

LED 固態照明技術的分析與挑戰

Technical Challenge of LED Solid State Lighting

孫慶成

Ching-Cherng Sun

在本文中，筆者介紹 LED 固態照明技術的發展趨勢與可能遇到的瓶頸。在晶片的發展上，內部量子效率在高電流注入的環境下如何能維持高檔，將是材料科技人員的一大挑戰；在封裝上，光電色加上熱管理，全需以封裝後的成品來評價，而且攸關 LED 的照明表現；在光學技術上，我們探討了四階光學設計的概念與其在晶片、封裝、模組以至於燈具上的重要性，同時也探討人因科技在 LED 固態照明的角色。

In this paper, we discuss the development trend and the possible bottleneck of LED solid-state lighting. In the LED chip level, how to maintain the internal quantum efficiency under high current injection is a big challenge for the material engineering. In the package level, the quality in optical, color, electrical and thermal managements are related to the performance in LED lighting. In the optical technique, we introduce the concept of four-level optical design and discuss its role in chip, package, module and fixture levels, respectively. Besides, we also discuss the importance of human factor engineering to the LED lighting.

一、背景介紹

二十一世紀毫無疑問地節能與環保是最受重視的議題，這兩項議題在照明上也深受期待，主要是因為高功率 LED 效能的急速提升，而使得無毒性的固態光源成為最受矚目的下一代節能光源，也因其壽命長與低污染的特性成為人類節能與環保的重要利器，因此 LED 在照明上的發展非常值得期待。

LED 是一種半導體的光電元件，和傳統燈泡或日光燈管比較起來，有體積小、發光效率佳、壽命長、可靠度高、不易破損、無熱輻射及無水銀污染等優點，是節能、環保且安全之光源。據估計，當固態照明取代傳統光源於戶外與室內照明時，將可節省一半的照明電力，其對能源的節省與環境的保

護之潛力無庸置疑，其對於經濟的影響，更是不可忽視，因此 LED 將因其壽命長與低污染的特性成為人類節能與環保的重要利器。除此之外，LED 尚有體積小、色彩豐富飽和與具可靠性的優點，讓照明燈具的設計更具備多方位的新穎性，使得 LED 照明燈具的開發被視為極具潛力的研究議題⁽¹⁾。

過去五年，包括美日韓與我國所構思 LED 的發展路程圖中，顯示在 2012 年達到每瓦輸出 150 流明的發光效率，在 2020 年時達到 200 流明的最終目標。雖然今日在路程圖中，效率的目標約為 80—100 lm/W，但是 Nichia 最近發表實驗室的樣品在 20 mA 的操作電流下已達 249 lm/W 的水準，根據我們的分析，這樣的效率幾乎已達到一個實際的極限，未來的推升空間將會很有限。此外，瓦級 (操作電流為 350 mA) 的發光效率也超過為 160

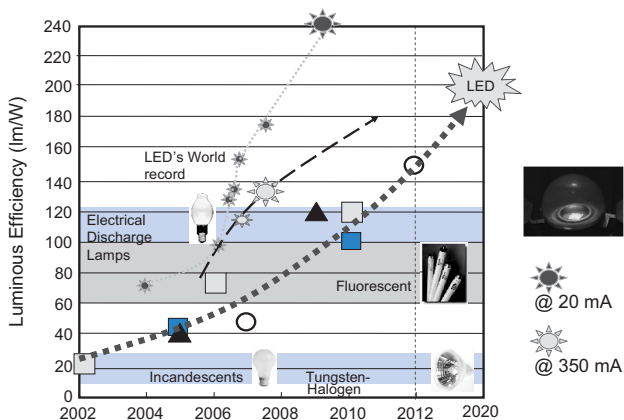


圖 1. LED 發光效率的進展已大幅超越原定時程達數年之多。

lm/W⁽²⁾，商業化的產品在 350 mA 的驅動下亦達 110 lm 以上^(3,4)。台灣國產的 LED 封裝體也可見到約 90 lm/W 的產品。這些效率不斷的提升使得 LED 在發光效率上的路程大幅度的超過三年前的想像，超越的時程已達五年以上(如圖 1 所示)。目前 LED 發光效率的發展已令所有懷疑 LED 用於照明的人士啞口無言，不只如此，OLED 的發展也極為快速，固態綠色照明將是二十一世紀一個重要的新名詞，將永遠影響你我的生活。

二、LED 晶片—高效節能

在 LED 發光效率的快速發展中，可以分為三個層面，分別是內部量子效率 (internal quantum efficiency) 的提升、光萃取效率 (light extraction efficiency) 的提升與螢光粉光色轉換效率 (phosphor conversion efficiency) 的提升。在這三個層面中，

前二者的乘積又稱為外部量子效率 (external quantum efficiency)，是 LED 易於量得的發光效率，其只需將 LED 送入積分球量得其發光功率與輸入的電功率即可換算。然而，外部量子效率雖可說是 LED 本質的能量效率，若要深究 LED 效率的瓶頸，仍需分別檢視內部量子效率與光萃取效率。一般而言，內部量子效率與磊晶 (epitaxy) 的基板 (substrate) 及磊晶的品質有關，由於 LED 的磊晶是以 MOCVD 的方式行之，因此這部分與各家磊晶廠在使用 MOCVD 時所擬定之操作配方 (recipe) 有關，這也牽扯到各家之 know-how。

在光萃取效率方面，主要的著力點在於晶片的幾何外形、界面與表面的粗化或微結構、晶面內外的吸收與封裝的型態等，從磊晶、晶片處理到封裝，各個階段的處理皆可能影響光萃取效率，此時材料的選擇與製作、製程的控制與光學模擬及設計皆是重點。光萃取效率上的學理研究已相當完備，三種封裝晶片型式(如圖 2)與各種晶片處理對於光萃取的影響都已相當清楚(如圖 3)⁽⁵⁻⁸⁾，製程上的發展也相當精實，未來 LED 在邁向照明應用的路途上，晶片的內部量子效率在高電流注入的環境下如何能維持高檔，將是材料科技人員的一大挑戰。此外，在生產上的挑戰更甚於此，由於 LED 磊晶的良率需要以光、電與色來評價，其光電色三維的複雜度遠非一般半導體磊晶只需以電性一個維度評價可以比擬，因此如可提升生產的光電色之一致性，而提升良率與生產線上使用較大晶圓面積以擴大生產的速度及降低成本，將會是各家 LED 磊晶廠共同面臨的巨大挑戰，同時也左右 LED 燈具整體價格，進而影響 LED 正式進入一般照明的時程。

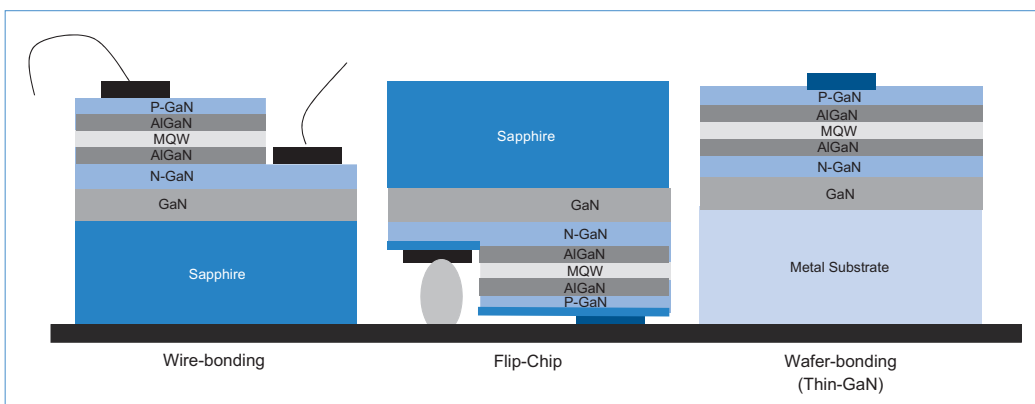


圖 2. 三種因封裝結構而異的晶粒結構。

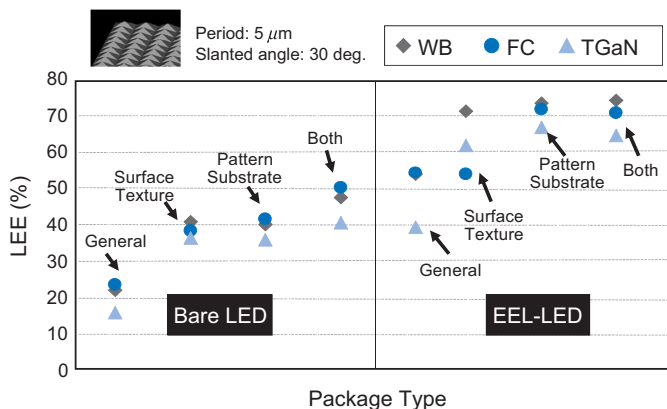


圖 3. 微結構與封裝透鏡對於光學萃取效率的影響，此處的發光界面吸收為 10000/cm；當吸收變為 200/cm 時，其光學萃取效率可達 90%⁽⁸⁾。

三、封裝挑戰—光電色熱

封裝的重要性與晶片不相上下，因為光電色再加上熱管理，這些關於 LED 的表現全須以封裝後的成品來評價，其中的光與色更攸關 LED 的照明表現，電方面與節能及方便性相關，而熱則是能量不滅原理下揮之不去的副作用，這些全都得在 LED 的封裝上做好處理。

在封裝中，LED 晶粒需要被黏著於特殊設計的基板，基板之下將有導熱材質與排熱機構，而基板之上則有透明的光學介質用來包容螢光粉與連接其上的光學元件，因此封裝的技術與這些材質的應用與成效有極大的關聯，以下將一一進行簡單的討論。首先，在基板的選擇上需具備良好的電性 (或阻電性) 與優異的導熱性，隨著使用的晶片不同與對於排熱的高度要求，設計與製作上具有相當的難度，製程上的信賴性更是極為重要。目前常見的基板有金屬基板、陶瓷基板與複合基板，其性能的評價與熱阻、材料的製程難度及可靠度相關，基板的好壞可能直接影響一個 LED 的排熱效能。在評估 LED 的熱阻方面，如圖 4 所示，整體熱阻是由各個結構之熱阻串連而成，熱阻的單位為 °C/W，代表溫度隨著熱功率的輸入而升高。舉例而言，若從 LED 介面至環境的熱阻值為 10 °C/W，代表 10 W 的熱功率將使得介面比環境溫度高出 100 °C。由

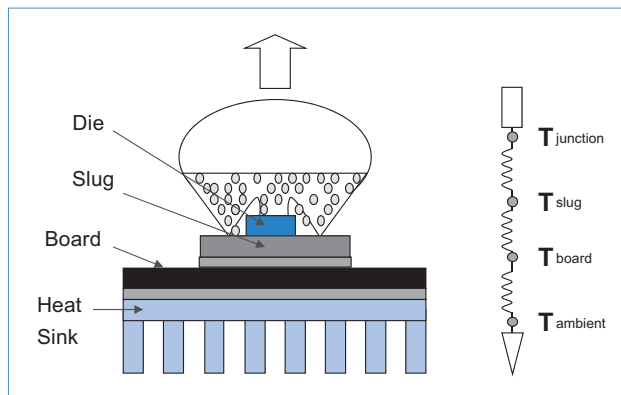


圖 4. LED 模組之系統熱阻示意圖。

於 LED 被認為應操作在 70 °C 以內方能發揮長效節能的特性，因此降低熱阻實是封裝與模組上無可避免的重要主題。在降低熱阻上，選用高熱傳導的材料固然是降低熱阻的好方法，但是整體材料的幾何結構亦相當重要，如何能將熱往橫向傳輸以取得更大的傳熱截面，而使得並聯傳輸路徑得以增加，以降低整體熱阻，是熱管理的重要手段。

熟知封裝的工程人員一定同意螢光粉的控制是封裝上的一大課題，目前雖然台灣廠商尚未掌握螢光粉的重要專利，以至於在封裝後的 LED 之銷售上，受到極為嚴重的限制，但隨著最主要的 YAG 螢光粉專利期限的逼近，在專利上的束縛將會隨著時間漸漸消失，而真正的考驗反而是對螢光粉的實際掌握。在螢光粉的掌握上，色轉換效率與螢光粉本身材質的選擇與合成、粉體粒徑的大小控制與吸收及輻射光譜的匹配有很大的關係，目前仍以 YAG 系列的螢光粉具有較高的轉換效率，而矽酸鹽與氮化物等其他的螢光粉也積極地發展中。然而封裝的挑戰並不僅於此，所有使用的材料皆須具備相互匹配的條件，也皆有其製程最佳化的嚴苛挑戰，因此 LED 的封裝十足是一項高科技產業，難度極高。

四、四階光學—照明決勝

在 LED 的光學設計上，共可分為四個階段，筆者將之稱為四階光學設計。第零階光學設計是在晶片中利用光學微結構將 LED 發光界面的光引出至外

面，雖然如圖 2 所示，LED 可分為三種封裝形式，其光的萃取設計亦有些微不同，但是最佳的出光方式不外乎是在表面或其中界面引入具有 $20^{\circ}-70^{\circ}$ 的斜面、或是將 LED 封裝於一個折射率為 1.5 或以上的半球透鏡中，其光萃取效率最高可達 90% 以上⁽⁸⁾。

第一階光學設計是指在封裝上的光學設計，涵蓋結構的光學設計與螢光粉。由於封裝後的 LED 需要展現其光學特性，亦即展現出其產品的屬性一發光體，因此一個良好的發光體除要有良好的光源效率外，其光型 (或稱配光曲線) 與色彩表現也極為重要。光型的問題較為單純，只要有良好的光學設計能力，不難使 LED 的光型維持原來的 Lambertian 光型，較難的問題是在螢光粉的控制上。螢光粉除光衰與熱衰外，如何配合螢光粉的粒徑與光學參數來設計最佳的幾何架構，使得封裝後的白光 LED 能夠展現一致性的色溫與較低的空間色偏，這是一階光學設計上難度極高的挑戰，必須要能掌握相當精確的螢光粉光學模型，並配合專有的製程才有機會駕馭螢光粉的光色表現，並獲得令人滿意的封裝良率。圖 5 即為國立中央大學研究團隊所發展之超精確螢光粉模型架構⁽⁹⁾，根據該模型架構，可以掌握螢光粉之光學參數，並計算出螢光粉的鋪設厚度與濃度對於色彩表現的影響，如圖 6 所示，進而設計良好的螢光粉配方與結構，甚至是製程的改善，使 LED 的色溫表現與空間色偏皆能獲得良好的控制，而大幅改善封裝良率。

對於一個消費者而言，封裝的 LED 其實不應該直接可見，一旦在一個 LED 燈具中可以直接見到 LED，那可不是一件好的事情，因為消費者所使用的是一個柔和的照明燈具，並非 LED 強烈的刺眼光芒，這在歐美日等先進國家的燈具上是非常重要的。在燈具中，二階的光學設計被用來使得燈具的光型能夠極為柔和或是達到使用的規範，其設計的準則是使 LED 的光線打到燈具所要求之處，因此燈具中光的利用因子 (utilization factor) 便是二階光學設計的重點。在二階光學後，便是特殊的三階設計，其重點是藉由光學設計讓燈具產生均光的效果或是阻擋光線至不應該照射的區域，如此方能將體積小的 LED 光源所易造成的眩光效應降至最低，此時與人眼視覺相關的人因工程便成為 LED 照明的一個重要科技領域，由於 LED 的光色電的自由度極大，照明人因工程將會成為一項重要的研究主題。

五、結論

綜觀 LED 固態照明的發展上，目前已經是一個完全擋不住的潮流，理由是商業化的晶片磊晶技術、晶粒製作技術與封裝技術已可使 LED 在瓦級的操作下達到 100 流明以上，價格雖然偏高，但是隨著良率、效率及使用壽命的提升，已逐漸能從區域性的照明燈具上淘汰傳統的耗能燈具，甚至直擊螢光燈式的省電燈泡。然而 LED 燈具的可靠度卻是相當令人擔憂的，這是因為在 LED 光源之中有

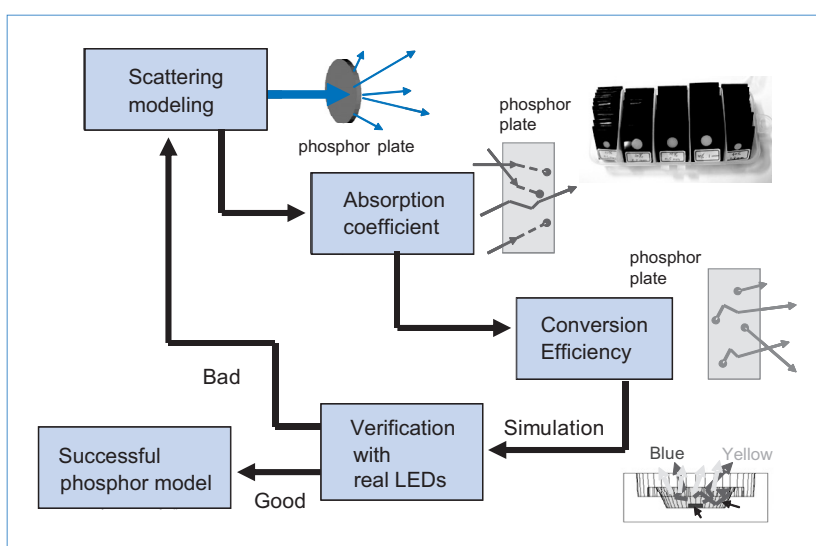


圖 5. 螢光粉的光學模型架構。

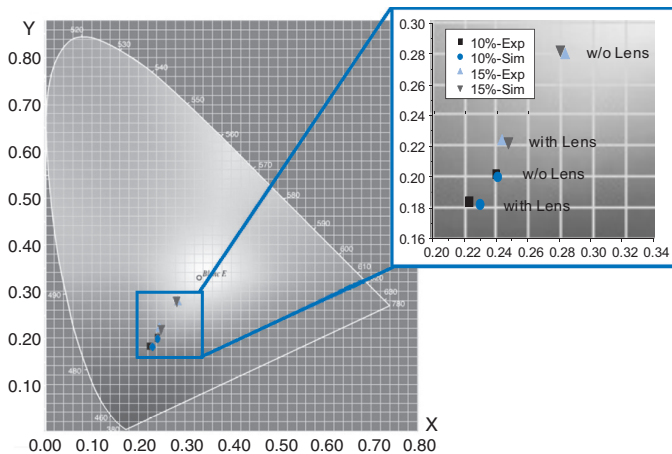


圖 6. 對於不同的螢光粉濃度與封裝形式，精確螢光粉模型皆能精確地計算白光 LED 之色座標，與實驗結果相較，極為接近。⁽⁹⁾

著相當複雜的機構與材料，同時面臨光、電、色、熱四種挑戰，若無法在設計與製程中能清楚而有效的掌握，並做好環測與失效分析，那麼 LED 光源的良率與燈具的使用壽命都將是一個很大的負擔，會將已在發光效率上領先的時程完全消耗殆盡，亦即使得固態照明的時程回到數年前的預測或是更為延後。

LED 固態照明必然是照明史上的一個重要革命，雖然過去數年在大量的人物力投入下已有驚人的成效，但是在產品端的製作與成本上仍令人頗為擔憂，如何加速固態照明時代的到來，仍需更多的人物力在材料、製程、光學、色彩與人因工程上的投入與努力，也需要所有產官學研的人士共同奮鬥。國立中央大學光電中心有鑒於 LED 固態照明的發展與重要性，於 2003 年成立 LED 固態照明研究群，研究成績斐然，更於 2008 年 8 月在光電系成立我國第一所照明相關的研究所—「照明與顯示科技研究所」。多年來在 LED 固態照明方面，不但在產業上協助過許多公司進行技術的探討，亦有多項重要的研發成果，包括世界首創之 LED 光學模型中場擬合法^(10, 11)，創造色域高達 122% NTSC 世界紀錄之 RGB LED 背光 LCD 顯示器⁽¹²⁾，成功開發可取代傳統低溫氮化鎵緩衝層之多重氮化鎂／氮

化鎵結構緩衝層與領先世界建立 YAG 與矽酸鹽之精密光學模型等⁽⁹⁾，可說是台灣 LED 固態照明界的一個重要夥伴。國立中央大學亦於 2009 年八月在研發處成立「台灣綠色照明產業研發服務中心」，希望在 LED 固態照明產業蓬勃發展的同時，能夠幫助台灣取得先機，獲取更為廣大的商機，同時發展優異的人因照明技術，讓 LED 照明持續照亮人類的未來。

參考文獻

1. A. Zukauskas, M. S. Shur, and R. Caska, *Introduction to Solid-state Lighting*, New York: John Wiley & Sons (2002).
2. http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1227101620851.
3. <http://www.ledsmagazine.com/news/4/1/23>.
4. <http://www.cree.com/products/pdf/XLampXP-E.pdf>.
5. T. Fujii, Y. Gao, R. Sharma, E. L. Hu, S. P. Danbaars, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 855 (2004).
6. C. C. Sun, C. Y. Lin, T. X. Lee, and T. H. Yang, *Opt. Eng.*, **43**, 1700 (2004).
7. T. X. Lee, C. Y. Lin, S. H. Ma, and C. C. Sun, *Optics Express*, **13**, 4175 (2005).
8. T. X. Lee, K. F. Gao, W. T. Chien, and C. C. Sun, *Optics Express*, **15**, 6670 (2007).
9. C. C. Sun, C. Y. Chen, H. Y. He, C. C. Chen, W. T. Chien, T. X. Lee and T. H. Yang, *Optics Express*, **16**, 20060 (2008).
10. C. C. Sun, T. X. Lee, S. H. Ma, Y. L. Lee, and S. M. Huang, *Optics Letters*, **31**, 2193 (2006).
11. W. T. Chien, C. C. Sun, and I. Moreno, *Optics Express*, **15**, 7572 (2007).
12. 林維屏，楊宗勳，孫慶成，增廣彩色顯示器顯色色域之方法，中華民國專利 (審查中)。



孫慶成先生為國立中央大學光電博士，現任國立中央大學光電科學與工程學系暨照明與顯示科學研究所特聘教授兼系主任。

Ching-Cherng Sun received his Ph.D. in optical sciences from National Central University. He is currently a distinguished professor in the Department of Optics and Photonics, and also the director in the Institute of Lighting and Display Science at National Central University.