

點亮未來—— LED 照明

■ 康智傑

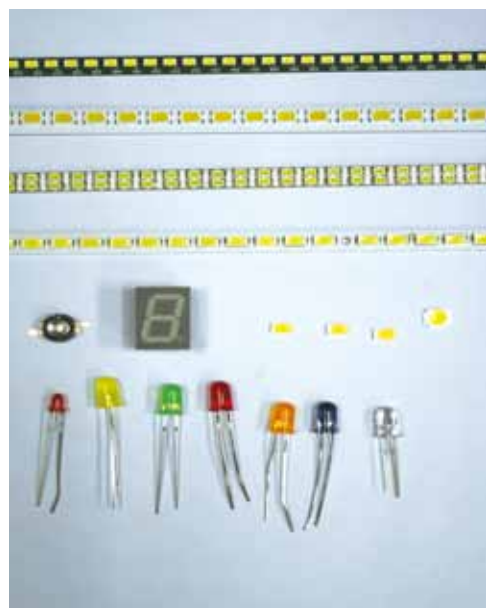
LED 終將超越其他的人工光源，
獨領風騷，大放光明。

在油電的喊漲聲中，各行各業莫不叫苦連天，但觀察到有一類商品賣得出奇的好，部分型號甚至出現缺貨現象，那就是輕鋼架 LED（light emitting diode，發光二極體）燈具。一個動輒 3,000 ~ 4,000 元的 LED 燈具，怎麼那麼多人買得下手？而連帶的，做為其主要元件之一的電源供應器也出現了供貨緊俏的情形，有些廠牌在電子材料行竟也買不到。這雖出乎一般人的想像，但隨著電價的高漲，在荷包縮水的狀況下，似乎人們已經開始算計著如何才能真正地省錢。

似曾相識的場景又發生了，政府在繼兩波總額 14 億的節能家電補助後，經濟部又將推出 10 億的 LED 照明補助方案，預計補助家用 LED 燈泡半價。這可望把目前每顆單價高達 300 ~ 600 元的 LED 燈泡降為 150 ~ 300 元，這不僅使得 LED 燈泡在價格上足以跟平均單價 100 元的緊密型螢光省電燈泡（compact fluorescent lamp, CFL）抗衡，且可提高一般人對 LED 燈泡的接受度。

雖和過去一只售價僅 20 ~ 30 元的白熾燈泡相較，價格仍相當高，但可預期的是，它將可大幅提升國內 LED 燈泡的滲透率，更進一步減少整體家庭用電。

其實為了節能減碳，早已有多個國家實施類似的補助方案。以日本為例，自 2009 年起已陸續實施了兩期的 Eco-point 節能家電補助。目前日本的 LED 燈具滲透率雖尚不足 30%，但預計在 2015 年可把 LED 燈具滲透率提升至 50%。



各種樣式的 LED 和 LED 燈條

這對經歷 311 核災，朝全面廢核邁進的日本而言，是非常重要的第一步。其實根據統計調查，日本的高 LED 燈具滲透率並非全然是基於政府的補助，而是一般民眾經歷核災後環保意識的覺醒。

在美國推行的 CFL 節能燈泡補助，因 CFL 節能燈泡的色溫（color temperature, CT）（註 1）和價格都較白熾燈泡高，且民眾的環保意識還不夠強烈，雖然電廠免費贈送 CFL 節能燈泡給一般用戶，但 CFL 節能燈泡在美國的滲透率始終難以拉高，近幾年來一直維持在 20% 上下。

當然，日本的政策性補助 LED 燈具和美國多年來一直推動的 CFL 節能燈泡補助，無非是希望減少用電量，以避免新建電廠所需的龐大投資。

依據能源局估算，台灣在民國 101 年照明用電高達 260 億度，約占台灣總體用電量的 10% 以上。這已較數年前未開始限制（禁用）白熾燈泡時，照明用電約占總體用電的 15 ~ 20% 已改善不少。事實上，在節能減碳的措施上，自民國 97 年起，政府已開始實施為期 5 年的「585 白熾燈汰換計畫」，短期是以 CFL 省電燈泡取代白熾燈泡，長期則以 LED 做為主要的照明燈具。

去年（2012 年）開始，它更正式進入第二階段，凡消耗功率 25 瓦以上的白熾燈泡，未符合發光效率基準的，不得進口或銷售。因此，市面上幾乎已買不到白熾燈泡了。雖然廠商也開發出符合上述法規的改良型白熾燈泡，但事實上，政府的政策等於宣告白熾燈泡時代的結束，即使不至於完全消失。

然而台灣地處亞熱帶，白熾燈泡的使用比率和國外相比本來就不高，螢光、日光燈反而是消費者使用的最大宗。目前正風行以 T5 省電燈管取代舊有的 T8/T9 燈管，

但不管怎麼樣，它們都含有汞，違反環保的精神。其實，歐盟的危害物質禁用指令（Restriction of Hazardous Substance, RoHS）雖給含汞螢光燈管留下一線生機，但如同各國政府在政策上限制白熾燈泡的使用，等於宣告白熾燈泡的末日一樣，螢光燈管最終還是得從歷史的舞台上黯然退場。

依據上述，對從事 LED 研究、製造、銷售和關心 LED 發展的人士而言，只不過是依劇本演出的戲碼罷了。因為依據 LED 的技術發展藍圖，它終將超越其他的人工光源，獨領風騷，大放光明。

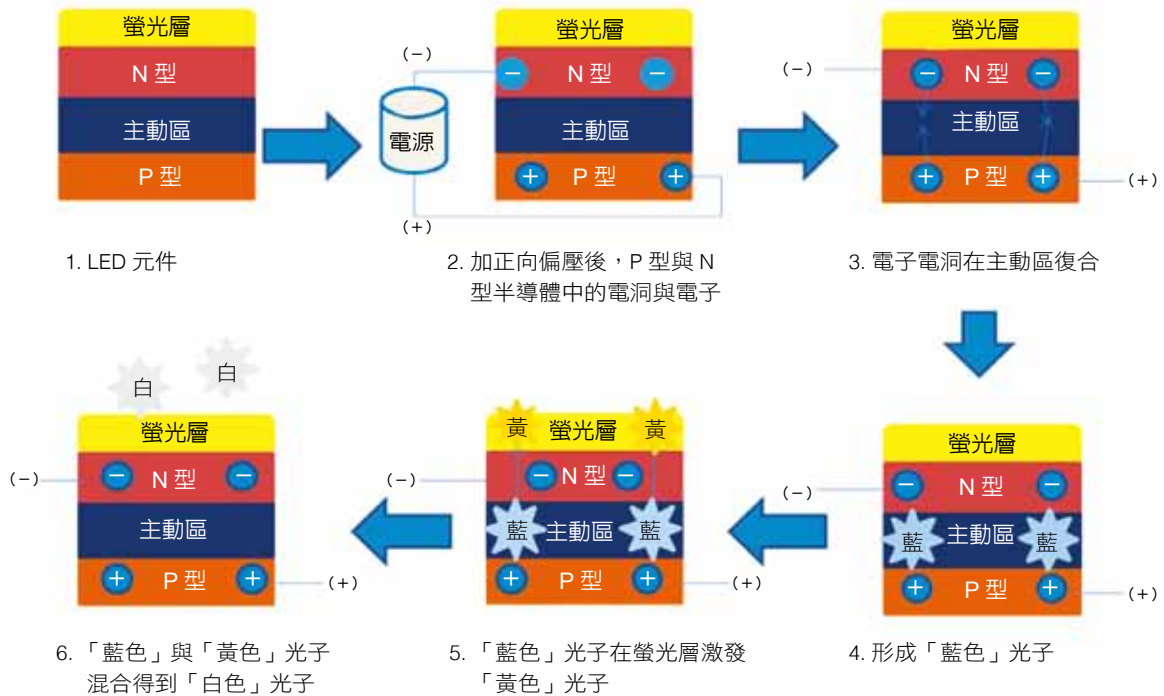
發展與前景

LED 是一種會發光的二極體半導體元件，它是由 P 型和 N 型兩種半導體結合而成，可使通過的電流藉由 N 型半導體中的電子和 P 型半導體中的電洞，在 PN 接面的主動區內復合，部分轉換為光，當然在這過程中也會產生熱。早在上世紀初，就已發現這種電致發光現象，比愛迪生白熾燈的發明僅晚了不到 30 年，但 LED 商業化的腳步卻落後甚多。

第一顆實用的 LED 是單色紅光 LED，是在 60 年代初期開發成功的。再經數年的功夫，直到 60 年代末期，第一顆商用單色紅光 LED 才正式問市，但其總出光量僅有 0.0001 流明（lumen, lm）（註 2）。

早期的 LED 單價高達一、兩百美元且效率不佳，因此鮮有商業上的應用。但隨著大量生產技術的開發完成，LED 單價開始大幅下降，雖出光量仍僅有幾個毫流明（mlm），但在商品上的應用已漸漸展開，用於指示燈、早期的口袋型計算機和電子手表中的數字顯示，LED 慢慢地滲入人們的日常生活中。

在整個 70 年代，橫跨 80 年代直至 90



白光 LED 的工作原理

年代中期，LED 技術的發展是出光量和發光效能（註 3）不斷地提升。例如，出光量 3 流明的單顆紅光 LED 的發光效能可達每瓦 25 流明，已可應用在汽車煞車燈和室外的（廣告）看板上。比起傳統的白熾燈每瓦 10 ~ 15 流明，其實在出光效率上已勝出了。

不同色彩的 LED 也陸續加入了照明的行列—淡黃色、綠色、藍色等。而事實上，讓 LED 往照明跨出一大步的是高亮度藍光 LED 的發明，亮度可達 1 燭光（candela, cd）（註 4），這讓 LED 照明不再是夢想，它變得觸手可及，並將進入每個人的生活中。

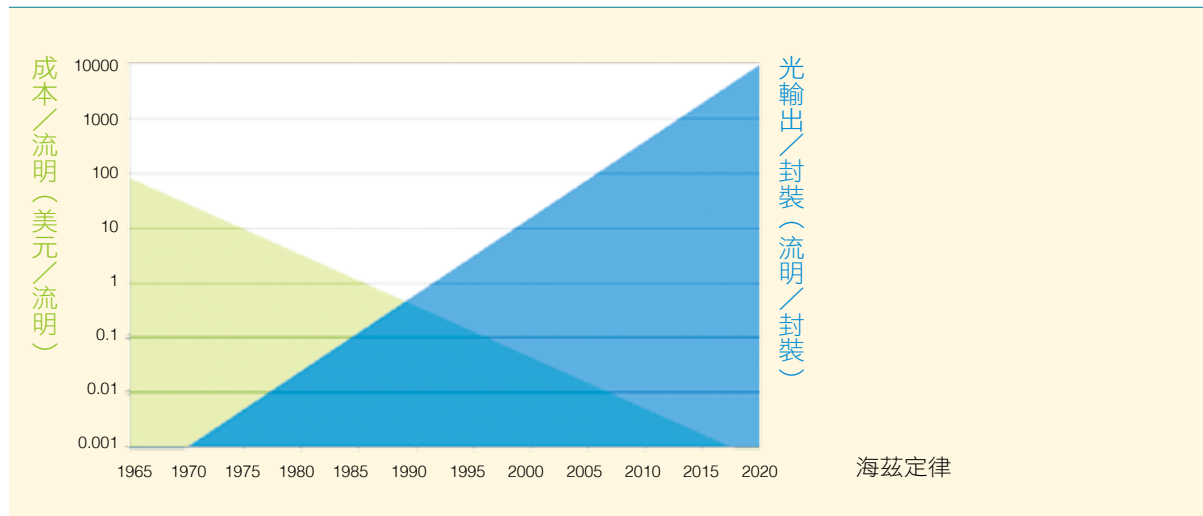
從 90 年代中期白光 LED 的發明直至今日，所發生的是白光 LED 技術的持續發展和它在照明上的應用。依生成的方式，白光 LED 主要可分成兩大類：由紅光、綠



利用紅色（R）、綠色（G）、藍色（B）LED 進行混色。

光與藍光三種單色 LED 直接混色，和由藍光或紫外線 LED 直接激發黃色螢光物質。這兩種方式互有優缺點，但單以出光效率來說，以螢光物質為基礎的白光 LED 事實上較三原色混色 LED 為佳，更適合於白光照明的應用。

相較於白熾燈泡和緊密型螢光省電燈泡等人工光源，LED 燈泡具有非常高的出光效能、使用壽命長、不含汞等優勢。



而最近一、兩年來的發展是，美國 LED 大廠於 2010 年已成功開發並銷售出光亮度高達 1,000 流明的白光 LED，它在 3 安培工作電流下的出光效率是每瓦 100 流明，當工作電流是 350 毫安培時，發光效能是每瓦 160 流明。2011 年，這家廠商又使白光 LED 的出光效率往上提升，當工作電流是 350 毫安培時，發光效能是每瓦 231 流明。最近又繼續突破技術瓶頸，把白光 LED 的發光效能提高到每瓦 254 流明，這已慢慢逼近它的理論極限值—每瓦 300 流明。

隨著材料和製程的不斷改良，LED 的出光量和發光效能也不斷突破。依據海茲定律 (Haitz's law)，過去 40 年來，LED 出光量 (流明) 約每 18~24 個月可提升 1 倍，在往後的 10 年內，預計出光量可以再提升 20 倍，而單位成本 (美元 / 流明) 將降至現有的 1 / 10。

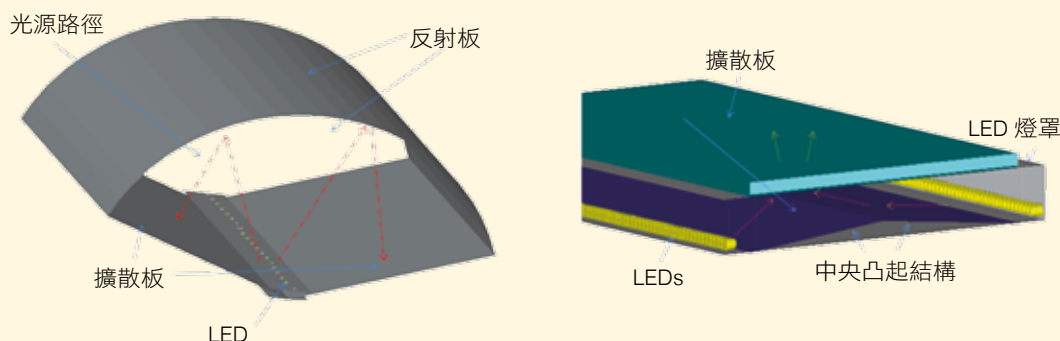
其實近幾年來，單顆封裝 LED 的出光量提升的速度已較海茲定律所預測的快，目前市面上已有超過 10,000 流明的產品。

因此隨著時間的推移，LED 的效能會變得更好，價格也會更便宜。當 LED 的平均單價逼近現在白熾燈泡的價格時，一般民眾會更樂意購買。

LED 照明

在未來 LED 照明燈具市場中，LED 燈泡和輕鋼架 LED 燈具會成為大宗。LED 燈泡終將取代過去白熾燈泡和現在 CFL 省電燈泡在照明上所有的應用，輕鋼架 LED 燈具則會繼 T5 燈具後成為辦公室和工廠照明的主流，有機會在台灣取代目前各場所 (含居家) 的螢光日光燈具。其他諸如 LED 嵌燈、LED 枱燈、LED 飾燈等在市場上也不會缺席。

LED 燈泡 白熾燈泡較其他人造光源有更好的演色性，演色指數 (color rendering index, CRI) 可高達 99。演色指數是指物體在人造光源照射下，所顯現的色澤和在陽光照射下所顯現色澤的差異。演



高效率空腔 LED 燈具

色指數值越高，被照物體就越能顯現其本來的色澤。

然而白熾燈泡通電後產生的能量，有 90% 轉換成熱而浪費掉了。傳統的 100 瓦白熾燈泡，放出熱量就高達 90 瓦，相較於發出相同亮度的 26 瓦 CFL 省電燈泡所產生的 15 瓦熱量多出 6 倍。而對比之下，現今一低於 12 瓦的 LED 燈泡就可產生同等的亮度。因此相較於白熾燈泡和 CFL 省電燈泡等人工光源，LED 燈泡具有非常高的出光效能、使用壽命長（可達 50,000 ~ 100,000 小時）、不含汞等優勢，使它成為未來照明的不二選擇。

輕鋼架 LED 燈具 辦公室或工廠用的大尺寸燈具的光源，目前仍有許多是使用傳統的 T8/T9 日光燈管，但有越來越多人改用較省電的 T5 燈管。T5 燈管的確有很多優點，比如使用壽命長（達 20,000 小時）、發光效能高（約 90 lm/W）、出光量大（14W, 1,250 lm）、演色性佳（CRI 達 85 以上）、單價低等，似乎唯一也是最大的缺點是使用汞，不符合愛地球的環保理念。

輕鋼架 LED 燈具目前分為兩大類：一是直下式，架構和輕鋼架日光燈管燈具相同，只不過光源是採用 LED 燈管，大部分



輕鋼架 LED 燈具

由數十至數百顆 LED 沿直線排列而成；另一是 LED 平板燈具，基本上它是由液晶顯示器中所使用的光源一側光式 LED 背光模組直接演化而來。在 LED 平板燈具的架構中，需有一塑膠材質製作的平板導光板來導引光，並使它均勻出光。其優點是厚度薄，但出光效率僅約 50 ~ 60%。

相對於側光式光源具導光板的 LED 平板燈具，為能提升 LED 燈具的整體出光效率，近來也有幾款空腔式無導光板 LED 燈具的設計。它們都是利用反射底板進行初步配光，再經擴散板出光，都標榜高出光效率。比如美國 LED 大廠的 CR 系列 LED 燈具和筆者的研究團隊所設計的多邊形空腔式側光式 LED 燈具，兩種方式的出光效率都可達 90%。

其中 CR 系列 LED 燈具著眼於一般直

下式 LED 燈具一直有出光均勻性不佳，容易產生眩光的缺點，把 LED 置於燈具下方，朝上方反射底板出光。經底板反射後的光線再經擴散板均勻出光，就可得到一個非常均勻的高品質 LED 光源。整個想法相當簡單但高明。

筆者的研究團隊在輕鋼架 LED 燈具上的思維，則是針對 LED 平板燈具出光效率難有效提升（約 50 ~ 60%），和有一塊看似不可缺少但又有那麼一點笨重的導光板，如能取代甚至移除它，並妥善控制出光的均勻性，應可大大提高出光效率，得到非常均勻的高品質 LED 光源。當然除了以上所提到的兩種設計思維外，未來在市面上應會出現其他類型的高品質、高效能 LED 燈具的設計。

LED 智慧照明

「開燈！亮一點！再亮一點！暗一點！稍微亮一點！好！」檢視場景，房間中僅有一人，看似自言自語，但房間中燈光的亮度已在這短短的時間內變化多次了。這僅會出現於未來科幻片的情景，很有機會在未來幾年內出現在你我的日常生活環境中，不再是科幻，也不再是夢想。無論是擊掌、彈指或是語音都可當成聲控照明的訊號，當然，動作也可成為控制照明的訊號。

而以上只不過是涵蓋目前正如火如荼發展的智慧照明中的一部分，它是現在進行式，不是未來式。想像一下！照明可隨



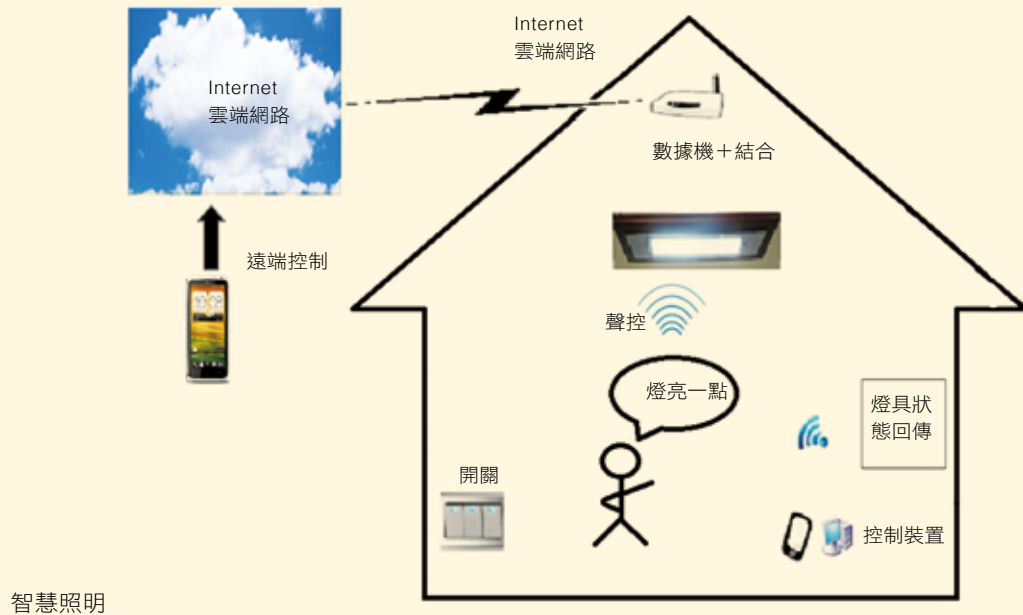
側光式環形空腔 LED 燈具的雛型

心情轉，這當然是在更遙遠的未來才會出現的。

其實只要結合網路和智慧型手機，舉凡燈具亮度、色度調控、遠端用電監控等，都可以很容易地建構在以 LED 技術為基礎的智慧照明應用上，這是白熾燈泡無法辦到的，甚至連 CFL 省電燈泡也無法比擬。台灣的 LED 產業規模是世界第一，在智慧照明的發展上自是不落人後，目前已訂出智慧照明系統產業標準，這不僅可帶動國內智慧照明產業的發展，也能加速推廣智慧照明技術的應用。

今天的 LED 照明還稱不上普及，若以成本效益的角度來看，長時間使用照明的場合，例如路燈、交通號誌、24 小時作業的工廠、賣場、百貨公司、飯店等場所，因投資回收時程較短，較易推廣。但家用照明，因 LED 售價還太高，消費者仍難接受。可是如延續 LED 技術發展藍圖和高科技產品價格持續下滑的市場法則，加上外

只要結合網路和智慧型手機，舉凡燈具亮度、色度調控、遠端用電監控等，都可以很容易地建構在以 LED 技術為基礎的智慧照明應用上。



智慧照明

在環境，如電價上漲、政府的補助政策、一般民眾環保意識的覺醒等，和智慧照明浪潮的興起，在未來幾年內，LED 照明一定會點亮全世界。

註 1：光源的色溫是對比於理想黑體輻射，當顏色相同時理想黑體的溫度，它是以凱式溫度 (K) 表示，例如白熾燈泡的色溫是 2,800 K。

註 2：流明是光通量 (功率) 的單位，是單位時間內光源的出光總能量。它是人眼所能感覺到的單位時間可見光的出光能量，但並不涵蓋光源的全部出光光譜能量。雖然有些人用流明代表 LED 的亮度，流明數越大，亮度越高。但在實務上，流明並不是直接計算或度量亮度的單位。

註 3：發光效能即電光轉換效率，每瓦消耗的電能所可產生的可見光出光量 (流明)。

註 4：燭光是發光強度單位，相當於一根蠟燭的亮度，是在特定的方向上，單位立體角內光源出光的流明數。傳統上，有人把燭光當作白熾燈泡的亮度單位。同樣地，在實務上，燭光也不是直接計算或度量亮度的單位。

康智傑
南台科技大學光電工程系