

新型主動式散熱高功率 LED 封裝

A Novel Active Cooling for High Power LED Package

戴明吉 M. J. Dai¹、劉君愷 C. K. Liu¹、余致廣 C. K. Yu²

工研院電光所(EOL/ITRI)¹ 副工程師、² 工程師

摘要

高功率(High Power) LED 的散熱問題越來越嚴重，傳統的被動及主動散熱方式效能有限，使得超高功率的 LED 模組應用受到限制，在照明效能需求越來越高的趨勢之下，新的高效散熱方式成為重要的技術方向。本文介紹新的主動式散熱方式，利用晶圓級封裝(Wafer Level Package)的設計及製程技術，將熱電元件整合於高功率 LED 模組中，不但改善傳統熱電元件的應用效能，也大幅提升高功率 LED 熱傳、光學及電性效能。

Abstract

A novel active cooler integrated with high power light emitting diode (LED) was investigated in present study. The silicon-based TE cooler herein is fabricated by MEMS fabrication technology and flip-chip assembly process that is used for high power LED cooling. An electrical-thermal conversion method is used to estimate the junction temperature of LED. Moreover, the Integrating Sphere is also carried out to measure the light efficiency of LED. The thermal images photographed by infrared camera demonstrated the cooling function of the silicon-based TE devices. The results also show that the high power LED integrated with silicon-based thermoelectric cooler package can effectively reduce the thermal resistance. Besides, the light efficiency of the LED will increase under low TE cooler input power, which is about 1.3 times of that without TE cooler packaging.

關鍵詞 /Key Words：高功率發光二極體(High Power LED)、主動式散熱(Active Cooling)、熱電元件(Thermoelectric Device)

前言

由於高功率 LED 的應用越來越廣，因此對於設計技術的需求也越來越迫切，但由於發光效率的限制，目前約有

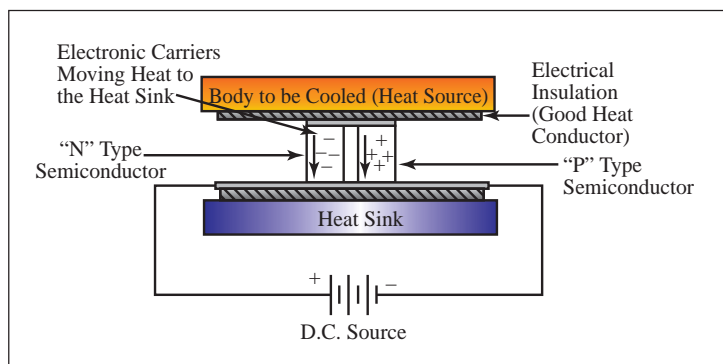
80% 左右的輸入能量會轉變成熟，所產生的熱若不能有效被帶走，會造成元件發光效能降低及可靠度下降等不良影響，因此散熱設計是高功率 LED 非常重要的課題^(1,2)。基本上自然對流是成本最低及可靠

度最高的散熱方式，因此在 LED 的模組設計上，儘量要求以自然對流方式散熱，然而由於高功率 LED 的發熱密度過高，自然對流的散熱方式能力有限，因此在高瓦數的 LED 模組散熱應用設計，例如汽車頭燈及投射燈等超高亮度照明應用時，勢必要考慮散熱能力更強的強制對流散熱方式，尤其在散熱面積有限的狀況下，自然對流的方式往往無法滿足需求，因此如何在成本考量下，設計出壽命高、體積小及耗電低的 LED 主動式散熱模組，在散熱設計上是當前非常急迫的課題。目前常用的氣冷式散熱模組主要由風扇及散熱片組成，可將高功率 LED 模組的溫度有效降低，但是散熱效能有限，對於 LED 無法提供快速且較大的溫降以及溫度控制，因此整合熱電元件的高功率 LED 應用便成為重要的發展方向。

熱電元件是一種熱泵 (Heat Pump)，其優點是沒有滑動部件，壽命長及體積小，且可做溫度控制等。應用在一些空間受到限制、可靠性要求高、無致冷劑污染的散

熱場合。熱電元件的工作原理如圖一所示，當一塊 N 型半導體材料和一塊 P 型半導體材料聯結成電偶對時，在這個電路中接通直流電流後，就能產生能量的轉移，電流由 N 型元件流向 P 型元件的接頭吸收熱量，成為冷端；由 P 型元件流向 N 型元件的接頭釋放熱量，成為熱端。此種固態的冷卻裝置非常適合同樣是固態的高功率 LED 設計，具有大幅快速降溫甚至溫控的功能，對於高功率 LED 的亮度及色彩來說，有很大的提升效用。然而目前的熱電元件有其應用限制，會降低高功率 LED 的應用，例如耗電及造成額外的散熱需求，加上成本也會提升。然而透過熱電元件的散熱結構改善，以及結合散熱模組及熱電元件設計的性能最佳化設計，在一些光源體積小、發光效率高的照明需求上，結合熱電元件的應用已被初步驗證具有不錯的效果^(3,4)。

為了提升熱電元件應用於高功率 LED 的效能，工研院電光所率先結合先進封裝技術，利用 Wafer Level Package 技術將熱電元件和高功率 LED 做整合設計，不但提升高功率 LED 的發光效率，也大幅降低成本，提升熱電元件的效能。由於矽基板熱傳導性高，熱膨脹係數小，大幅增加產品穩定度及使用壽命。也由於以矽為基板，將可透過微機電與微電子製程技術的整合，更加廣泛應用於 LED 等產品的散熱及溫度控制。

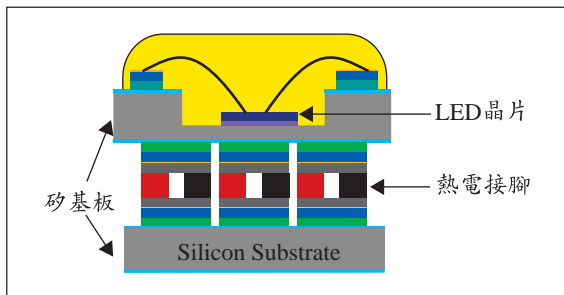


▲圖一 熱電元件原理

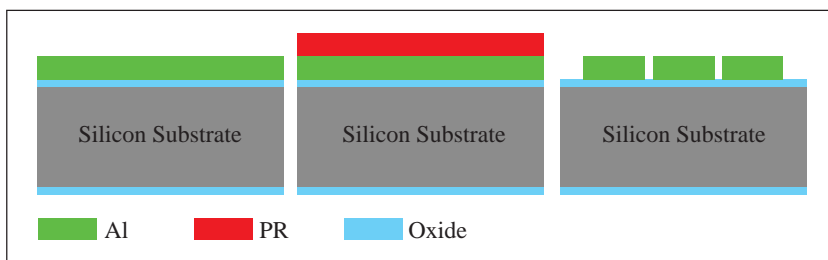
製程及設計

元件之基本架構如圖二所示，包括上下層矽基板及中間之熱電接腳層，上方矽基板的凹槽中則是 LED 晶片。和傳統將熱電元件直接安裝於發熱元件下方不同的是，此一整合的設計將可省去 LED 封裝材料及熱電元件的陶瓷基板以及介面材料，而直接將 LED 熱源置於熱電元件上方，大幅縮短熱傳路徑，提升熱電元件效能。此外，矽基板上的凹槽設計可作為 LED 晶片聚光之用，提升發光效能，而透過矽基板的 Wafer Level 先進封裝製程，更可結合主動及被動元件在封裝之中，將可提升光學及電性的效能。

在製程技術上，主要是採用以微機電



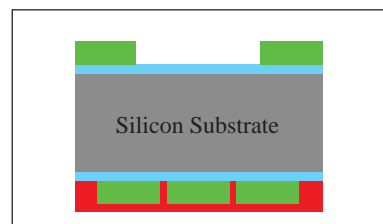
▲圖二 整合熱電之 LED 模組示意圖



▲圖三 上、下板之正面導線加工流程剖面圖

製程技術(MEMS Microfabrication)製作出微型熱電元件之基板，並結合 LED 裸晶及熱電接腳的矽基底熱電元件之製程。首先，利用基材(Substrate)為雙拋矽晶片，並於雙面沉積氧化矽(Silicon Dioxide)。本元件結構可分為上、下兩板，兩者的正面皆為相同的導線圖形(Interconnect Patterns)，上板部分需要執行背面的體加工(Bulk Micromachining)。元件所採用的導線材料，分別為鋁(Al)、鎳(Ni)和金(Au)。接下來於上、下板正面利用熱蒸鍍(Thermal Evaporation)分別於不同矽晶片上沉積鋁製作導線。接著進行曝光顯影製程，將設計的導線圖形由光罩轉換至塗佈之光阻(PR)上。定義後的光阻將成為後續金屬濕式蝕刻的遮罩(Etch Mask)，將導線製作出來(如圖三所示)。上板需另外執行背面體加工，因此要再次執行定義蝕刻圖形之曝光顯影(如圖四所示)。

於上述步驟定義出乾式蝕刻遮罩圖形後，即刻執行乾式深蝕刻，之後以鋁蝕刻液移除乾式蝕刻遮罩，此時正面固化之光阻即可有效地保護正面金屬導線。移除鋁遮罩後，重新以熱蒸鍍方式於乾蝕刻後在

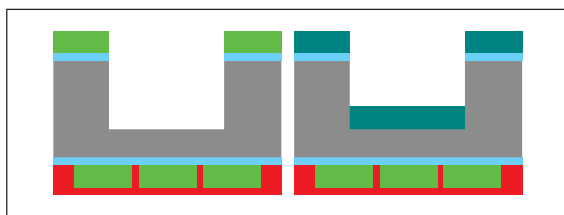


▲圖四 上板背面乾式蝕刻遮罩之加工流程

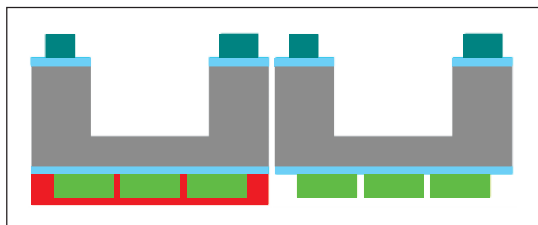
不同晶片上沉積鋁，作為背面導線材料（如圖五所示）。

背面導線仍以曝光顯影及濕蝕刻方式製作出，最後以電漿離子轟擊方式蝕刻正面之固化光阻，達到完全去除為止；執行去光阻後即可完成上板鋁金屬之製作（圖六）。

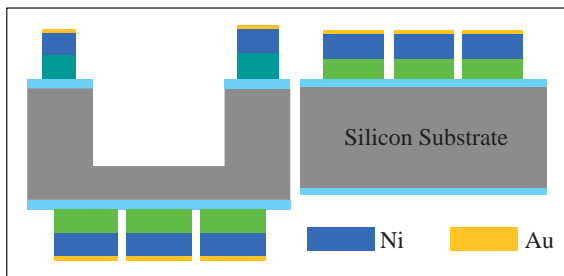
製作完成上下板的鋁金屬定義圖形與背面體加工後，接著進行無電鍍鍍與沉浸金，此即為 Under Bump Metallurgy (UBM) 製程，如圖七所示，其結果如圖八、圖九



▲圖五 上板背面體加工流程圖



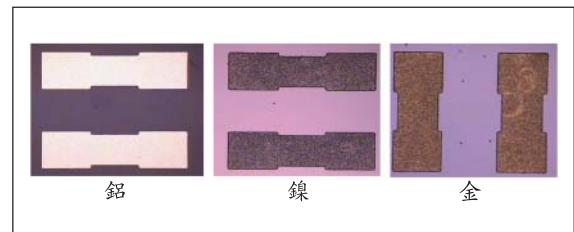
▲圖六 上板導線製作流程圖



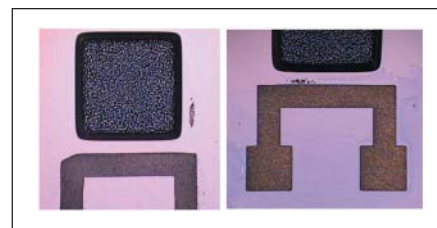
▲圖七 上下板無電鍍鍍與沉浸金製作流程圖

的 OM 圖所示。

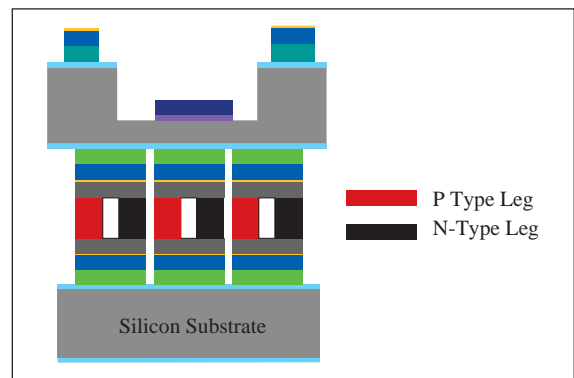
在凹槽內進行高功率 LED 裸晶的導電銀膠黏附，經適當溫度硬化(Curing)接合，接續製程步驟是將錫鉛錫膏利用錫膏印刷(Solder Printing)方式，印刷於矽基板的金屬錐墊上，隨即進行熱電 P/N 材料接腳的放置與上下基板對位組裝（如圖十所示）。隨後過迴焊爐迴焊，完成熱電元件



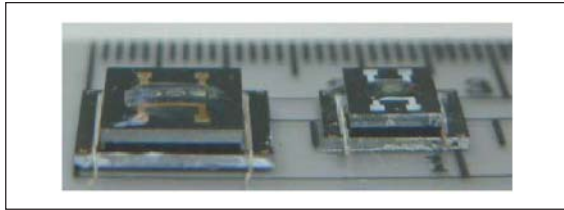
▲圖八 無電鍍鍍前的 OM 圖



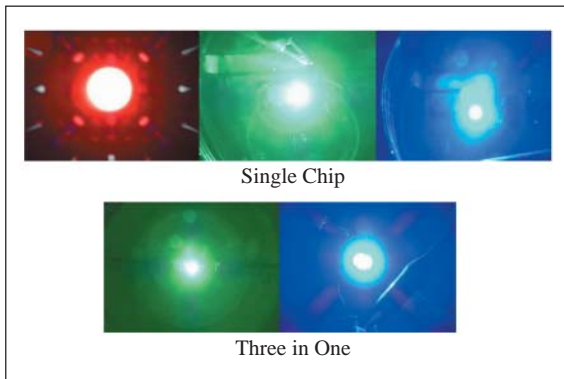
◀圖九 背面體加工旁之鋁金屬無電鍍鍍後的 OM 圖



▲圖十 熱電 P/N 材料接腳放置與上下基板對位組裝



▲圖十一 熱電元件整合高功率LED封裝之雛形照片



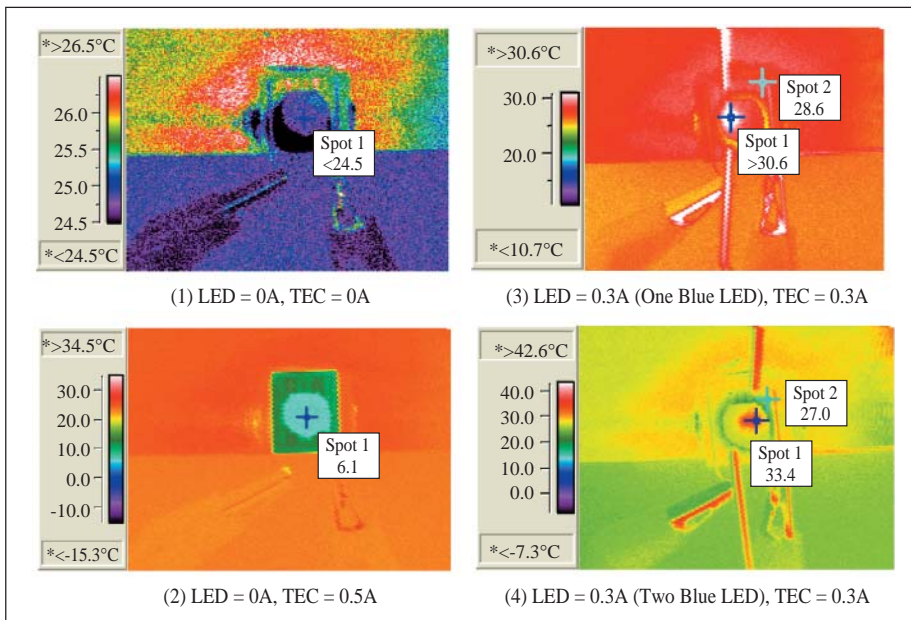
▲圖十二 熱電元件整合高功率LED封裝之開發種類

的設計與組裝，最後將高功率的 LED 裸晶打線及封膠，即完成 Wafer Level Package 的熱電元件整合高功率 LED 之封裝，實際雛型照片如圖十一。而目前電光所開發出的 Wafer Level Package 熱電元件整合高功率 LED 種類，有單晶片(Single Chip)與三合一(Three in One)形式的封裝，如圖十二所示。而在三合一 LED 封裝的電性設計上，除了有單顆各別輸入外，還有兩顆並聯與三顆並聯的設計，甚至與 TEC 外部的電路亦有串連模式的設計。

性能量測結果與討論

為測試此封裝之熱傳特性，利用紅外線測溫儀(IR)做溫度分布的量測，以驗證此封裝技術的效能。當未輸入任何電流時，LED 晶片與基板維持在 24.5°C 的溫度，

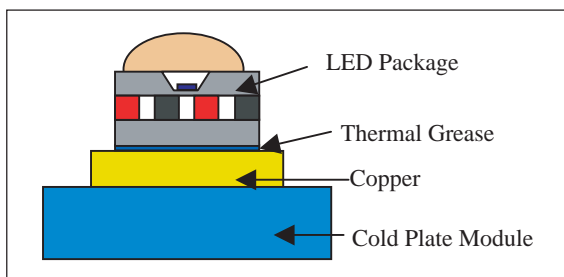
但當只有 TEC 輸入電流時，隨著電流增加，溫度會迅速降低，當電流到達 0.5A 時，晶片溫度大約在 6.1°C 的低溫。然而當單顆藍光 LED 與 TEC 各輸入 0.3A 電流時，可發現晶片與基板溫度差不多都維持在 30°C 左右，接著當兩顆並聯形式的藍光 LED 與 TEC 各輸入 0.3A 電流時，基板溫度低



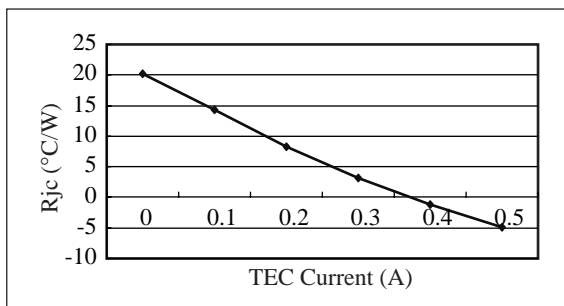
▲圖十三 紅外線測溫儀量測溫度分布 (彩色圖片請見目錄頁)

到接近 27°C，如圖十三所示，甚至三顆並聯形式的 LED 也是差不多相同的情況，這是因上基板 LED 產生的熱被 TEC 均勻強制抽至下基板，而使上基板溫度能維持在較低的溫度。

在熱阻量測上， R_{jc} 定義為晶片接到封裝表面的熱阻值，量測時使晶片熱量儘可能全部由封裝的 Case 傳遞，可作為評估散熱片的性能，其量測示意圖如圖十四。當三顆並聯形式的藍光 LED 輸入 0.3A 電流時，且定義 Case 的溫度是在此封裝的下基板處，其 Temperature Sensitive Parameter (TSP) 曲線如圖十五所示，隨著 TEC 的電流增加 (0.1~0.5A)，其 R_{jc} 的熱阻值如圖十六所示，從 20°C/W 降到



▲圖十四 R_{jc} 量測示意圖

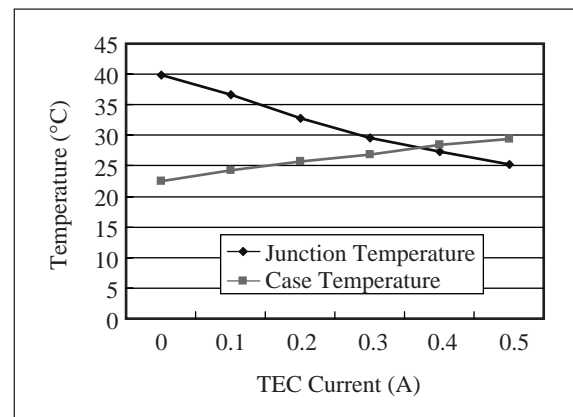


▲圖十五 R_{jc} 隨 TEC 電流變化趨勢圖

-4.8°C/W，會有負的熱阻值產生。從圖十六可以看出，TEC 電流增加時，會使 Junction 溫度從 40°C 降到 25°C；但 Case 的溫度卻是從 22.5°C 升到 29.4°C，這是因為 TEC 把 LED 的熱從上基板冷端抽到下基板熱端，導致下基板的溫度也跟著提升。

光學特性量測上，使用有溫控功能的積分球來量出此封裝的光通量，當兩顆並聯形式的藍光 LED 輸入 0.3A 電流，隨 TEC 的電流增加，其光通量也隨之增加，每提升 0.1A 大約有 0.5 流明的光通量增加，若與圖十七做比較可發現，當封裝結構的熱阻值較低時，其光通量也會跟著提升，證明較低的 Junction 與 Case 溫度，可使 LED 產生較大的光通量。

比較此封裝結構有無整合 TEC 情況的發光效率 (η)，是利用單顆的藍光 LED 外部電路有無串聯 TEC 來做評估，結果如表一所示，當 LED 的電流從 100mA 增加到

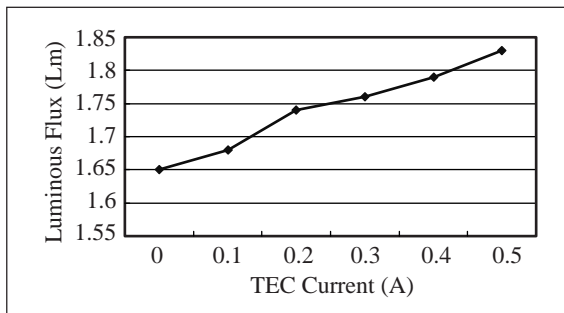


▲圖十六 Junction 及 Case 溫度隨 TEC 電流變化趨勢圖

▼表一 有無整合 TEC 封裝之發光效率比較表

封裝形式 電流大小	LED	LED+TEC (P1+P2)	LED+TEC (P1)
100mA	$\eta=1.527$ (Lm/W)	2.590 (Lm/W)	2.715 (Lm/W)
150mA	$\eta=1.616$ (Lm/W)	2.012 (Lm/W)	2.155(Lm/W)
200mA	$\eta=1.499$ (Lm/W)	1.988 (Lm/W)	2.209(Lm/W)
250mA	$\eta=1.401$ (Lm/W)	1.717 (Lm/W)	1.950(Lm/W)
300mA	$\eta=1.333$ (Lm/W)	1.611 (Lm/W)	1.877(Lm/W)
350mA	$\eta=1.251$ (Lm/W)	1.390 (Lm/W)	1.635(Lm/W)

註：P1+P2為LED加TEC所消耗的功率，故此發光效率是除以P1+P2；P1為單純只算LED消耗的功率，故其發光效率是只除以P1



▲圖十七 光通量隨 TEC 電流變化趨勢圖

350mA 時，若只有單顆 LED 且沒有 TEC 的情況，發光效率會隨電流增加而減少，導致此結果是因為電流增加，使得溫度影響逐漸顯著所造成；但當串接 TEC 之後，在低電流(100mA)之際，在只算 LED 的消耗功率下，發光效率比無整合 TEC 時增加 78%，若有加算 TEC 的消耗功率，其發光效率也增加 70% 左右。隨電流的增加，有整合 TEC 時發光效率雖增加幅度變小，但相對於無整合 TEC 的封裝結構，還是提升大約 3 成左右，證明此封裝結構有大幅提升高功率 LED 發光效率的效果。

結 論

樂金依諾特(LG Innotek)及樂金電子(LG Electronics)技術院於 95 年 12 月發表新聞稿，宣稱共同開發出全球首創用來封裝發光二極體用晶圓級封裝技術，除了製程單純化外，亦可一次同時封裝上千顆 LED，以降低成本。

此外，最重要的是此技術使用熱傳導性高的矽基板，以降低輸出電力高的 LED 發熱程度⁽⁵⁾，這是新一代的 LED 封裝技術趨勢。工研院電光所所開發的整合熱電元件之高功率 LED 模組散熱技術，不但具備上述優點，更重要的是，此封裝結構解決了高功率 LED 的散熱問題，並提升了 LED 的發光效率，在熱傳與光學特性上可說是一舉兩得的 LED 封裝技術。未來將針對不同應用進行設計，同時也進一步利用 Wafer Level Package 製程整合元件設計，以縮小元件尺寸，提升應用效能。☞

參考資料

1. <http://www.lumileds.com/>
2. <http://www.osram-os.com/>
3. J. H. Cheng, C. K. Liu, Y. L. Chao, R. M. Tain, "Thermal performance of silicon-based thermoelectric device on high power LED", ICT2005, 2005
4. J. H. Cheng, C. K. Liu, C. K. Yu, "Thermal management applications of miniature silicon-based thermoelectric device", ISMNT-2, 2006
5. <http://www.digitimes.com.tw/>