

鑽石加持的 LED : COB of DLC LED on DLC PCB (上)

LED with A Diamond Touch (I)

宋健民 James Sung¹、甘明吉 Kevin Kan²、
蔡百揚 Eric Tsai³、宋思齊 Michael Sung⁴
鍊鑽科技(Ritedia Corporation) ¹總經理、²經理、³研發襄理
鑫鑽科技(SinoDiamondLED Corporation) ⁴總經理

2012 年為 LED 的照明元年。要大量取代白熾燈、螢光燈、投射燈及街燈，LED 不僅要更耐用，也必須更便宜。似鑽膜(DLC)可被覆在 LED 的晶片上，可以有效降低溫度及提高亮度。DLC 更可紓解晶片封裝時產生的介面應力，增加 LED 的可靠度。尤有進者，LED 的大量使用並不是靠轉換效率的提高，而實為購買價格的降低。DLC LED 直接鐸在 DLC PCB 上可簡化製程及降低成本(< 0.3 ¢/lm)。LED 的溫度可以 DLC 有效抑制使光衰更小，這樣就可以加大電流，一顆 DLC LED 就可抵多顆傳統 LED。這是有效降低 LED 光擊成本的良方，不僅可普及 LED 照明，也能大幅降低全球的用電量。

LED lighting will become popular beginning in 2012. In order for LED to replace various lamps that we use daily, not only LED's efficiency must increase, but also its cost to be reduced. Diamond is LED's best friend with highest thermal conductivity that can effectively cool LED so more light can be released. Diamond-like carbon (DLC) can be coated on both LED chips and metal-cored printed circuit board (MCPCB) so chip-on-board (COB) packaging with DLC to DLC bonding is possible. This can brighten LED luminaries and extend their service longevity. Moreover, the fabrication of LED lamps become simple so one dollar may buy finished lamp of more than 200 lumens. The widespread installation of LED luminaries can make our living more comfortable. Additionally, the reduced electricity used for illumination can reduce significantly CO₂ released in air, an effective way to cope with the global warming problem.

關鍵詞 /Key Words

發光二極體(Light Emitting Diode; LED)、似鑽膜(Diamond-like Carbon; DLC)、照明(Lighting)、鑽石(Diamond)

鑽石是 LED 最好的朋友

LED 雖已大量生產多年，但多用於 LCD 的背光源、交通燈、顯示看板及裝飾燈等。然而最大宗的應用 LED 照明仍只是測試水溫而已。LED 燈具的市場龐大，但因 LED 的價格高昂而且其可靠度低，所以至

今仍難以普及。然而 LED 的價格已經快速滑落而且性能不斷上修，因此業界認為 2012 年為 LED 照明的起飛元年。有鑑於此，鍊鑽（台灣鍊德科技的子公司）及鑫鑽（江蘇天楹光電子公司）乃計畫生產以鑽石科技加持的 LED 光擊(Light Engine)，準備進軍 LED 的照明市場，包括室內的照明及戶

外的路燈等。

LED 性能提升最大的瓶頸為散熱，而散熱最好的材料是鑽石。鑽石不僅是寶石之後，更是材料之王（見宋健民著「超硬材料」及「鑽石合成」，2000 年教科書，台灣全華圖書）。尤有進者，鑽石可形成奈米級的薄膜而被覆在各種材質上，如金屬、陶瓷、塑膠等。就這樣，所謂的「似鑽膜」(Diamond Like Carbon; DLC)就可和 LED 的半導體（如 GaN）結合，乃至鍍在封裝 LED 的基板上（圖一）。DLC LED 為宋健民的專利產品（如中華民國專利證書號數：I255161，申請日：中華民國 93 (2004) 年 12 月 17 日），它的高速散熱降低了 LED 的介面溫度，可以使 LED 更亮。DLC 也可紓解 LED 的介面應力，使 LED 的光亮保持穩定，減緩了光度衰減的問題（圖二）。DLC 在 LED 的應用包括上游的晶片及下游的封裝，這是符合節能減碳的綠色產品。

DLC 的種類很多，不僅可調成平滑的絕緣層，也能被覆成具有奈米結構的導電層。DLC 具有高速散熱及調節應力的特性，因此是提升 LED 性能理想的介面物質。LED 的發光效率受限於介面溫度 (Junction Temperature)，DLC 的高速散熱避免在 LED 內產生破壞性的熱點(Hot Spot)。

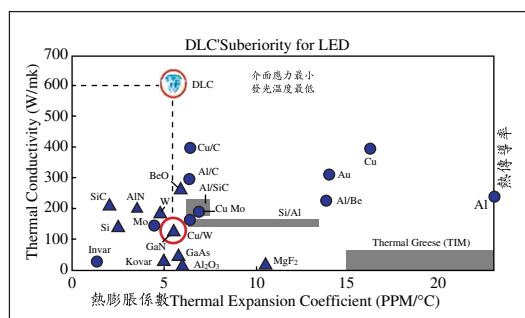


▲圖一 DLC可鍍成絕緣的平面或導電的粗面，兩者的散熱效率都高於任何金屬

LED 的壽命受到應力的蠶食，DLC 紓解了介面應力，降低了光衰速率及提高了出光的可靠度(Reliability)。

DLC 可紓解介面應力

藍光 LED GaN 的外延磊晶(Epitaxy)為「陽衰陰盛」的半導體。所謂「陽衰」指 P 層（正極）電洞不足，而「陰盛」則 N 層（負極）電子過多。GaN 的電洞常靠 Mg 原子的植入生成，但因 Mg 原子比晶格大很多，故常造成缺陷。也因如此，P 層的電阻偏大，需透明電極幫助分布電流。更有甚者，P 層乃在磊晶的後期形成，因此離藍寶石介面較遠。當藍寶石由長晶的溫度（如 1,000°C）冷卻後收縮，因其收縮量比 GaN 大，介面的 GaN（即 N 層）會被壓緊，但離介面稍遠的 P 層則因 N 層壓縮而張開。半導體為脆弱的陶瓷，雖可承受極大的壓力，卻易在張力下破裂。P 層的 GaN 晶格內的缺陷（如差排）因此容易延伸。藍光 LED 的晶圓若要製成 VLED，P 層常隔反光層軟鐳（如 Au-Sn）在 Si 基材上（圖三）。由於鐳層極薄而 Si 的熱膨脹係數甚小，COW (Chips-on-Wafer) 的 GaN 晶格在軟鐳冷卻後收縮較大，這樣會使已受張力破壞的 P 層晶



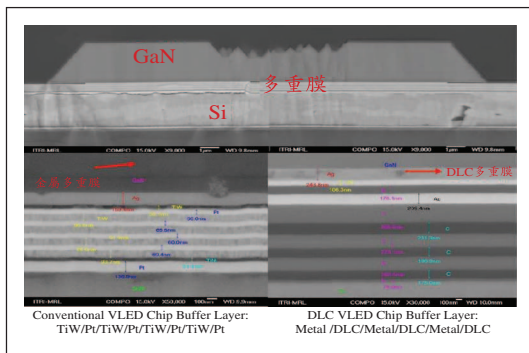
▲圖二 優越的熱傳導率及適中的熱膨脹率使DLC成為提升LED性能最好的材料。藍光LED的GaN可以DLC降低溫度及紓解應力使LED更亮及更持久

格受到二次傷害。VLED也可以CuW為基材，這是複合材料，而W為過量。由於W的熱膨脹係數也比GaN小，所以P層晶格在軟鐸後也會在W接觸之處撐開GaN晶格(圖四)。

製造VLED時，雷射劈離藍寶石基材後，GaN的N層會反彈伸張而壓緊P層，但這時缺陷已難癒合。若要製造LED的覆晶，COW在切成晶片後軟鐸在Si或AlN的Submount上，也會產生相似的問題。所以藍光LED的P層不僅電洞不足，也是缺陷叢生，這是造成藍光LED不夠亮及撐不夠久的主要瓶頸。

鍊鑽科技已開發出LED晶片最頂尖的產品—DLC LED。DLC LED晶片的介面乃以多層DLC消除其應力及加快散熱，這樣就可使LED又亮又耐，也更便宜。

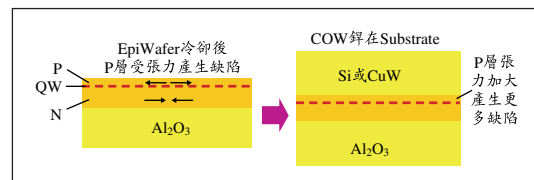
半導體較脆，易受張力拉裂，DLC不僅可以避免LED P層半導體(Mg Doped GaN)受到張力的破壞，更能加大電洞的濃度，有效提高電子和電洞結合的數目，也就是發射光線的強度。



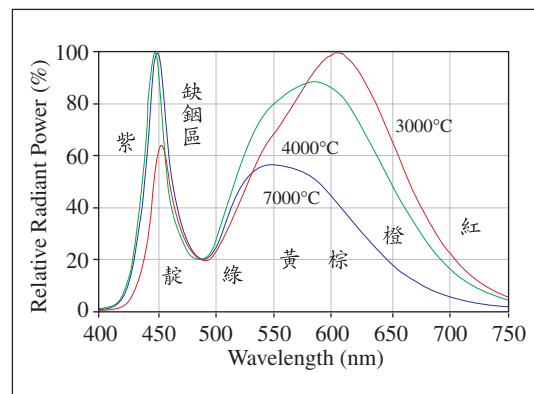
▲圖三 垂直LED乃軟鐸在Si基材上，其介面附近的P層會受張力破壞。多層金屬膜雖可調節介面應力(左下圖)，但多層DLC(右下圖)更可降低MQW的發光溫度，使其在加大功率的負荷下也能正常發光，這樣一顆LED的亮度就可抵多顆使用而降低了光擊(Light Engine)的成本

LED發光效率的瓶頸為電洞的濃度(約 $10^{17}/\text{cm}^2$)，它比電子的濃度(約 $10^{18}/\text{cm}^2$)少了十倍。更有甚者，LED電洞層內的張力會抑制電洞的擴散距離。當LED的P層鐸在AlN襯底(如倒裝的覆晶)或Si基材(如垂直LED)，P層因收縮較陶瓷底大而張開，這樣電洞的濃度就更加不足。DLC的超晶格(Superlattice)在固晶(Die Attachment)後冷卻收縮的幅度比AlN或Si大，所以可以壓住P層，使其內的電洞數目提高及加大電洞行程。除此之外，DLC的超晶格也能橫向散佈電流，解決了P層因電洞不足使電阻增加的問題。DLC還有一項好處，即成為低熔點金屬(如錫)的阻擋層(Barrier Layer)，使鐸料在固晶時不致流竄，造成LED的漏電，甚至短路。

DLC對應力的紓解作用類似非極性



▲圖四 GaN的應力分布，圖示P層在製程中易受到張力破壞



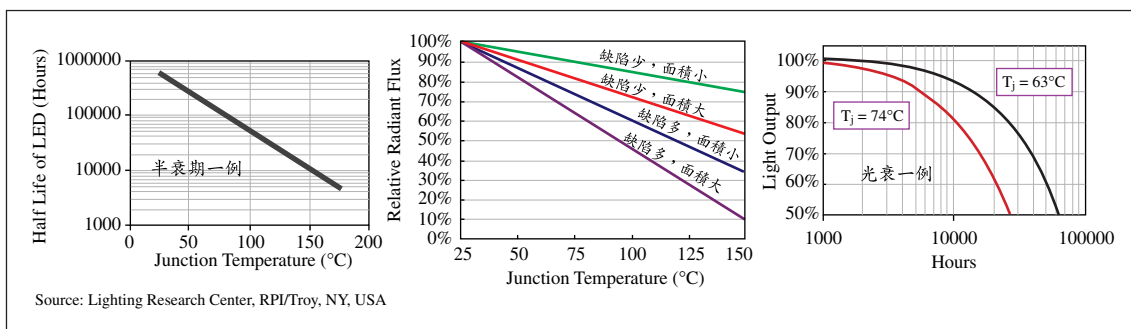
▲圖五 藍黃光組成的白光顏色溫度。圖示因量子井內的銅含量不足使白光失掉綠光的貢獻

(Non-Polar)GaN 的功能。非極性 GaN 可消除六方晶系(Würtzite)GaN 的壓電效應(Piezoelectric Effect)。壓電效應使電子在量子井(Quantum Well)內不易落在電洞內，這樣就少有光子射出，反而產生較多熱量。DLC 降低了 GaN 晶格的壓電效應，不僅使出光加多，也減少了電流加大的減光(Droop)效應。除此之外，量子井的厚度也可以增加，紓解了量子井內銦原子因太大而塞進不足的問題。DLC 的介面也可以減少 LED 製程的敏感度，使製造 COW 的良率得以提高。除此之外，LED 晶片因量子井太薄而產生藍光波長的敏感跳動也可以減少。換言之，LED 切割(Dicing)後的可用晶片數量也能顯著增加。

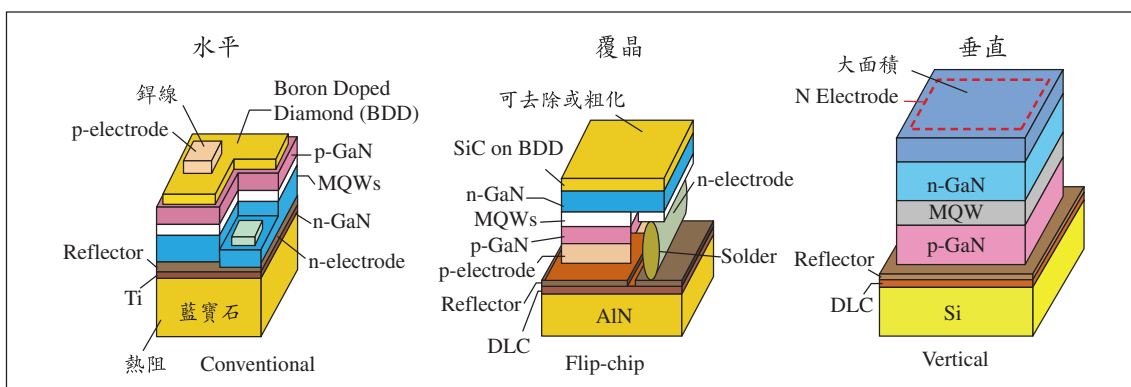
LED 的溫度傷害

LED 的白光主要乃由 LED 的藍光激發螢光粉的黃光組合生成，而色溫乃由兩者的強度決定。因 GaN 的能隙(Band Gap)太大、波長偏短，以致降低了螢光粉發光的效率。如果 GaN 能加入更多的銦(In)，就可使白光更自然而發光更有效(圖五)。但銦原子太大，只能加到約原子比 20%，以致 LED 的內部量子效應受到限制。

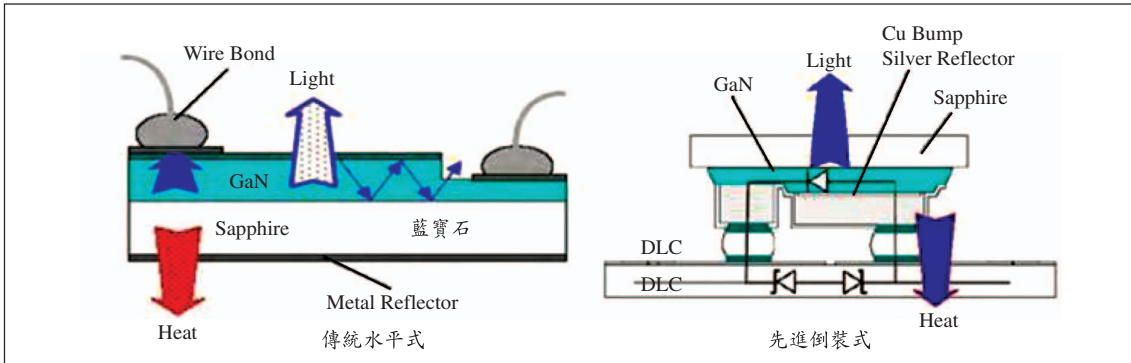
LED 發光最大的傷害來自晶片生熱使溫度上升。電流產生的電阻發熱不僅使 LED 不夠亮，更可能使其逐漸暗淡。通常 LED 發光 6,000 小時後亮度會減少 6%，但隨著電流的增加，光衰的速率會加快(圖六)。



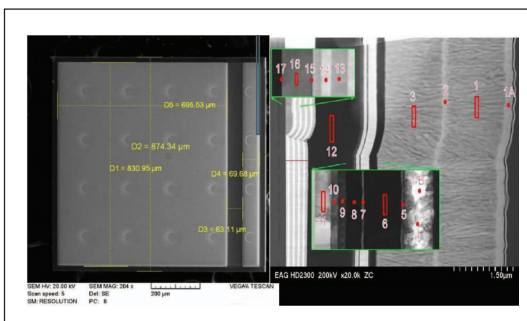
▲圖六 LED 相對亮度隨介面溫度提高而衰減的趨勢。GaN 的缺陷越多(差排密度 $>10^9/cm^2$)或晶片越大($>1\text{ mm}$)，光衰的速度就更顯著



▲圖七 LED 的三種設計的示意，圖示 DLC 做為基材的介面，可有效冷卻覆晶及 VLED



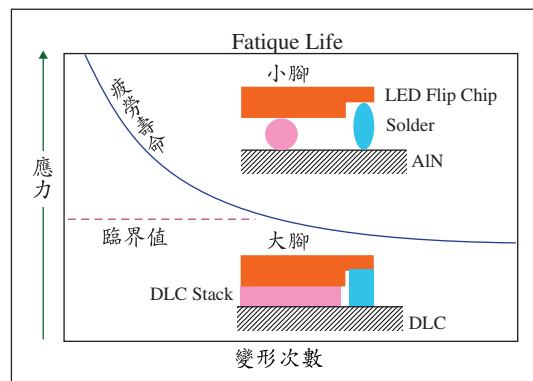
▲圖八 倒裝LED因沒有藍寶石阻隔，所以發熱可以快速移除，因此LED的介面溫度較低，發光的亮度就可以提高。上圖中DLC可同時被覆在晶片端及電路板，不僅可取代昂貴的陶瓷襯底，而且可以散熱更快。除此之外，價格還會降低



▲圖九 C Company覆晶複雜的設計，具有孔洞電極，以致成本不易降低

LED 的封裝

LED 的封裝有三種型式（圖七），其中水平式乃以生長 GaN 的藍寶石為襯底。這種傳統設計已大量外移至中國大陸生產。因藍寶石為熱阻材料，水平式 LED 發光的溫度偏高，所以光衰快速，故通常以便宜的小晶片銷售。近年來 LED 改以覆晶方式 (Flip Chip) 連接散熱較快的 AlN 做為襯底 (Submount) (圖八及圖九)。較大的晶片 (大功率) 則宜以垂直的封裝直接軟鐸 (如 Au-Au 或 Au-Sn) 在矽基材上。



▲圖十 倒裝LED以DLC為雙重介面（一面導電，一面絕緣），不僅發光溫度較低，而且可以不需昂貴的陶瓷(AIN)襯底(Submount)，所以成本反而可以更低。除此之外，DLC LED因介面應力較小，所以延長了LED的使用壽命

覆晶的散熱雖然較快，但 AlN 的熱傳導率仍低，因此仍難以加大電流而提高亮度。以 DLC 被覆在覆晶的正負極表面，再軟鐸 (Solder) 於另一層 DLC 的電路板 (PCB) 上，這樣就可以顯著降低介面溫度及應力 (圖十)。這種 COB (Chip on Board) 設計不僅可增加光擊 (Light Engine) 的亮度及壽命，也能降低製造的成本。☒ (待續)