LED 燈具主動式散熱最佳化研究

王鎮雄

南亞技術學院機械工程系

摘要

LED 是靠電子躍遷通在能帶與電洞的輻射複合產生光子，LED 因為非輻射複合產生的熱能並不會達到非常高的溫度(目前市面上 LED 產品 junction temperature 最高溫仍不能超過 200℃)，故 LED 僅有微量熱能可靠熱輻射散出。因此 LED 雖被稱為冷光源，但現階段其中大部分的輸入電能卻仍轉化成熱能。若 LED 的熱能無法散逸出晶片內部，其所造成之溫升將會加速晶片的老化，最終即導致晶片失效。要降低 LED 溫度，必須盡可能降低熱阻，為保障 LED 的使用壽命，散熱能力成為關鍵的技術。此模型係以 5W AC LED 封裝元件搭配散熱塊結構之架構圖如下：原始圖檔為 sat 檔、即 Solid Works 之檔案，而本研究所使用的軟體為 COMSOL Multiphysics，此軟體最大的特色是能建構並模擬任何單一物理現象，或是任意物理現象的耦合。模型以 5W AC LED 封裝元件搭配散熱塊結構進行散熱特性分析，搭配不同散熱片的結構以分析其散熱效果。比較降低元件溫度之能力，發現使用新設計的散熱片其晶片溫度可以降低比例最多。

關鍵字：發光二極體，熱阻，接面溫度。

Email：wjhsiung@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070#6204　Fax：03-4384670

STUDY ON OPTIMIZATION FOR ACTIVE HEAT DISSIPATION OF LED LAMP

Jenn-Hsiung Wang

Department of Mechanical Engineering,

Nanya Institute of Technology, Taoyuan, Taiwan.

Abstract

LED is one device that can emit photons by means of the radiative recombination of electrons and holes between the energy gap, and the residual heat energy is produced by the non-radiative recombination of electrons and holes. For low power LED, the junction temperature is usually low, so the heat dissipating problem is not important. But the thermal issue for high power LED will become more important. There are most input electrical power transferred into the heat energy in LED, it will lead the failure of chip when the heat cannot be dissipated from LED. If we want to decrease the junction temperature of LED, the thermal resistance have to be dropped first. In order to ensure the lifetime of LED, the heat dissipating abality is a key technology. This model is a “5W AC LED packaging device” and attached with heat sink, as described below: The original model was drawn by the software “Solid Works” (.sat file), it can be transferred into the simulating software “COMSOL Multiphysics” to progress the numerical simulation. The COMSOL Multiphysics can simulate a single physical phenomenon or a coupling physical phenomena. The model uses 5W AC LED package components with heat sink structure to analyze the heat dissipation characteristics, and compares the heat dissipation effects of different heat sinks. Comparing the performance for decreasing the temperature of component, the new design of the heat sink will cause that the temperature of chip can be reduced obviously.

Key Words: LED, thermal resistance, junction temperature.

Email：wjhsiung@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070#6204　Fax：03-4384670

壹、前言

全球暖化情況以及全球能源短缺嚴重，使得如何減少碳排放量、節省能源等能源問題成為全球各界共同努力的目標，對於現有能源的妥善運用以及新能源（綠能）的開發皆為刻不容緩之議題。我國政府亦相當重視此一課題，2007 年度產業科技策略會議（SRB）提出三大科技議題：「節約能源」、「再生能源」及「前瞻能源」，期望結合我國現有優勢產業，帶動相關產業的發展，達到環境永續經營之目的。因此，各種電器產品設計與運作時皆必須考慮耗能及效率等重要因素。目前用於照明設備的電能約佔 21%的總電能，而電能又佔總能源使用量的一半，所以現今耗用於照明的能源約佔能源總使用量的 10%。以技術分析而論，照明設備在降低耗能之比例上將超越其他許多電器產品所能減少的部分，其中尤以近年來已積極跨入照明領域的發光二極體（Light-Emitting Diode, LED）科技與產業特別呈現出其發展的潛力。

發光二極體(Light Emitting Diodes，LED)是由半導體材料所製造成之發光元件，元件由電極端子施加電壓後通過一小電流，利用電子電洞對結合造成輻射複合，其能量以光的形式發射。但非輻射複合及部分光能受到材料吸收及折射率等因素影響，並無法順利以光能離開，而將轉換為熱的形式散逸出LED。要延續發光二極體的壽命的話,熱管理為其中重要因素之一，介面溫度越低可以使發光二極體的壽命越優異。而欲降低LED的接面溫度(junction temperature)，必須從晶片、封裝結構及外部模組等方面來進行研究與改進。另外台灣有很好的LED產業上下游結構，故政府把LED列為優先發展之能源產業。拓墣產業研究所2010年8月發表報告指出，LED燈泡成本到2016年時，可望從2009年的25美元降至3.7美元，降幅高達85%，2017年起將主導整個照明燈泡市場 [1]。

以一般現今市售的高功率(350mA)LED 為例，其發光效率為 70 lm/W，由表1 [2]得知，當給予LED一額定輸入功率時，有79%電能轉換成熱能，只有21%電能轉換成光。其中，大部分熱能主要是焦耳熱及非輻射複合所轉換來的，這是由於晶片在效率轉換的不完善，使得能量不是轉換成光而是以熱能的形式散失。

表 1

lm/w	Resistive Losses	Nonradiative InGaN	Optical Absorption - Blue	Visible Radiation - Blue	Photon Down - Conversion	Nonradiative - Phosphor	Optical Absorption - White	Visible Radiation - White
70	19%	41%	6%	34%	7%	1%	5%	21%
90	10%	9%	12%	69%	14%	3%	5%	47%

一種新式的高功率發光二極體被開發出來做為在高功率的驅動下解決受到高電流的注入而產生的熱效應。2010 年，晶元光電開發出一種將多顆 LED 晶粒透過串聯陣列的方式，組成一塊 1.1 mm×1.1 mm 的 GaN 晶片，發光效率可達 162 lm/W [3]。此種結構因為是多顆晶粒的串聯，故在驅動時必須施以高的電壓才能導通，也因此稱之為高電壓發光二極體(High Voltage Light Emitting Diode, HV LED)。也可以依照不同的輸入電壓，決定不同串聯晶粒的數量。HV LED 不僅能將家用交流電源透過外接全波整流器來驅動，也可以利用直流電來驅動，應用的範圍相當的彈性。而高壓發光二極體的晶片的效率比一般在正負半週轉換的 AC LED 要高。也因為 HV LED 高電壓的特性，使得在相同電功率輸入時，相對於傳統的 DC LED 晶片結構而言，可降低流過 HV LED 每塊微晶粒之電流，也因為 HV LED 小電流、多微晶粒的設計，因此可提高電流分布的均勻性。

發光二極體的開發上，研究主題大致被區分為數個特定技術領域中進行研究[4,5]。這些技術領取主要包括：光學特性、材料特性、電學特性、熱議題及應力等。在LED發熱與散熱的技術領域方面，元件製造與封裝後的熱應力和晶片及燈具使用上之熱管理議題是特別需要注意的。例如能夠在磊晶或元件製程中進行有效的熱補償 [6]及使元件封裝後能具有高效率散熱能力為兩個重要的技術關鍵。LED封裝之議題上，設計良好的散熱方式即可降低晶片的工作溫度並藉此提高LED元件的發光效率及進一步加大輸入功率。因此目前已有許多LED之相關研究關注在這個問題上 [7-14]。

LED將為今後之照明主流，而其晶片發熱問題對於LED之各項特性具有極大的影響，故LED散熱及封裝技術之改良，將成為LED廠商努力的方向。故本研究利用有限元素模擬分析的方式，針對市售AC LED封裝模組與週遭環境之散熱方式加以模擬分析，並進行實驗比對。再利用確認正確之數值模型來設計降低封裝熱阻之新型散熱機構進行深入的探討，以作為AC LED元件設計時參考的指標與依據。期能協助LED相關產業發展AC LED應用產品主動式散熱最佳化之研究，在本研究中除了配合有限元素軟體COMSOL的數值模擬進行元件封裝設計與製程方面之熱管理分析之外，並藉由晶片接面溫度量測與熱阻實驗提高數值模擬的正確參數，以使後續之LED元件及散熱機構乃至燈具設計具有最佳性能。

貳、理論模型與數值方法

一、基礎理論

(一) 熱傳理論

熱量傳導方式有三種型式，其原理分述如下：

A. 熱傳導(conduction)原理 (如下圖 1 所示)

若物體內存在溫度梯度，能量由高溫傳向低溫，此種能量傳遞之形式稱為熱傳導。熱傳導的數學模型為傅立葉定律(Fourier's law)，該定律指出單位面積的熱量傳遞速率與溫度梯度大小成正比，即下式(1)

$$q = -kA\frac{dT}{dx} \tag{1}$$

其中，q 為熱傳量、k 為導熱性(thermal conductivity)、A 為截面積，T 為溫度。

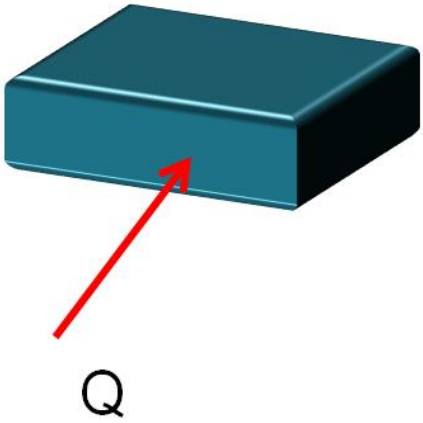


圖 1. 熱傳導示意圖

B. 熱對流(convection)原理(如下圖 2 所示)

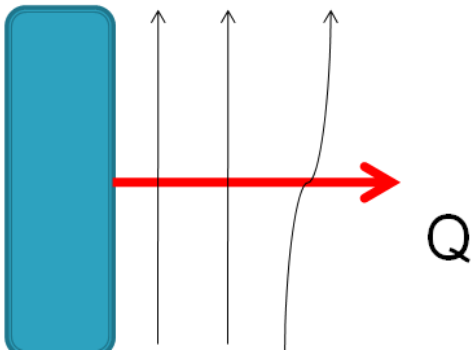


圖 2. 熱對流示意圖

對流由流體本身的巨觀運動，造成流動的機制可分為自由對流與強制對流。下列數學式(2)為物質表面單位面積的熱傳導速率，正比於物質表面與遠處流體的溫度差，即

$$q=hA(T_S-T_\infty) \tag{2}$$

其中 h 為熱對流係數。

C. 熱輻射(thermal radiation)原理(如下圖 3 所示)

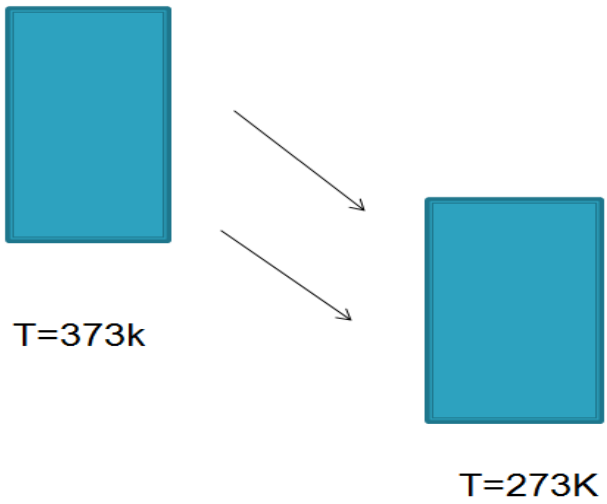


圖 3. 熱輻射示意圖

物質不須由介質傳導，而利用電磁波傳遞能量，此種能量形式稱為輻射。數學模型係根據 Stefan-Boltzmann Law，式(3)即物體表面單位面積 A 由輻射出的最大輻射熱與絕對溫度 4 次方成正比

$$q=\varepsilon A\sigma T^4 \tag{3}$$

其中 ε 為發射率(thermal diffusivity)，σ 為史蒂芬．波茲曼常數(Stefan-Boltzmann constant)。

二、LED 散熱理論

若LED的熱能無法散逸出晶片內部，其所造成之溫升將會加速晶片的老化，最終即導致晶片失效。而晶片的接面溫度（Tj）可由下式(4)算出：

$$T_j = T_a + R_{ja} \times P \tag{4}$$

其中 T_a 為環境溫度(℃)、R_{ja} 為接面至空氣間之熱阻(℃/W)、P 則為熱散逸功率(W)。由式(4)可以看出要降低 LED 溫度，必須盡可能降低熱阻，為保障 LED 的使用壽命，散熱能力成為關鍵的技術。

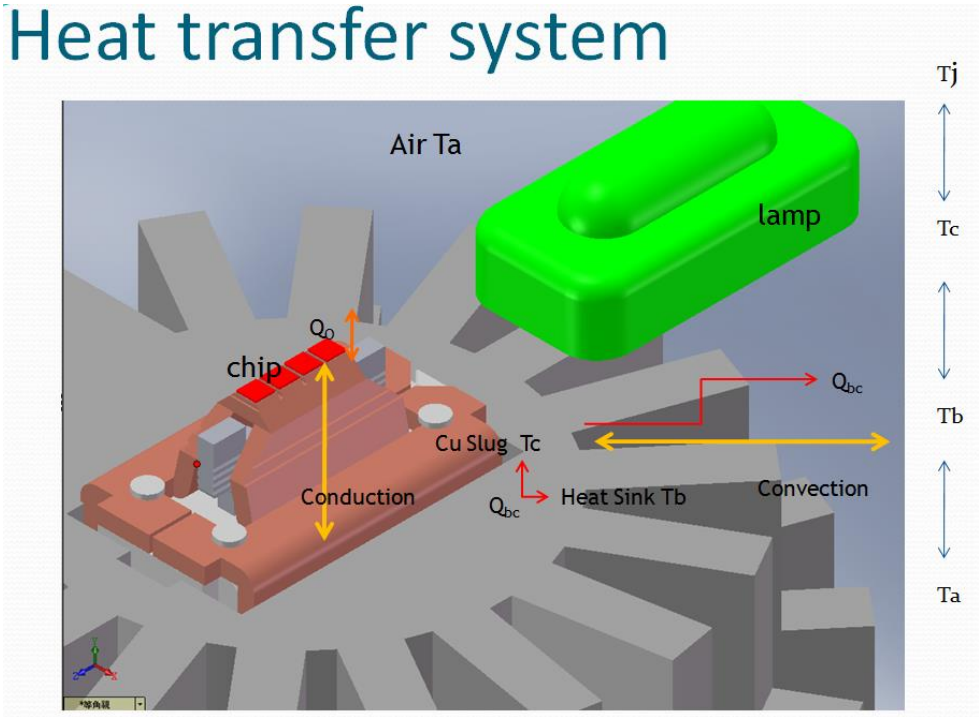


圖 4. LED 熱傳遞系統示意圖

本研究分析之AC LED模型如圖4所示，熱由下途徑散出之方式為：

LED晶片(chip)→LED底座(Tm) →散熱片(Tb)→外部空氣(Ta)

其中熱從chip到散熱片之機制為熱傳導，而散熱片傳熱到外部空氣則以熱對流方式進行，能量由LED晶片傳遞至LED底座(Tm)與LED封裝設計技術有關，LED底座(Tm) →散熱裝置(Tb)→外部空氣(Ta)則與散熱機構(燈具)設計有關。COMSOL Multiphysics能建構並模擬任何單一物理現象，或是任意物理現象的耦合，故可利用此一軟體來分析物理耦合狀態。

參、數值模擬程序與實驗量測設備

COMSOL Multiphysics 模擬分析流程可分為：

一、 幾何繪圖 – (Draw mode)

二、 邊界條件設定 – (Boundary mode)

三、 PDE 係數項設定、材料屬性設定 –(Subdomain mode)

四、 產生網格 –(Mesh mode)

五、 求解 (含初始值、solver 參數設定) –(Solve mode)

六、 解的具像化、動畫、輸出 –(Post mode)

七、 參數分析 –(Parametric analysis)

使用材料導熱性(thermal conductivity)如表 2 所示：

表 2 相關物質參數表

	Thermal conductivity (W/m · K)	**C_p (J/kg · K)**	**density (kg/m^3)**
LED Chip	30		
Lead free solder	20		
Cu Slug	380	385	8700
Steel(LED 電極接腳)	51.9		7800
Silicone Rubber	0.4		
Thermal Grease	1		
Heat-Sink(Al)	180		

本研究之元件構造較為複雜，若使用 COMSOL Multiphysics 的內建繪圖功能將不易繪製出完整結構，故先以 Solidworks 繪圖軟體繪製元件結構，即原始圖檔為 sat 檔案格式；COMSOL Multiphysics 軟體可以搭配其他繪圖軟體繪製之 CAD 圖進入耦合。首先必須把圖檔由 sat 檔轉成 IGES 檔，再匯入 COMSOL Multiphysics。由於轉入時圖形幾何的因素，在取網格時可能會造成幾何內部問題(即無法使網格結構化)，此時必須做適當修正。首先利用 COMSOL Multiphysics 的功能，建立對偶減少誤差(如圖 5 所示)，如此取網格時才不會出現問題。

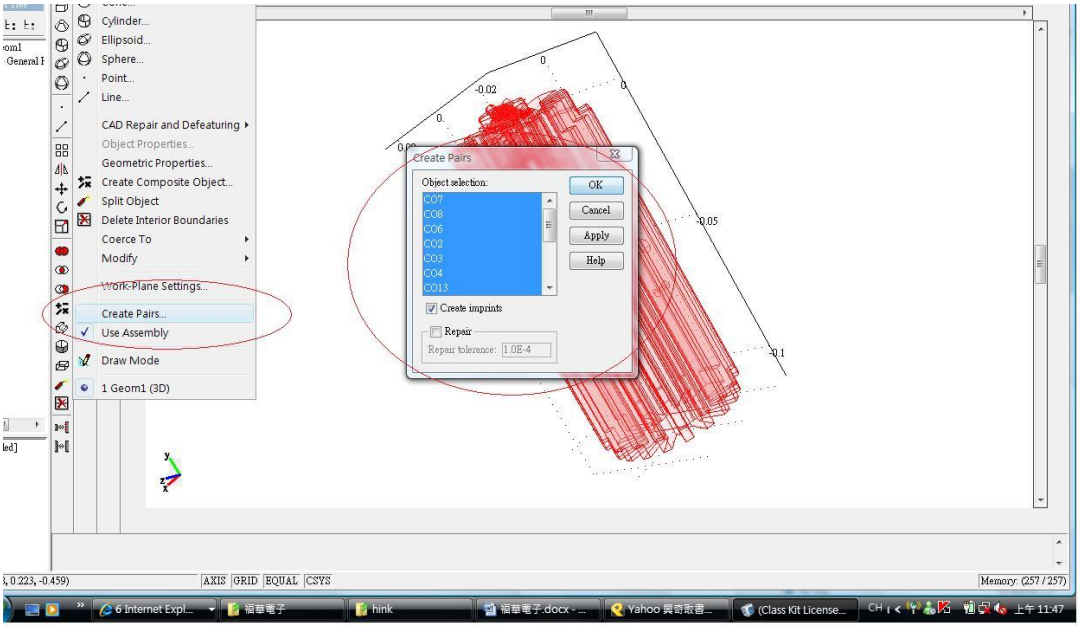


圖 5. 建立 COMSOL 模型

因 LED 大約有 10%轉換成光能,其餘為熱的形式故輸入熱之大小則是依照電源供應器所顯示電流與電壓乘積之 90%設定，即 $q = I \times V \times 0.9$；單位體積生產的熱為 q_v=q/volume。

圖 6 則為本研究依據 EIA/JEDEC 標準中 EIA/JESD51-2 [15]IC 半導體元件之檢測規範所架設之 LED 溫度量測設備，使用此設備搭配熱電偶及相關電腦擷取資料之設備，可完整記錄所需各點之溫度資料值，以作為本數值模擬模型所求得數據之正確性驗證。

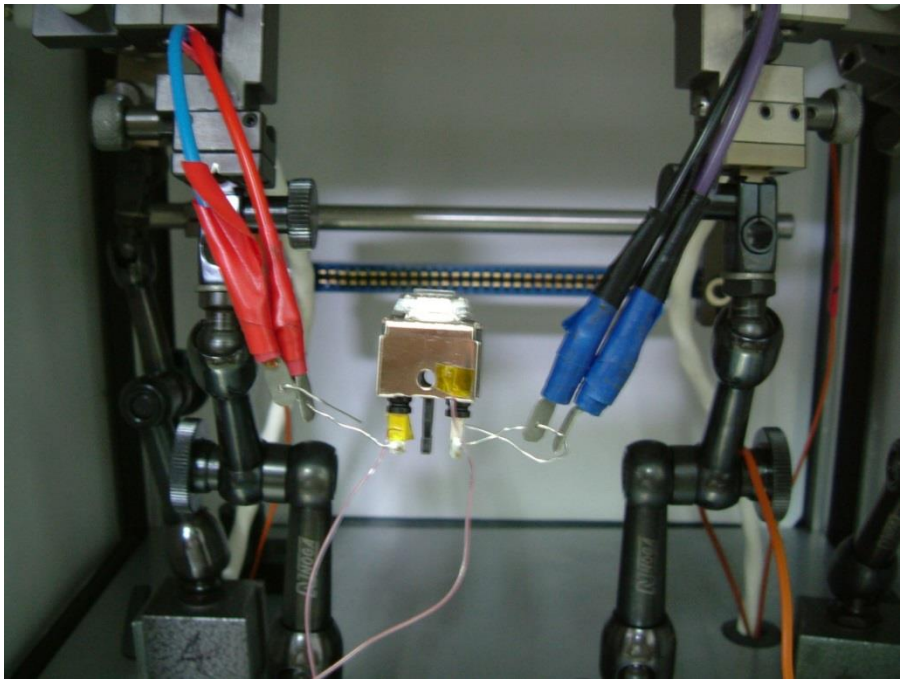


圖 6. 本研究使用之 LED 溫度量測設備

肆、結果與討論

一、AC LED 元件之數值模擬驗證

數值模型以 5W AC LED 封裝元件分別在無散熱塊結構與有散熱塊結構之兩情形下加以分析，其中無散熱塊之架構圖如圖 7 所示：

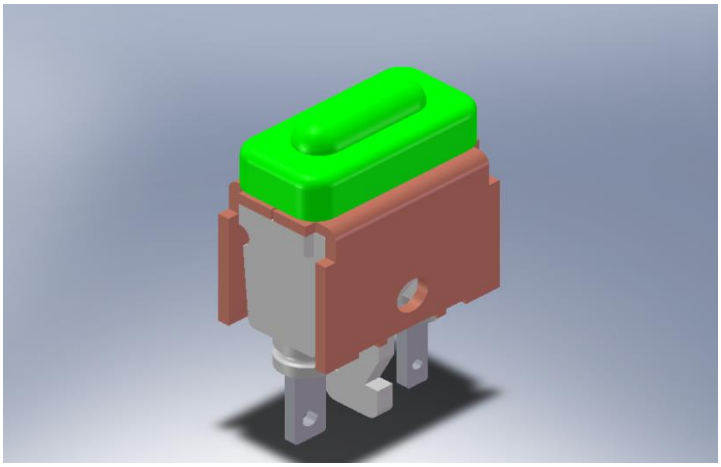
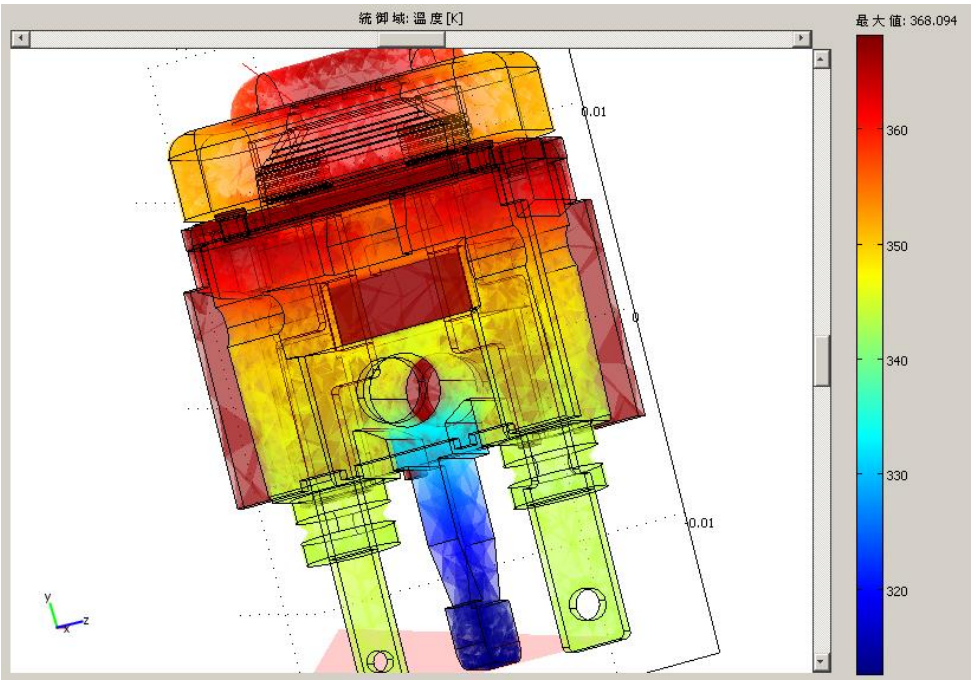


圖 7. 不含散熱塊結構之 5W ACLED 元件示意圖

將上列元件經由 COMSOL Multiphysics 模擬運算後(h =10 W/m2・℃，環境溫度 32℃)，可得圖 8 之溫度分布結果，最高溫度發生於晶片位置約 95.1℃(368.1K)，

接腳溫度則約為 71 ℃(344K)。



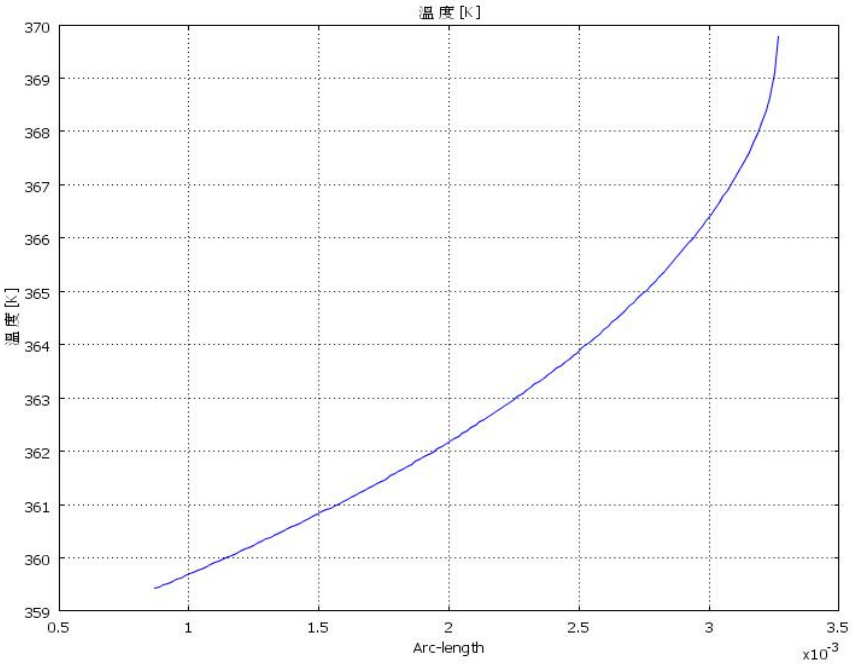


圖 8. COMSOL Multiphysics 運算後之溫度分布結果

實驗量測結果進行前需先對此 LED 製作 K factor，分別以三組小電流，1 mA、3 mA 及 5 mA 進行測試，其結果如圖 9 所示。

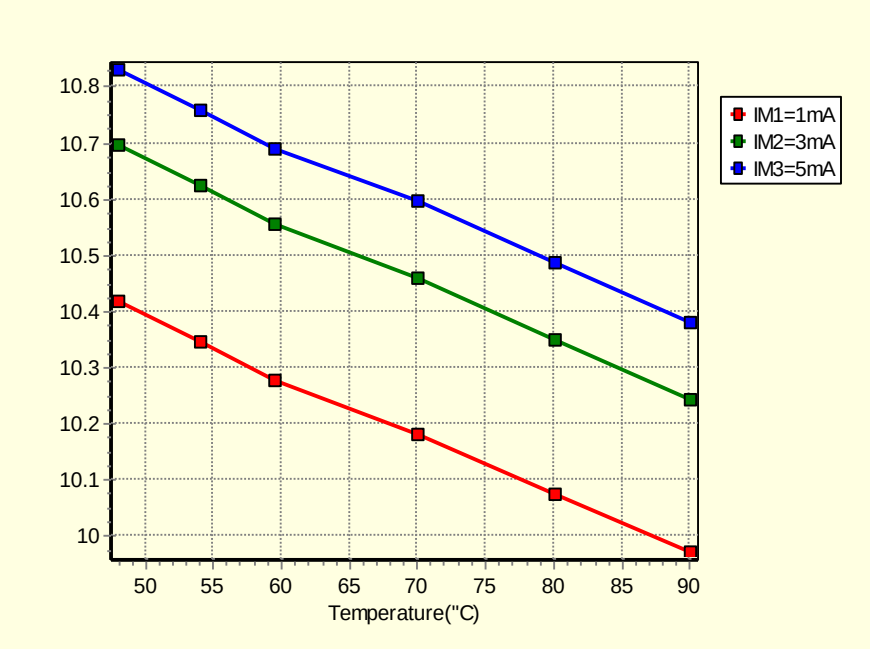


圖 9. 實驗 K factor 之製作結果

接著以此設備量測 LED 各點溫度,分別為 Tj：接面溫度、TL：接腳溫度、TB：銅片溫度及 TA：環境溫度，量測結果如圖 10 所示。

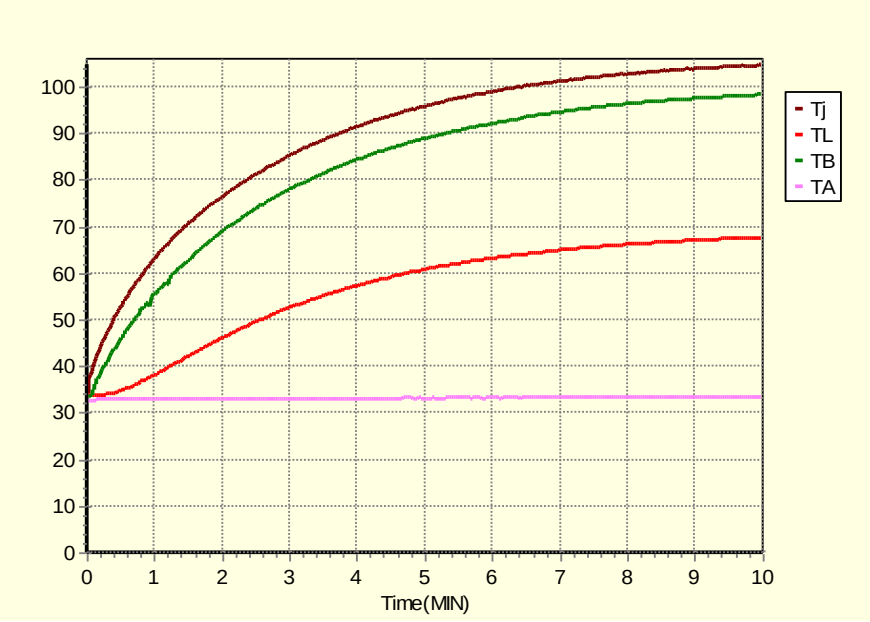


圖 10. LED 各點溫度量測結果

此熱分析模擬結果配合實驗量測比對，實驗量測所得的晶片溫度為 104℃；及接腳溫度則量測得 67℃，在 LED 溫度變化呈現穩定現象時(啟動 10 分鐘後)，驗證熱分析模擬之準確度，發現其準確度達 9 成以上，且誤差低於 10%，在可接受範圍之內，故確認本研究進行之熱模擬分析有相當高的可信度。

二、設計散熱結構之數值模擬

藉由本研究所建立之數學模型，可對於散熱結構進行新設計來計算降低 LED 元件之溫度為若干。A 型的結構設計如圖 11 之鰭狀散熱片。

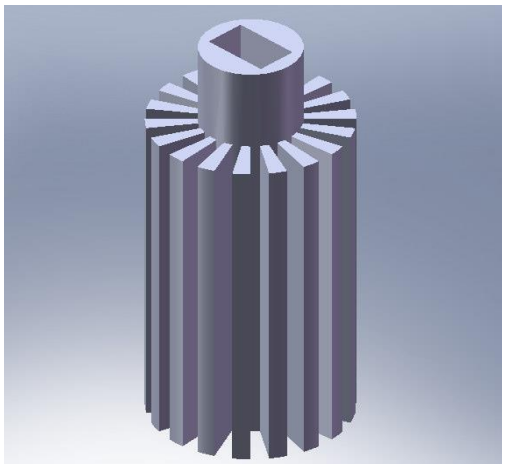


圖 11. 新設計之鰭狀散熱片(A 型)

將 LED 元件耦合進入鰭狀散熱片之後再進行模擬，如圖 12 所示。

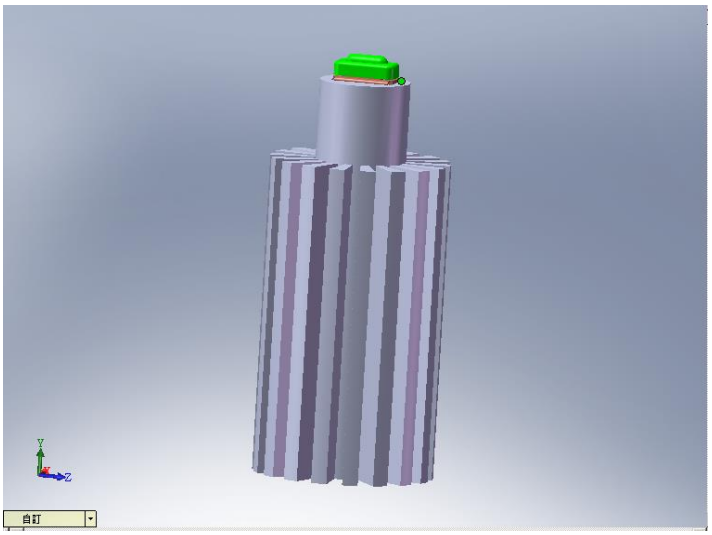


圖 12. LED 元件耦合散熱鰭片之情形

圖 12 耦合新型散熱片的 LED 元件經數值模擬可得其運算結果如圖 13 所示。在 h =10 W/m^2・℃，環境氣溫 25℃，5W 功率操作時，晶片最高溫僅達約 41℃(314 K)，大幅降低 LED 晶片之操作溫度。

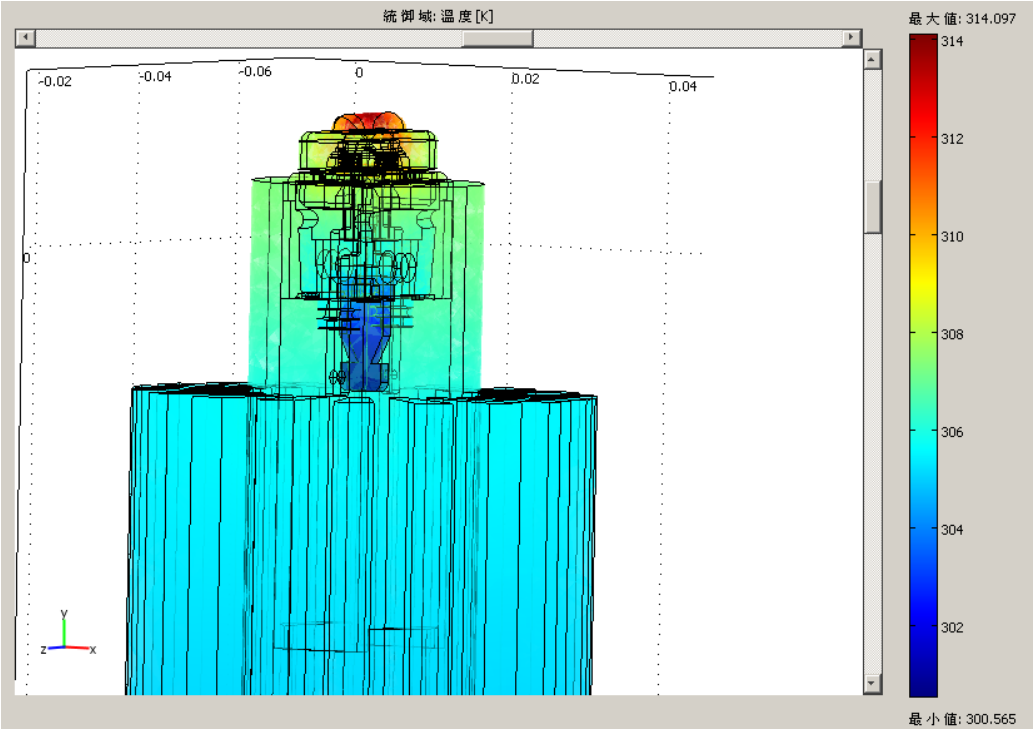


圖 13. 耦合新型散熱片的 LED 元件數值模擬結果

另外以 B 型設計完整燈具之模型(如圖 14)加入 LED 元件後進行模擬，可得如圖 15 之溫度分布結果。同樣在 h =10 W/m^2・℃，環境氣溫 25℃，但以 10W 功率操作條件下，晶片最高溫度約為 62.833℃，已屬 LED 運作之理想範圍內。

圖 14. 設計完整燈具之模型(B 型)

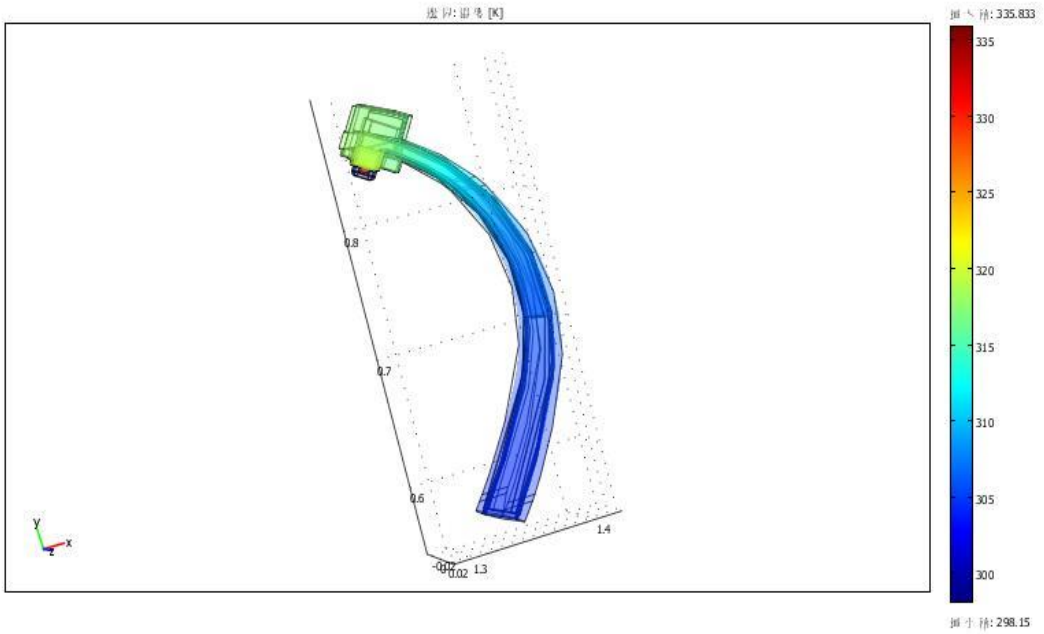


圖 15. 完整燈具之模型(B 型)之數值模擬結果

五、結論

本研究所得之結論如下表 3 所示，已將各種散熱構造形式所得之結果列舉於表中。藉由本研究所建立的模型，可以在極低誤差下進行新散熱結構之設計。提高 LED 燈具之設計製造效率。

表 3 模擬結果總表

構造形式	最高溫度（℃）	備註
未加裝散熱片 (1.7W)	95.094	104(實驗量測)
A 型散熱裝置 (5W)	41	
B 型完整燈具 (10 W)	62.833	

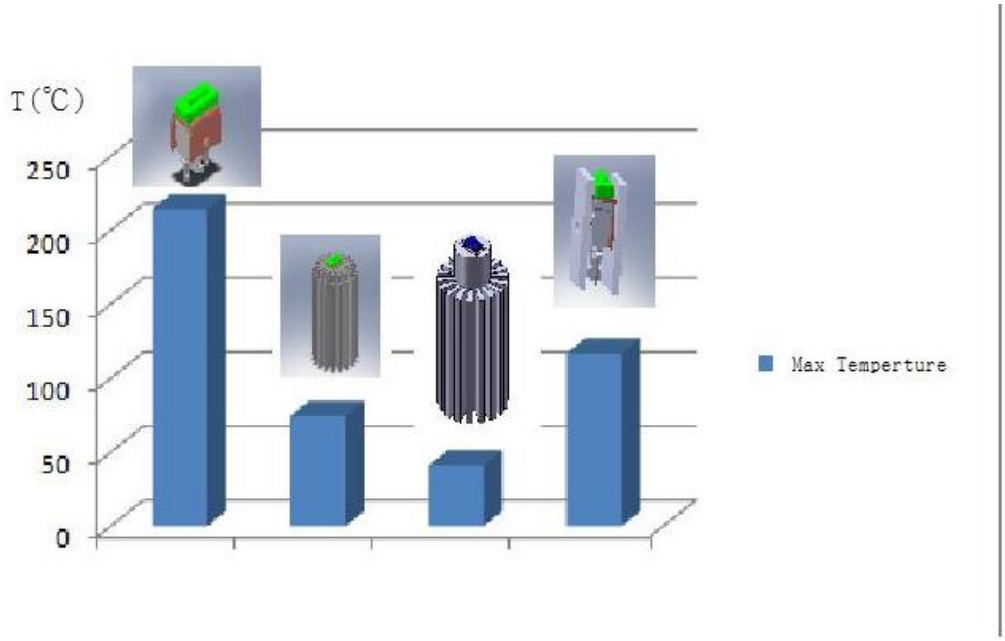


圖 16. 各型散熱結構設計所得之溫度比較圖

本研究使用建立數值模擬模型以 AC LED 封裝元件搭配散熱塊結構進行散熱特性分析，經過實驗驗證後，搭配不同新設計之散熱片的尺寸比較其散熱效果。比較效能以降低元件溫度，以新尺寸的散熱片發現其晶片的溫度可以降低比例最多。在 LED 熱模擬中最關心的因素有兩個，分別為接面溫度(Junction temperature)及熱阻。若有效的降低接面溫度將可大幅提高 LED 發光效能，利用上述圖 16 可清楚比較出不同散熱方式所得之晶片溫度的高低差異，將可作為後續進行燈具設計時的參考。

參考文獻

[1] http://wp168.wordpress.com/

[2] M. R. Krames, O. B. Shchekin, R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, L. Zhou, G. Harbers, and M. G. Craford, *J. of Disp. Technol.*, **3**, 160 (2007).

[3] M. H. Hsieh, “ Technology Trend for Commercializing LED Lighting,” 取自 http://www.digitimes.com.tw/tw/B2B/Seminar/Service/download/0519910050/991005DTF-04.pdf(2010).

[4] OIDA, *An OIDA Technology Roadmap Update* (2002).

[5] J. R. Brodrick and C. E. Christy, “Accelerating the development of next-generation solid-state lighting sources,” *Proc. SPIE* **5530**, 1 (2004).

[6] G. J. Sheu, J. C. Chen, J. Y. Shiu, and C. Hu, “Synthesis of negative thermal expansion TiO_2-doped LAS substrates,” *Scripta Materialia* **53**, 577 (2005).

[7] M. Arik and S. Weaver, “Effect of chip and bonding defects on the junction temperatures of high-brightness light-emitting diodes,” *Opt Eng* 44, 111305-1 (2005).

[8] M. Arik, J. Petroski, and S. Weaver, ASME/IEEE INTERPACK 2001 Conference, Hawaii. (2001).

[9] M. Arik, C. Becker, S. Weaver, and J. Petroski, “Thermal management of LEDs: package to system,” *Proc. SPIE* **5187**, 64 (2004).

[10] F. Wall, P. S. Martin, and G. Harbers, “High-power LED package requirements,” *Proc. SPIE* **5187**, 85 (2004).

[11] 許國君、陳志臣、胡凡勳、鄭健宏，“新世代照明技術：LED元件封裝之熱管理分析,”*光學工程* **第九十期**，69 (2005)。

[12] G. J. Sheu, F. S. Hwu, S. H. Tu, W. T. Chen, J. Y. Chang, and J. C. Chen, “The heat dissipation performance of LED applied a MHP,” *Proc. SPIE* **5941**, 594113 (2005).

[13] F. S. Hwu, G. J. Sheu, and J. C. Chen, “Thermal modeling and performance of LED packaging for illuminating device,” *Proc. SPIE* **6337**, 63371J (2006).

[14] Y. C. Lee, J. C. Chen, F. S. Hwu, G. J. Sheu, W. D. Chen, and J. Y. Chang, “Passive heat dissipation devices for high power LEDs,” *Proc. of the Eighth Chinese Optoelectronics Symposium*, (2006).

[15] EIA/JEDEC Standard: ‘EIA/JESD51-2’ ,Electronic Industries Alliance, Engineering Department, Arlington. (1995).