究所/97/碩士。
19. 黃政德, 以 EHD 技術增加 LED 散熱效率之研究, 國立清華大學/動力機械工程學系/93/碩士。
20. 呂宗蔚, 高亮度 LED 散熱系統之熱傳及效益研究, 國立成功大學/工程科學系碩士/95/碩士。
21. 吳智敏, 高功率 LED 散熱模組之效益研究, 中華大學/機械工程學系碩班/98/碩士。
22. 陳重典, LED 散熱模組性能實驗與熱流場數值模擬, 國立臺灣海洋大學/機械與機電工程學系/97/碩士。
23. 陳俊宏, LED 構裝體之熱分析與量測, 長庚大學/機械工程研究所/92/碩士。
24. 陳宣甫, 多晶片 LED 構裝體之熱和光場分析與量測, 長庚大學/機械工程研究所/97/碩士。
25. 康智勝, 高功率 LED 構裝體與其模組之熱阻分析與量測, 長庚大學/機械工程研究所/95/碩士。
26. 黃翔聖, 自然對流增強散熱模組應用於高功率 LED 燈之研究, 國立臺灣大學/機械工程學研究所/97/博士。
27. 李東哲, 散熱鰭片幾何尺寸對高功率 LED 模組熱傳性能之研究, 中原大學/機械工程研究所/95/碩士。
28. 蕭啟宏, 不同幾何造型散熱器應用在 LED 散熱之研究, 國立高雄應用科技大學/模具工程系碩士班/96/碩士。
29. 陳少宇, LED 模組之熱分析, 國立成功大學/工程科學系碩博士班/94/碩士。
30. 陳建欣, 高功率 LED 熱效應之研究, 和春技術學院/電機工程研究所/97/碩士。
31. 葉建男, 大功率 LED 散熱系統研究, 義守大學/機械與自動化工程學系碩士班/99/碩士。
32. 譚學怡, 散熱座的材質與形狀對高功率 LED 嵌燈散熱效果之研究, 中原大學/機械工程研究所/97/碩士。
33. 陳漢和, 陶瓷燈具內高功率 LED 散熱基板形狀之熱傳分析, 中原大學/機械工程研究所/97/碩士。
34. 陳楨鈺, 發光二極體最佳化散熱模組研究, 元智大學/機械工程學系/96/碩士。