

# LED 固態照明與光學模擬設計

## Introduction to LED Solid-State Lighting and the Associated Optical Simulation and Design

孫慶成

Ching-Cherng Sun

在本文中，筆者介紹 LED 固態照明的發展現況與提升 LED 發光效率的技術重點。此外，我們也介紹 LED 在次照明的重要的應用，如車燈、液晶電視背光與投影電視光源，以及這些應用的未來展望。最後，我們介紹中央大學所提出的 LED 光學模型架構與中場的觀念，並展示設計的成果。

In this paper, we first introduce the development of LED solid-state lighting and the most important issues in increasing light efficiency of GaN-based LED. Then, we propose three potential applications based on LED lighting, such as auto-/motor- forward lighting, LCTV backlighting, and lighting in project TV. Finally, we introduce a new optical modeling algorithm which was proposed by National Central University. Besides, we introduce the concept of mid-field in the model and demonstrate a design result.

### 一、背景

地球的資源經過上世紀的大量耗損已逐漸枯竭，因此在二十一世紀之初，節能便成為最重要的議題之一，而毫無疑問地，LED 是最受矚目的節能光源，將可望在十年後進入一般消費市場，所以早已成為世界各先進國家最重視的產業。台灣因為在 LED 產業上起步甚早，LED 的產量居世界第一而產值則居第二位，產業與技術的實力在國際上皆具受到矚目，在國際能見度甚高。

LED 除了是一個主要的照明光源外，也將因為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。國際上近年來普遍認為 LED 固態光源可望在 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，如圖 1 所示，屆時 LED 將成為最普遍與最廣泛使用的光源。然而在此之前，真正支撐台灣 LED 工業的卻是發光亮度低的指示燈與小尺寸背光源，LED 照明的巨大商機仍是處於看得到而觸不到的尷尬形勢。不過最近各方面的成果顯示高功率與高亮度 LED 的發展已有大幅超越預期時程的趨勢，其中國際高功率 LED 的領導廠商 Lumileds 所推出 Luxeon K2 系列，其發光效率 (luminous efficiency)

為一瓦可達 45 至 60 流明 (lm)，三瓦則為 120 流明<sup>(1)</sup>。而在日本，亦有多家公司所生產之高功率 LED 可在一瓦的輸入下達到超過 70 流明的光通量，在低功率的承載下甚至有超過 100 lm/W 的出光效率<sup>(2)</sup>。此外，日前國際專業雜誌指出，美商 Cree 公司之 XLamp7090 的高功率 LED 樣品可達到一瓦輸出 70 流明之效率，最新的報導更顯示 Cree 已將低功率的 LED 發光效率推向 131 lm/W 的驚人數據<sup>(3)</sup>，使得 LED 的進展時程已經超越原先預估的時程有二到四年之多。

在國內，高功率 LED 的發展亦不遑多讓，多家 LED 封裝廠所生產的高功率白光 LED 皆具有達到一瓦輸入而有超過 40 流明輸出的表現，效率超過 60 lm/W 的樣品亦頗多見。在高功率燈具上，擅長散熱科技的新強光電也在日前發布以其散熱引擎為基礎之 LED 燈泡，分別為四瓦輸入可達 240 流明、八瓦輸入每瓦可達 465 流明，最新的成果是 135 瓦的燈具可輸出超過 5000 流明的亮度<sup>(4)</sup>。上述國內外 LED 的進展，雖使得小功率 LED 之發光效率漸漸與螢光燈效率相當，但是這樣的表現仍未能使 LED 可以走入一般照明，主要的原因是 LED 在發光效率上仍未臻於理想，因此以下為發光效率的探討。

## 二、LED 發光效率的探討

欲瞭解 LED 的發光效率，須從三大主題著手，分別是內部量子效率 (internal quantum efficiency)、光萃取效率 (light extraction efficiency) 與溫度效應。前二者的相乘積稱為外部量子效率 (external quantum efficiency)，代表的是每輸入一單位電功率在晶片外可量得之光功率，因為內部量子效率與光萃取效率皆無法被單獨量得，因此可以以積分球量得的外部量子效率便成為 LED 效率的最佳指標。內部量子效率相當於平均每一對電子電洞對產出多少個光子的一種比例，完美狀況下一對電子電洞對的結合會輻射出一個光子，但是材料的缺陷將造成電子與電洞無法有效的結合，進而使得光子數量減少。改良之道為尋找與磊晶層晶格匹配的基板、減少材料應力、減少材料的缺陷與尋求新穎

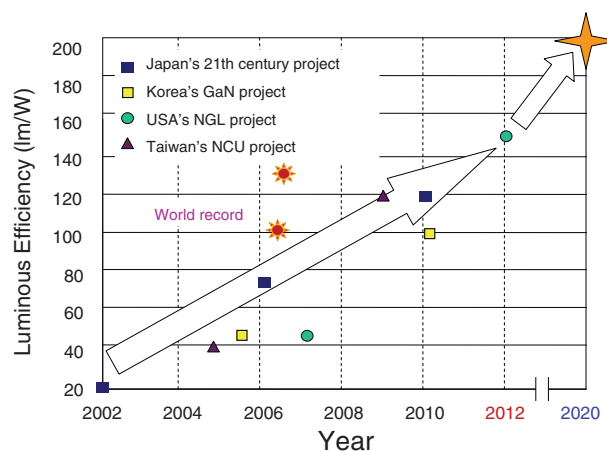


圖 1. LED 能量效率發展之演進與預期。

材料等，而實務上，對於磊晶機台的掌握也非常地重要，反而成為產業界優勝劣敗的主要原因。

另外一個與發光效率相關之重點便是光萃取效率。LED 晶片因為是晶體結構，折射率會遠高於一般的透明介質，紅光的 LED 之折射率甚至高於 3，較低折射率的 GaN 也超過 2，這使得在晶片內的發光層 (active layer) 所發出的光在進入空氣時，面對從折射率高的介質進入折射率低的介質而產生全反射 (total internal reflection) 的現象，該全反射會使得如豆腐塊的 LED 就像是一個光子的監牢，六個表面都成為反射率極高的鏡子，大多數的光子將因為重複的反射以至於最後被晶片吸收，使得產生的光子又轉變成熟，進而降低了內部量子效率。光萃取效率的提升與 LED 晶片的外形、表面的處理、基板的加工、封裝的材料，封裝型式與電極的配置有關。LED 晶片的外形會影響光萃取效率，最著名的例子為 Lumileds 公司生產的紅橙光系列的 LED，為倒金字塔的梯形結構，該款 LED 因為晶片的特殊切而造成光效率的大幅提升<sup>(5)</sup>。而目前廣受晶片廠重視的方法是在晶片表面製作特殊的結構或進行粗化，使得 LED 出光面的全反射情況大幅地改善。此外，在 LED 的基板上進行粗化亦可有效地提升光萃取效率，以藍光 LED 而言，因為藍寶石基板與 GaN 之折射率有較大的差距，因此若能先將基板粗化或製作特殊表面結構以形成 pattern substrate，將會大幅改善 LED 的出光效率。

國立中央大學光電所固態照明光學實驗室的模

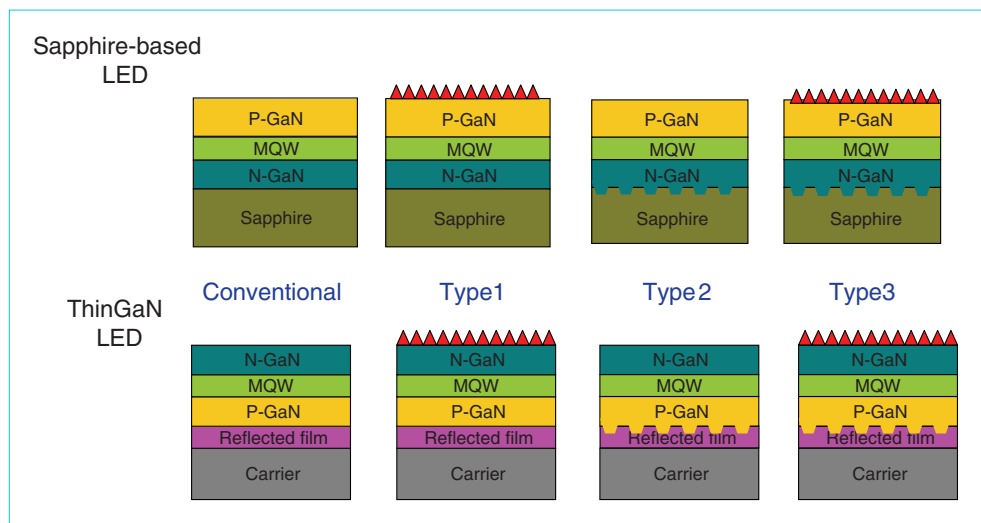


圖 2. LED 不同的粗化與結構。

擬中發現，經過最佳化的表面粗化或是基板處理後的 LED，其光萃取效率的提升可達 80%。圖 2 為藍光 LED 在不同粗化處理後的結構，其光萃取效率模擬的結果如圖 3 所示，在該模擬中，LED 的粗化是以倒金字塔之角錐陣列微結構<sup>(6,7)</sup>。此外，電極的配置對於光萃取效率亦有影響，一般而言，電極附近的發光層會因為電流的聚集而導致較其他地區更高的發光量，這種效應導致 LED 的發光不均，也導致溫度的不均，對於晶片的發光效率有極大的傷害。中央大學光電所固態照明光學實驗室的模擬中發現，在晶片發光層中不同位置所發出的光子之萃取效率亦不同，因此電極的配置與光萃取效率的關係是一個重要的課題。

如果 LED 只發光而不發熱，那就太完美了。LED 晶片的熱若無法排出，高溫會使得 LED 的發光效率大打折扣，此外，發光效率的降低可能還意味著 LED 在高溫的使用壽命的縮減，溫度控制對於 LED 的重要性可見一般。現階段 LED 的溫度管理是包括晶片製作、封裝、模組與燈具的上中下游所有人的共同的課題。在散熱設計上，最重要的課題是有效降低晶片發光層至環境的熱阻，目前在封裝階段使用的技術以利用陶瓷基板與熱導管最受矚目，最新的成果顯示熱阻可降至 5 °C/W 以下<sup>(4)</sup>，亦即在每一瓦之輸入功率時，發光層的溫升只有 5 度，僅為過去最佳值的三分之一，如果這些超低熱阻的設計與製作能具有更高的良率與更低的成本，LED 的照明世代將可提前到來。

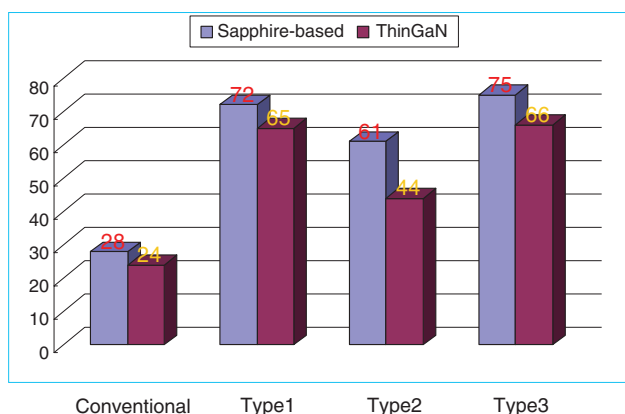


圖 3. LED 在不同粗化結構之光學萃取效率模擬，模擬中未考慮發光層之吸收。

### 三、LED 在次照明的應用

雖然在一般照明上，LED 仍未成熟，但是某些特殊的照明上，LED 在未來三年中似乎已漸成主流，這些次照明的應用包括機汽車前燈、液晶電視之背光照明與背投影電視的照明。上述的應用中又以機汽車前燈最具有機會，因為機汽車前燈在光型規範的要求下，所需形成的光型之亮度要求不高，反而是光學的設計較為嚴格。以目前 LED 的發光亮度而言，對於歐盟法規 (ECE) 各種機汽車前燈所需的 LED 數量如表 1 所示<sup>(8-10)</sup>，可以看出對

	Daytime Running	Fog Lamp	Motor L-Beam	Motor H-Beam	Auto L-Beam	Auto H-Beam
Target Flux	40 lm	30 lm	15 lm	55 lm	170 lm	100 lm
Lighting Requirement	70-90 lm	60-80 lm	30-45 lm	110-165 lm	300-500 lm	150-300 lm
LED pcs @ 90 lm/3W	1	1	1	2	4-6	2-4
LED pcs @ 40 lm/W	2	2	1-2	3-4	8-13	4-8

表 1.  
ECE 車燈規範下，  
LED 顆數的估算。

Target Flux = Irradiance \* Light Pattern @ 25 m

Lighting Requirement = (ECE Light Pattern + Extra Pattern) / Optical Efficiency

於 LED 之進入門檻已不高，只要 LED 能在發光效率與散熱設計上更上一層樓，LED 將成為機汽車前燈的最佳選擇。

LED 在液晶電視背光照明之應用則是目前國內 LED 與 LCD 產業最熱門的話題。若不以價格來看，LED 無論在色域 (color gamut) 的表現、環保議題與壽命上皆較冷陰極螢光管 (cold cathode fluorescent lamp, CCFL) 具有壓倒性的優勢；以色域的提升而言，CCFL 為光源的液晶電視之色域約在 65% - 70% NTSC，以白光 LED 為光源之液晶電視約為 70% - 75% NTSC，以 RGB LED 為光源之液晶電視則可達 106% NTSC。圖 4 為中央大學

固態光學實驗室製作的 42 吋 RGB LED 背光之液晶電視與 CCFL 背光液晶電視的比較，圖 5 則為其色域的比較<sup>(11)</sup>。若是將彩色濾光拿掉而利用時間多工的方法展現彩色影像，LED 將可使液晶電視的色域提升至 130% 以上，因此，LED 用於提升液晶電視的色彩表現是一個必然的趨勢。而在價格上，LED 的劣勢仍然是因為發光效率的不足所導致。在 LED 背光模組的設計上，目前的發展分為以小晶片為主與以高功率晶片為主之兩種設計。前者的優點為晶片效率高與光學設計較為簡單，也因此可能會導致較佳的系統光學效率，其缺點為因為晶片數量多而使得色域的表現出現較多的變數與 LED

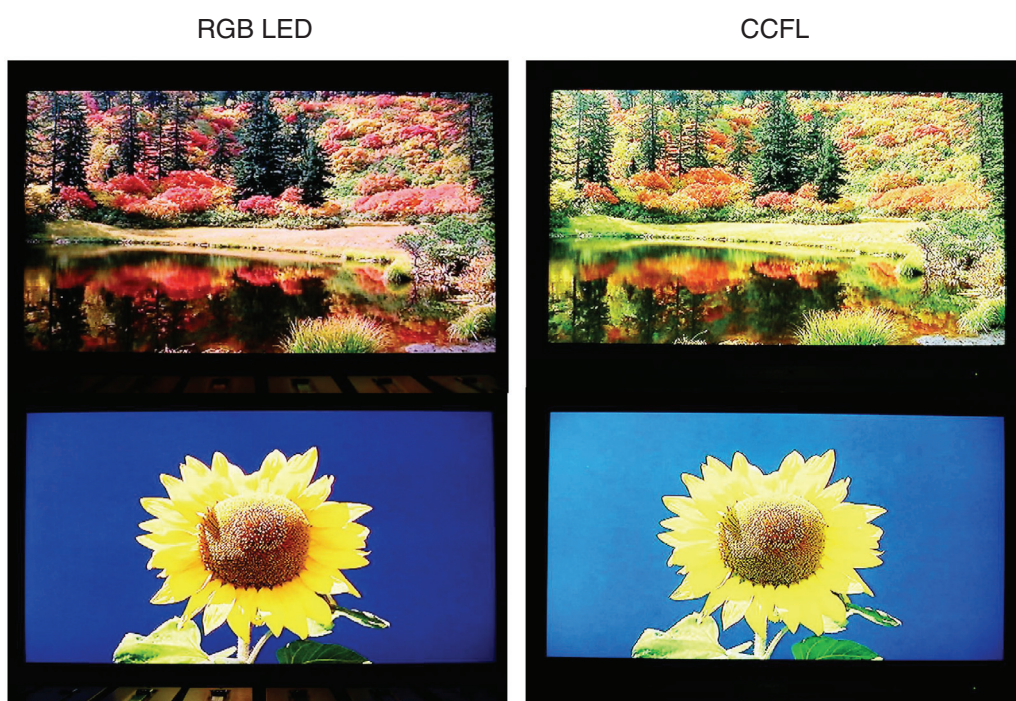


圖 4.  
RGB LED 與 CCFL  
背光之液晶電視之畫面比較。

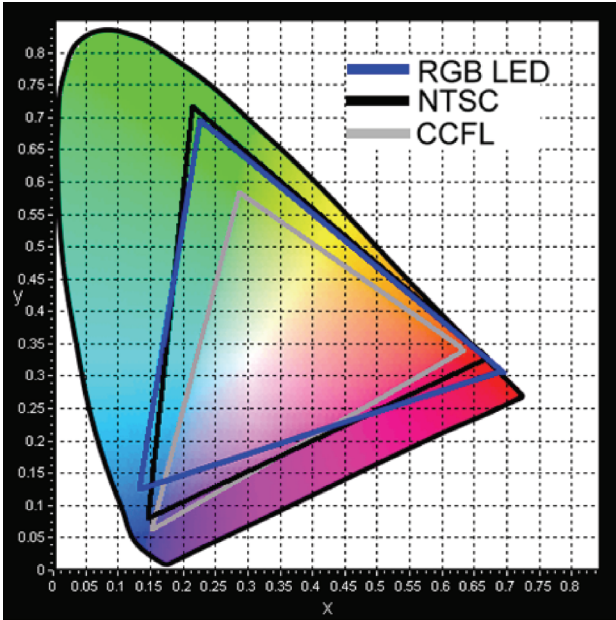


圖 5. RGB LED 背光液晶電視之色域比較。

可靠度的要求需提高。相對地，以高功率 LED 為主的設計在晶片效率與系統光學效率可能較為吃虧，但是好處是因為晶片數量少，色彩的控制與可靠度的掌握較為容易。

LED 在三年內的另一個機會是背投影電視的光源，這是因為背投影電視的光通量要求較前投影為低，而其空間也較前投影更為寬敞，因此背投影電視可以使用較少的 LED，卻又可有較大的散熱空間。LED 光源對於背投影電視而言，將宛如救世主一般，完全免除背投影電視相對其他平面電視的缺點，即光源壽命極短與色彩表現不佳。以目前 LED 的效率而言，做為背投影電視之光源仍嫌吃力，但是在未來若光源的效率能提升 25% 以上並有效解決排熱問題，將有機會使背投影電視成為大尺寸液晶平面電視的一個勁敵。而長期來看，當 LED 正式成為前投影電視的光源，前投影電視將因光源壽命與色彩飽合度的大幅提升，可望進入家庭成為家庭劇院之必備的設備，因此 LED 的重要性自不在話下。

#### 四、LED 的光學工程

在上述的次照明應用中，LED 將扮演一個高

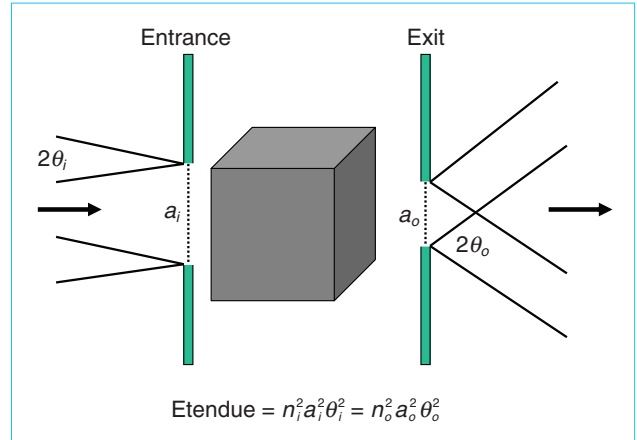


圖 6. 光學傳輸之 Etendue 示意圖。

效能與高色彩的光源，而由於在這些應用中，光源的配置與管理極為重要，在光學上，任何光學元件在傳遞光學能量時皆需具有 Lagrange invariant 的性質<sup>(12)</sup>，當光學系統的能量守衡時，其 etendue<sup>(13)</sup> (相當於光學截面積與發散角平方之乘積，如圖 6 所示) 的大小將會持平或擴大，但是當光源的 etendue 太大時，該光學系統將無法善用光源的所有能量，而造成能量效率的降低。因此一個 LED 燈具非將大量的 LED 集中在一起即可，需做好 etendue 的管理。所以良好的光學設計將使 LED 光源具有省能與低成本的優勢，而 LED 光學設計的一大重點便是 LED 光源的模型。

國立中央大學照明光學實驗室歷經四年的研究，發展出一套精確的發光模型，並首次引入光學中場 (mid field) 的觀念<sup>(14,15)</sup>。光波在在中場中傳輸時，其能量分布將會依距離改變而改變，如圖 7 所示，因此中場之能量分布便成為用來檢測發光模型的一個非常有效場區。在中央大學的光源模型中，第一個步驟是建立 LED 的幾何與光學參數，包括晶片尺寸、幾何形狀、各平面的反射率、吸收係數甚至散射率，接著便利用具有 Monte Carlo 演算能力的光機軟體如 ASAP<sup>(16)</sup> 來進行光追跡計算。在經過大量光線的計算後，可以取得在中場中不同距離的發光強度分布，將其分布與實驗量測分部進行 cross-correlation 即可獲得兩者相似度的定量數據。

在中央大學的研究中發現，精確的模型可使模擬結果與實驗量測在一公分至一公尺的中場範圍

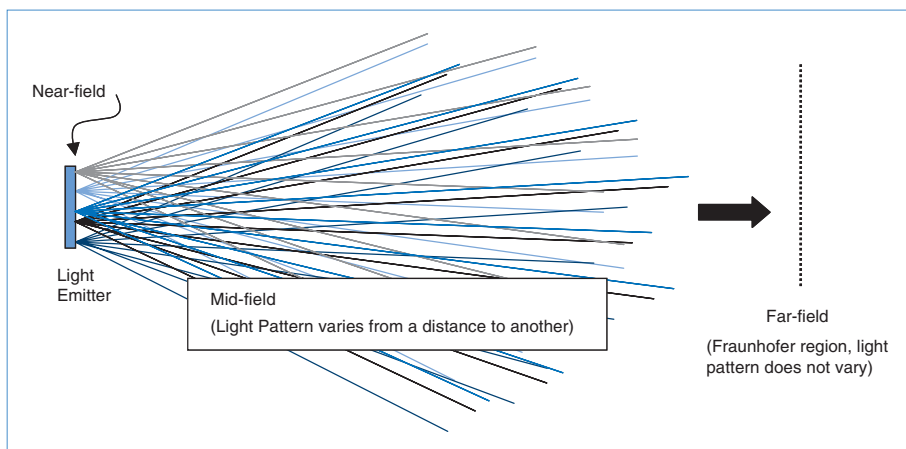


圖 7. 光學中場之示意圖。

裡，相似度達 99% 以上，因此該 LED 可說已被精確地模型化。利用精確的光學模型，將可設計各種 LED 的照明燈具，圖 8 為所設計的 LED 機車近光燈結構與樣品，其光源使用葳天科技生產之國產高功率 LED (圖 9)<sup>(17)</sup>，其模擬光形如圖 10 所示<sup>(9)</sup>，該光形與能量分布皆符合 ECE 法規。

在 LED 的應用中，光學設計的角色比在傳統光源中更為重要，這是因為 LED 要在光學上規格化的可能性亦不高，不同公司生產的 LED 之幾何結構與光形都可能不同，因此光源模型的能力相當重要。光學模型不但在 LED 的燈具應用上極為重要，在 LED 之發光效率的模擬與 LED 的封裝上也都很重要，若無精確的光學模擬能力，LED 在照明上的發展將會受到大幅的影響。

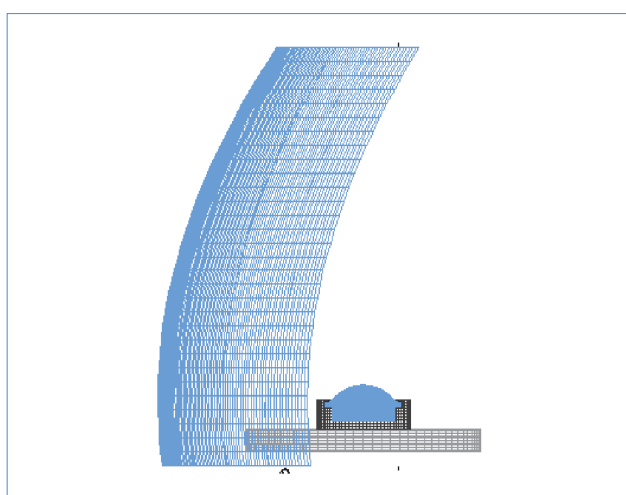


圖 8. 車燈之設計機構。

## 五、結論與展望

在本文中，筆者探討了 LED 的發光特性以及在材料、結構、光學與散熱的問題，也描述 LED 在次照明的發展潛力，最後並介紹中央大學固態照明實驗室的光學模型與在車燈的設計。如眾所知，台灣的產業經常在智慧財產權上吃盡苦頭，這種情形在 LED 產業上只有過之而無不及，這使得部分

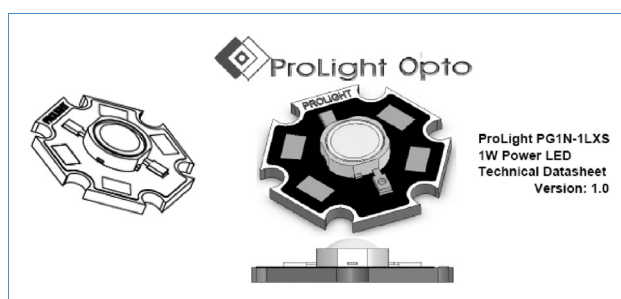


圖 9. 車燈之光源為國產之 LED (資料來源為葳天科技)。

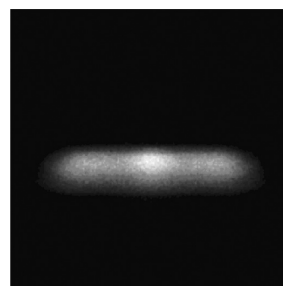


圖 10. 車燈之光形的模擬結果，符合 ECE 之規範。

LED 產業只能將產品推向低價市場，並不斷的外移以降低成本，其結果是獲利減少與技術的擴散，而導致生存空間逐漸受到壓縮。台灣的 LED 產業能有今日的成就，與台灣企業小、靈活度高有相當的關係，但也是因為如此，造成 LED 產業技術層次與美日等主要競爭者相較低了一截，這種技術的落後不在量產技術而在技術的深耕與創新。在看到 LED 未來商機的潛能與今日技術的瓶頸，我們可以說在 LED 的技術競賽中，真正的主導技術仍未現身，因此台灣的 LED 產業仍有可為。由於 LED 照明具有跨領域的本質，因此整合材料、製程、機構、光學、色彩與系統的人才也相當重要，以台灣目前所展現的實力，若能進行長期的技術研發與垂直整合，在智權上儘早布局，在技術上繼續深耕，台灣將可發展出世界級的 LED 照明技術。而學術界的專注研究、產官界長期的支持與高級人力的持續養成將會是台灣 LED 產業在未來是否能保持競爭力甚至成為世界第一的重要基石。

## 誌謝

本團隊 LED 相關研究獲得經濟部科專計畫之補助與支持，在此致謝。

## 參考文獻

1. <http://www.lumileds.com/>
2. <http://www.nichia.com/>
3. <http://www.cree.com/>

4. <http://www.neopac-lighting.com/>
5. M. R. Krames, O.-H. M., G. E. Hoffer, C.-C. C., E. I. Chen, I.-H. Tan, P. Grillot, N. F. Gardner, H. C. Chui, J.-W. Huang, S. A. Stockman, F. A. Kish, M. G. Craford, T. S. Tan, C. P. Kocot, M. Hueschen, J. Posselt, B. Loh, G. Sasser, and D. Collins, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2365 (1999).
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, *Opt. Express*, **13**, 4175 (2005).
8. 彭偉捷, 高功率 LED 之歐規汽車近光燈設計, 中央大學光電所碩士論文 (2005).
9. 孫瑞宏, 高功率 LED 應用於車前燈之設計, 中央大學光電所碩士論文 (2006).
10. 藍鈺兩, 高功率白光發光二極體之汽車頭燈設計, 中央大學光電所碩士論文 (2006).
11. 鍾世勳, LED 液晶背光模組之輝度管理, 中央大學光電所碩士論文 (2006).
12. V. N. Mahajan, *Optical Imaging and Aberrations, Part I, Ray Geometrical Optics*, SPIE Press (1998).
13. R. Winston, *Nonimaging Optics*, New York: Academic Press (2005).
14. C. C. Sun, T. X. Lee, S. H. Ma, Y. L. Lee, and S. M. Huang, *Optics Letters*, **31**, 2193 (2006).
15. 李雅倫, 高功率梯形 LED 晶片之特殊投射光形之設計, 中央大學光電所碩士論文 (2005).
16. <http://www.breault.com/>
17. <http://www.prolightopto.com/>

- 
- 孫慶成先生為國立中央大學光電科學博士，現任國立中央大學光電科學與工程系教授。
  - Ching-Cherng Sun received his Ph.D. in optical sciences from National Central University. He is currently a professor in the Department of Optics and Photonics at National Central University.