

LED 光引擎效率分析

一、前言

LED 光源目前以 COB(chip on board)技術為最廣泛應用於固態照明模組上，LED 照明與系統節能研發計畫提出高效率 LED 光引擎最佳化搭配之封裝、光學、電源整合設計，將整合高壓晶片、通訊介面之智慧型電控 IC 與一次光學微結構封裝於單一系統，可提高整體系統之整合度、有效降低離散元件上件與維護成本、大幅縮減單一光學透鏡的封裝固化製作時間，有效達到快速及低成本的照明產品，可提供未來照明產業一個高性價比的發展目標，突破國內封裝技術瓶頸。

二、效率分析

當電流注入 LED 後，電子電洞對會在多重量子井(multiple quantum wells, MQWs)內產生復合而發出光線，未產生復合的電子電洞對則以聲子的型態產生熱能，散熱途徑方法約有幾種，由空氣中自然散熱、由下方基板散熱、透過金線傳遞出熱能。LED 晶粒發光層(量子井)為主要晶粒熱源。晶粒散熱效果為計算發光層至外界環境的熱阻，晶片熱阻計算方式為

$$R_{chip} = \frac{L}{K \times A}$$

L 為熱傳導路徑長度，K 為總導熱係數，A 為熱傳導路徑的截面積，表 2 為不同材料在室溫下的導熱係數，由上式可知當(1)縮短發光層與封裝基板間的距離(降低 LED 晶片厚度)或(2)更換高導熱係數之 LED 磊晶成長基板可有效降低熱阻。

傳統水平式 LED 結構採用藍寶石為基板成長，假設藍寶石基板厚度為降為一半(對長寬相同之大功率晶粒而言)，藍寶石基板的熱阻可降低為一半，但當基板厚度愈薄時易產生破片而影響生產良率，且在固晶時容易使固晶膠覆蓋住晶片側邊形成短路。

除了藍寶石基板導熱係數差影響 LED 發光效率外，藍寶石為絕

緣體必須利用黃光製程將 n 型氮化鎵層裸露再鍍上電極，而使發光面積降低；水平式 LED 結構中正負電極皆在同一面，因而造成電子及電洞在橫向流動距離不等，使得產生電流群聚效應而增加晶片溫度，造成電流分布不均，並且另有電極遮光的問題。若改變 LED 結構為垂直式可解決上述問題，利用雷射剝離藍寶石基板，再將磨薄後的 thin-GaN 鍍上高反射層，接合金錫複合金屬轉黏貼至導熱係數較佳之矽基板上；此垂直結構之正負電極在晶片上下區域，可使電流均勻散佈，且不需要利用黃光技術將發光層上的電極位置裸露出，可有效使用整體發光面積；主發光層也因轉貼基板的技術而不會位於過低靠近固晶區的位置，而產生短路，但垂直式 LED 的缺點為雷射剝離製作成本較高。另一種近幾年被高度關注的 LED 結構為覆晶式，在 p 型氮化鎵磊晶層上鍍上高反射層，並將傳統水平式 LED 元件反置，使光由藍寶石基板背面出光，利用金屬凸塊直接將晶片與高導熱係數之基板接觸，使主發光層產生的熱直接由下方金屬凸塊導出，可大幅提升散熱效果，並且具有免打線的優勢。但因覆晶式 LED 正負極距離很靠近，需要精密的對位技術將晶片黏著於基板上，並且仍然存在水平流向電流而產生的電流群聚問題，製作較繁複及成本較高。

當選用藍寶石為成長基板時，與氮化鎵層會有 16% 的晶格不匹配，造成成長缺陷使效率降低；若更換為晶格常數接近之碳化矽基板或同質成長之氮化鎵基板，磊晶層品質可大幅改善，但缺點為無法取得大面積低成本之基板。有些研究者為整合矽基電子元件與 LED，試圖將氮化鎵成長在矽基板上，但晶格誤差過大及擴張應力的效應，使得目前以矽基板成長的 LED 市場逐漸縮小。

本研究主要針對大功率 LED 晶片進行效率分析及微結構封裝光型研究，為達到高亮度及高功率需求，傳統低壓晶片需要可驅動在更大的定電流下，但是當導通之電流過大將使 LED 接面溫度(Junction temperature)上升，而產生光強度下降(efficiency droop)與可靠度下降之趨勢。LED 晶片封裝可使用打金線、共晶(Eutectic)或覆晶(Flip chip)方式連結於其基板上，不同封裝技術，其散熱方法亦有所不同，散熱途徑方法約有幾種，由空氣中散熱、由下方基板散熱、透過金線傳遞

出熱能，因此，基板材料的熱散能力及 LED 晶片結構設計對於散熱途徑具有極重要影響力。

LED 主要發光層的材料為氮化鎵鎵材料的折射率為 2.3~2.5，與空氣折射率為 1 差異甚大，造成發光層出射的光被侷限住產生全反射，被限制住的反射光被基板、電極、氮化鎵層等再吸收造成光衰減，因此為了提升光取出效率，高折射率封裝膠材被運用搭配使用一次光學透鏡，可有效降低與空氣間的折射率差異，使光取出效率增加，圖 1 為比較光取出在空氣及在矽膠封裝膠材時的差異，全反射臨界角將會有效增加，假設使用的膠材折射率為 1.41 之矽膠。

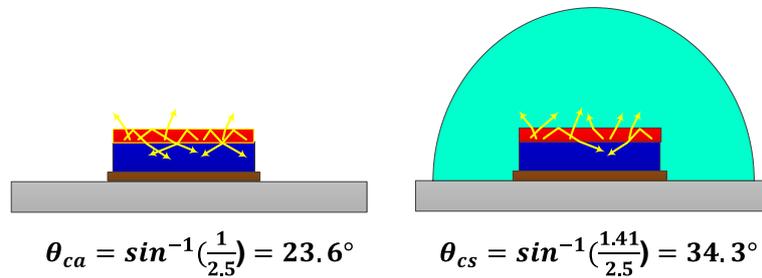


圖 1、封裝折射率對光取出影響

圖 2 為垂直式 LED 晶片在裸晶與半徑 2 mm 半球封裝後的脈衝效率測試結果，測試條件為每個電流點點亮 0.1 ms，然後關掉休息 1 ms 再進行下個電流點量測，封裝前後最佳之輻射效率(光功率/電功率)點約在驅動電流為 50 mA 附近，約增加 16% 的光取出效率。

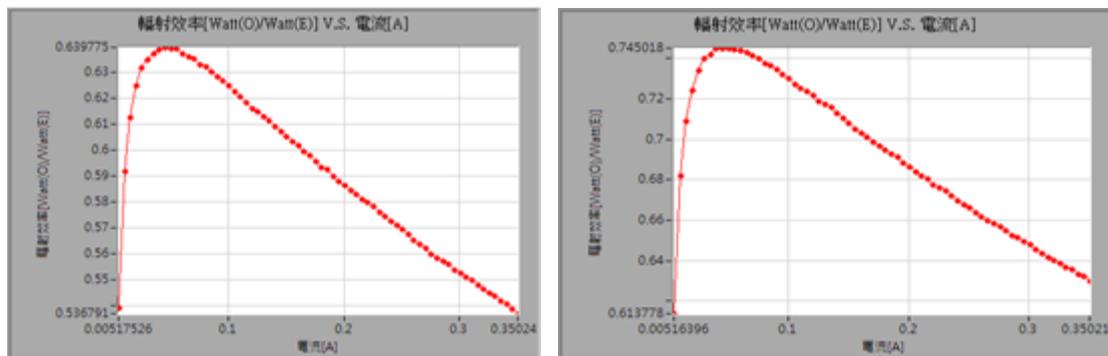


圖 2、垂直式藍光晶片封裝前後效率分析

為使用脈衝式螢光粉塗佈技術，可精準噴塗厚度均勻之螢光粉層於藍光晶片上，為兼顧效率及色座標點(靠近黑體輻射線)，選用中心發光波段在 558nm 的螢光粉，噴塗厚度約為 120 μm，封裝前後的效率分析約增加 11% 的光取出效率(圖 3)，相較於藍光晶片封裝前後的效率，噴塗螢光粉層於晶片上會造成波長轉換時的 Stokes 損失、螢光粉吸收、螢光粉粒子背向散射藍/黃光被晶片及基板吸收等因素，而造成輸出光功率下降。

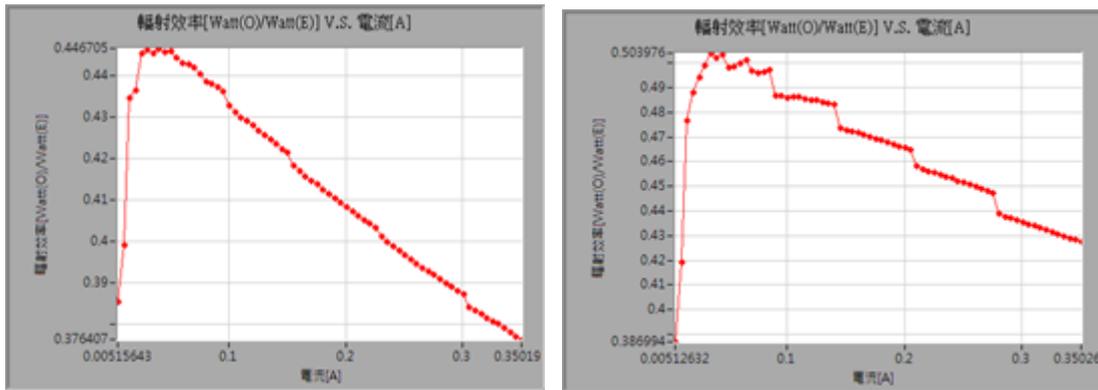


圖 3、垂直式藍光晶片噴塗螢光粉封裝前後效率分析

圖 4 為封裝前後之色座標點，封裝前色溫為 4263K，色座標 (x,y) = (0.3826,0.4288)，光譜輻射光視效能 (Luminous Efficacy of Radiation ,LER)，定義為

$$LER = \frac{\phi_o}{\phi_e} = \frac{683 \text{ lm/W} \int_{\lambda} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda} P(\lambda)d\lambda}$$

LER 愈高代表在同樣輸入電功率下輻射光強度愈亮，LER 與人眼視效函數(eye sensitivity function, $V(\lambda)$) 有關，對單色 555 nm 光源($\Delta \lambda \rightarrow 0$)人眼視效函數最大為 683 lm/W。本研究中封裝前 LER 為 388 lm/W，封裝後 LER 降低至 368 lm/W，封裝前後的光譜圖如圖 5 所示，主要造成色座標漂移的原因為封裝後因折射率差異較小，可取出的藍光增加，雖然螢光粉仍然持續吸收藍光轉換成黃光，但是在等路徑長螢光粉層中可穿透的藍光(未被螢光粉吸收或散射)比例增加，因此 LER 下降及色座標往高色溫方向移動。

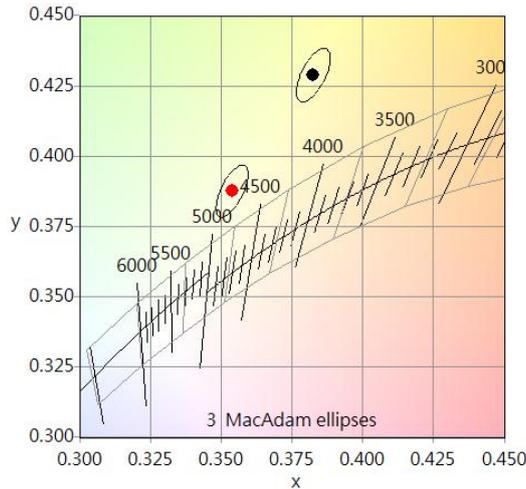


圖 4、垂直式 LED 在封裝前後色座標點

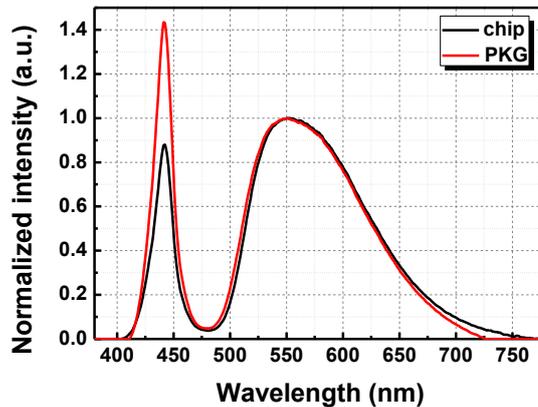


圖 5、垂直式 LED 在封裝前後光譜圖

為了整合光學及驅動電路於單一積體化光引擎，且輸入為交流電的隨插即用的設計應用目標，高效率智慧型光引擎的驅動電路可選用線性 IC。本次選用的線性 IC 為一高效率 PWM 降壓式 LED 驅動電路，可直接將交流轉換成直流供給 LED 使用，其特色為低成本，只需使用很少的外部元件、最高的電源轉換效率可達 90%、全電壓 90~240V_{RMS} 的交流輸入、0 到 1.2V 的類比調光腳位 ACTL Pin 及各種保護機制，如 LED 開路、短路、過電流及過溫度保護電路，可保護晶片在不正常的情況下不會損壞。圖 6 為一個線性 IC 的基本架構圖，可以看到線性 IC 為浮接地的架構，IC 的 GND 和 LED 的地沒有連結在一起，而是落在兩功率元件 Q1 及 D1 的中間，此種架構的優點為 IC 不需要使用高壓製成，可降低 IC 製造的成本，而 IC 內部的

電流最終也會流回至 LED，理論上可以獲得較高的效率。線性 IC 的定電流方式為平均電流感測技術(Averaging Current Feedback Loop)，和一般降壓式驅動電路將感測電阻與 LED 或二極體串聯不同，線性 IC 將電流感測電阻放在介於 Q1、D1 和電感 L 中間，如此一來不管在 Q1 導通或是 Q1 不導通的狀況下 IC 都能到 LED 電流資訊，將可提高 LED 的電流精確度。

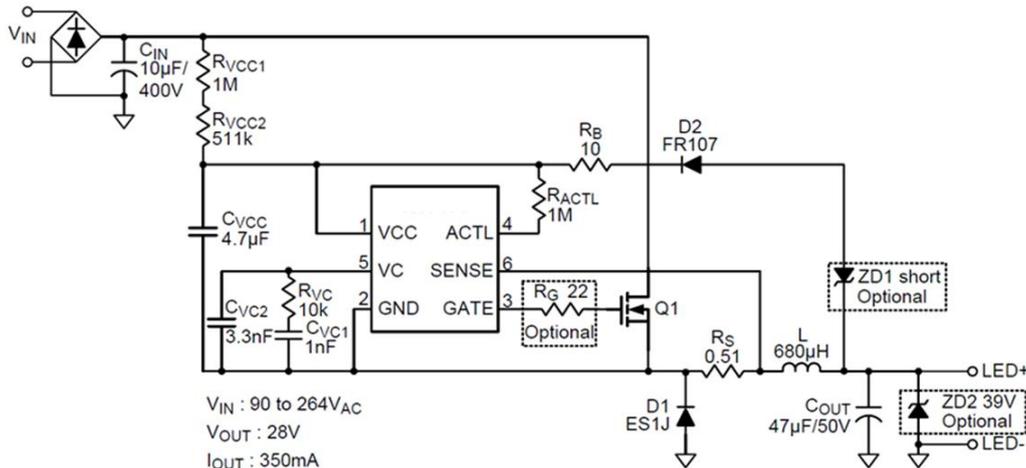


圖 6、本次選用的線性 IC 架構

為了通過系統 EMI 的安規測試，如:EN55015。因此需要在交流輸入端加入電感及電容形成一階濾波器降低電路造成的電磁干擾。此外，因為線性 IC 並沒有內建主動式功率因數修正電路(Power Factor Correction)，在系統中加入填谷電路(Vally-Fill Circuits)提升功率因數，將功率因數提升至 0.7 以上，滿足 Energy Star 所規定的住家照明功率因數需大於 0.7 的規範。在調光功能方面，因線性 IC 為浮接地的架構，如果將 MCU 或其他訊號產生電路的地直接與線性 IC 的浮接地連結在一起，當 Duty ON Q1 開關導通的時候，線性 IC 的地電壓將會升高，可能會對 MCU 造成損壞。為了避免此情形，加入一組調光電路(Dimming Circuit)，分別由兩顆二極體($D_{dim1,2}$)，電阻(R_{dim})、電容(C_{dim})、稽那二極體(Z_{dim})與一開關(Q_{PWM1})組成。圖 7 為本次光引擎雛型的電效率量測結果，量測條件為:在交流輸入 90 至 140V_{RMS} 的範圍下，分別測試設定當直流驅動 LED 電流為 100 mA、170 mA、350mA 時的電效率。在 110V_{RMS} 時有最高效率分別約 86.26%、86.04%、86.32%，

此時 LED 電流分別約為 94 mA、169 mA、354mA，輸入功率分別約為 3.59W、6.57W、14.07W。

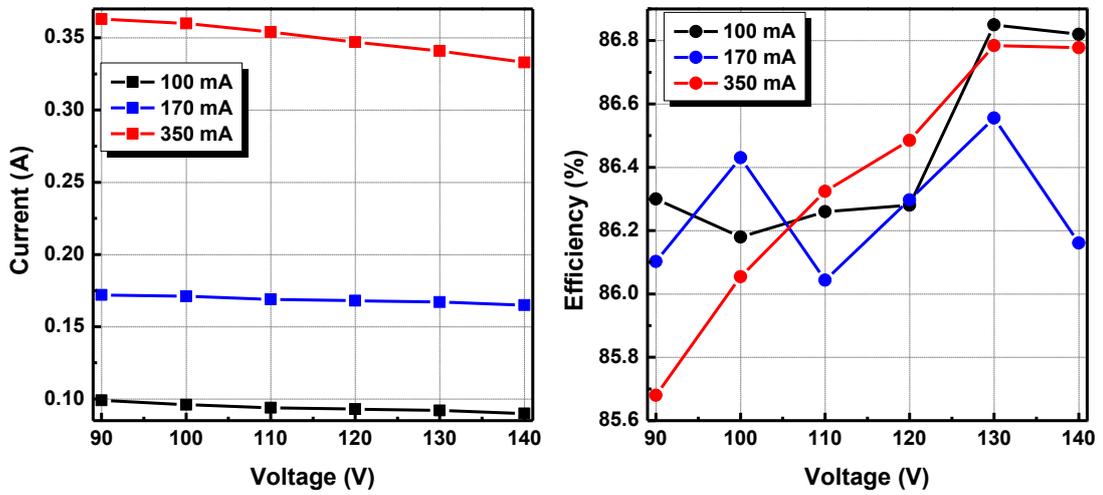


圖 7、光引擎效率與電流對輸入關係圖

由於 AC 輸入之高效率光引擎光板上須使用黑色電子元件，且高度接近 12mm，將吸收光源發射出來之光線，使光引擎整體效率降低，故須設計反射杯以增加光線反射至出光面的比例。使用 TracePro 內利用最佳化光線追跡進行反射杯效率最佳化設計，由分析可知，在觀測面偵測加入反射杯後之效率可由 0.85 提升至 0.895，估計效率提升 5.3%，由積分球實測結果，反射杯效率為 92.7% 與模擬結果 90% 接近，完整組裝實體如圖 8。

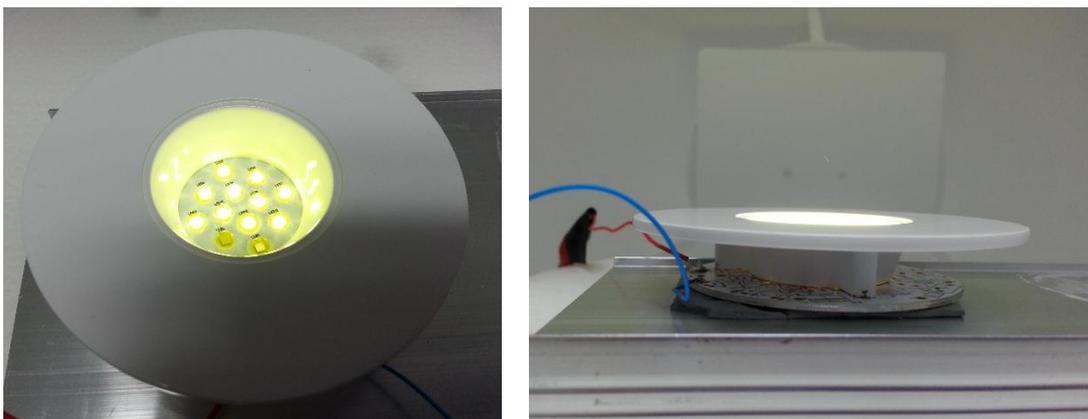


圖 8、高效率光引擎搭配反射杯實體圖

三、結論

本 LED 光引擎效率分析內容由晶粒選擇、螢光粉噴塗方式、封

裝膠材、驅動電路、與反射杯設計等方向切入，並詳細剖析可能的問題來源與解決方式，最終經由量測結果驗證效率提升效果。