

新時代照明光源的發展

陳怡鈞／高雄分局課長

摘要

最近幾年，因著節能減碳的世界潮流，照明技術在節省電力消耗、改善照明品質及符合環保要求等領域上，皆有長足進步。本文探討新式鹵素燈、T5 螢光燈、陶瓷金屬鹵化燈、無極燈、LED 燈等運作原理及技術發展，以掌握照明趨勢。

壹、前言

伴隨著經濟發展，生活水準的提高，人們對照明要求不斷提高。根據統計，我國照明用電佔全國總用電量之 15% 以上，就如此大的用電比例而言，我國在照明用電省能空間極大。另根據 OECD 資料，包括日本在內 16 個先進國家照明用電量佔總發電量之變化趨勢：1960 年為 13.5%；1975 年最高為 14.5%；1995 年降至 12.8%；2000 年降到 12%。雖然照明需求隨著生活品質的提昇與日俱增，而所需電力所佔比例卻逐年下降，此結果主要歸功於高效率照明及節能技術的發展與推動，使照明輸出效率持續增高。

本文探討新時代照明光源的運作原理、新技術發展及趨勢，不僅節能且環保，更能符合使用者對照明需求。與過去照明光源比較，歸納出新照明光源應提供 [1][2][3]：

- 高發光效率，節省能源
- 高演色性 ($Ra \geq 80$)
- 長壽命
- 壽命期間內光束穩定，即高光束維持率

- 符合綠色環保（低環境污染、低諧波失真 harmonic distortion、低電磁干擾等）

貳、針狀燈腳市電型鹵素燈（pin-base，mains-voltage tungsten halogen lamps）

鹵素燈的發光原理就像白熾燈一樣，但鹵素燈玻璃外殼內充有一些鹵族元素。當燈絲加熱時，鎢原子被蒸發後向玻璃管壁方向移動，當接近玻璃管壁時，鎢蒸氣被冷卻到大約 800°C 並和鹵素原子結合在一起，形成鹵化鎢（碘化鎢或溴化鎢）。鹵化鎢向玻璃管中央繼續移動，又重新回到被氧化的燈絲上，由於鹵化鎢是一種很不穩定的化合物，其遇熱後又會重新分解成鹵素蒸氣和鎢，這樣鎢又在燈絲上沉積下來，彌補被蒸發掉的部分。通過這種再生循環過程，燈絲的使用壽命不僅得到了大大延長（幾乎是白熾燈的 4 倍），同時由於燈絲可以工作在更高溫度下，從而得到了更高的亮度，更高的色溫 and 更高的發光效率。

新型鹵素燈在燈泡內鍍上紅外線鍍膜，可將熱反射回燈絲，所以熱保持在燈泡內，意謂較少電能就將燈絲加熱到工作溫度。傳統針狀燈腳鹵素燈，因帶電體異極間過近，容易產生電弧（arcing），因此，一般皆經由變壓器轉換使用在較低電壓。新型針狀燈腳市電型鹵素燈則採用 Bulb pinch 技術，即將燈絲安裝在玻璃圓球內（glass knobs），並內裝保險絲，在燈泡達到壽命終了前，確保電源切斷，以保障安全，所以該型可直接連接市電，因而擴大應用範圍。

和傳統型鹵素燈比較，新型鹵素燈則保有鹵素燈所有優點且無需電源轉接器：

1. 相同的亮度下，所需電能僅為一半。（發光效率相比為 17-20 lm/W 比 10-12 lm/W）。
2. 長壽命（2000 小時比 1000 小時）。
3. 壽命期間保持相同色溫。
4. 體積較小。

參、T5 螢光燈 (T5 fluorescent lamps)

螢光燈照明原理，係利用燈管電流加熱燈絲，激發管內汞蒸氣產生紫外光，進而由塗佈螢光粉發射出可見光，詳細可參考 [4] 說明。所謂 T5 就是直徑為 5/8 英吋（約 16mm CNS7006 螢光燈管用玻璃管編號為 T16）的螢光燈管；T8 直徑為 1 英吋（25mm，CNS7006 編號 T25）；T9 直徑為 9/8 英吋（約 29mm，CNS7006 編號 T29），台灣 95% 的市佔率都是 T9 燈管。

一般而言，螢光燈管內的“冷點”（cold spot）是溫度最低的位置，控制管內的飽和汞蒸氣壓。傳統 T8、T9 燈管的冷點（大約 40°C）位於燈管中央。傳統的 T5 燈管因縮小管徑造成燈管溫度升高，並且改變燈管內理想蒸氣壓而降低光輸出，因此，只有低功率規格，無法作一般照明用。新式 T5 燈管將一端電極往燈管中央移動 1 英吋，使得冷點在電極之後靠近燈管標示處（如圖 1），附近的金屬燈帽溫度接近 43-45°C，可得到最佳的汞蒸氣壓。迨至 1994 年，飛利浦推出高功率 T5 日光燈管，德國歐司朗、美國 GE、日本各廠相繼加入高功率 T5 日光燈管開發的行列並推出產品。從此，T5 螢光燈管正式登上 21 世紀照明產品之主流地位。

新式 T5 技術的優點：

1. 高發光效率 104 lm/W，使得 T5 成為現在最高效率的螢光燈管。
2. 和 T8 比起來，T5 縮短大約 40% 的管徑，降低燈具內因燈管體積產生的陰



圖 1 T5 螢光燈管冷點（cold spot）位置（來源：GE 網站）

影，使燈具產生較高的光輸出，進而提高燈具效率。

3. 使用三波長螢光粉，達到高演色性（Ra 80-90）及良好光束維持率（在光源壽命期間，光輸出大約只降低 5%）
4. T5 比起 T8、T9 可減少使用 38% 的玻璃且其包裝物質可以達到減量 50%。另外，以往 T8、T9 傳統燈管所使用的為液態水銀，而液態水銀在常溫下是以液態呈現，所以當燈管被廢棄時，只要燈管一破裂，水銀立刻以液態進入地下造成污染。而 T5 燈管所使用的是汞合金，在常溫狀態下是固態的方式存在，僅有在燈管高電壓激發的狀態下是呈氣態的，只要燈管一破裂，水銀合金一接觸常溫，即呈固態，所以 T5 燈管的水銀污染機率大幅縮減。

現階段螢光燈管為應施檢驗品目範圍，依據 CNS691 螢光燈管進行檢測，但發光效率與演色性，需符合能源局「螢光燈管能源效率基準」，其依燈管起動類別（預熱、瞬時）、燈管功率、螢光粉（一般、三波長）等有所不同，限制值為 44 至 91 lm/W 及 Ra 為 69-80。民國 99 年 1 月 1 日起，緊密型螢光燈管列入經濟部標準檢驗局公告檢驗範圍，檢測標準為 CNS14576 緊密型螢光燈管，發光效率限制值為 45 至 77 lm/W。安定器內藏式螢光燈泡（俗稱省電燈泡）依據 CNS14125 安定器內藏式螢光燈泡檢驗，民國 99 年 1 月 1 日起實施新的能源效率基準，發光效率提昇至 40 至 65 lm/W 以上。

依據台電的宣導刊物指出：以螢光燈系效率而言，瓦特數相當的燈管，通常「細」的比「粗」來的高（如 T5 效率比 T9 高）；「直」的、「長」的比「彎」的、「短」的來得高（如 T5、T8 之效率比省電燈泡高）。

肆、陶瓷金屬鹵化燈（又稱複金屬燈）(Metal halide lamps with ceramic burner)

金屬鹵化燈的發光元件是一顆耐高溫的電弧放電管，充滿起動氣體（一般為氬氣）、汞及金屬，經由安定器提供比平常供應燈管電壓高的起動電壓（starting voltage），在燈管電流通前，游離電弧放電管中的氣體，氣體幫助

燈泡起動，當蒸氣壓及溫度持續升高時，而金屬加熱達到蒸發點，形成電漿狀態而發射出光及紫外線。有些金屬鹵化燈在燈泡內壁塗佈螢光粉，具有擴散（diffuse）功能，即阻擋紫外線輻射與改變燈泡顏色。

傳統金屬鹵化燈使用探針式（probe-start）起動，（如圖 2）。在電弧放電管內有三個電極，一個起動探針電極及 2 個動作電極。燈管開始起動前，起動電極和其附近的動作電極因間隙小，產生放電狀態，促使電子躍昇至遠端的動作電極，而幫助燈泡起動。一旦燈泡起動，雙金屬（Bi-metal）開關會切斷起動探針電極。

新式的脈波起動（pulse-start）金屬鹵化燈就沒有起動電極。由安定器產生高壓脈波（3 至 5 千伏特），在動作電極兩端應生放電而使燈泡起動。因沒有起動電極，弧光管兩端密封面積可減少，而可減少熱的散失。再者，使用高壓直接加熱電極，可以降低動作電極的濺射（sputtering，[4]）現象而提高燈泡的壽命及效率。

新發展的陶瓷電弧放電管可以比舊式石英（quartz）電弧放電管動作在更

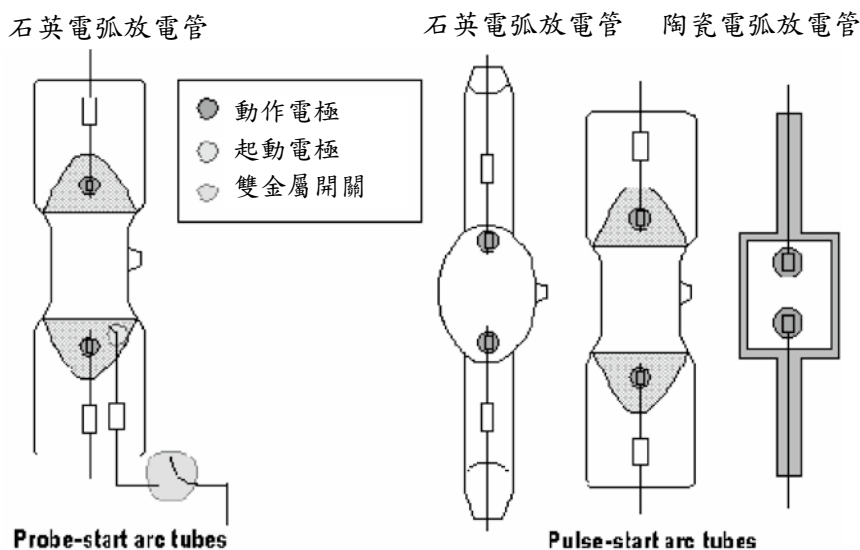


圖 2 金屬鹵化燈 2 種起動方式（來源：NLPIP）

高溫度及壓力，其主要原因為密封技術進步，因工作在高溫及高壓狀態下，使得金屬鹵化燈發光效率及演色性皆提高。

新式的陶瓷可以比舊式石英金屬鹵化燈效率提昇 33%。以 75W 的金屬鹵化燈使用石英電弧放電管（溫白色）效率為 70 lm/W，而 72W 的金屬鹵化燈使用陶瓷電弧放電管（溫白色），則可達 92 lm/W。另外，在壽命週期中，燈泡幾乎保持固定色溫（開始時為 $\pm 150\text{K}$ ，壽命終了為 $\pm 200\text{K}$ ），其變化量肉眼幾乎很難查覺（相對應的舊式金屬鹵化燈壽命終了の色溫變化量達 $\pm 400\text{K}$ ）。

伍、無極燈（Electrodeless lamps）

無極燈（中國大陸稱 LVD 燈）其動作原理和傳統放電燈不同，沒有產生弧光的電極。長方形封閉玻璃燈管兩端有環狀磁鐵蕊（ferrite core），高頻（250kHz）激發電流輸入繞組使磁鐵蕊產生磁場，而磁場在燈管內感應電壓，而激發電子，去碰撞管內汞原子，而產生紫外線，再激發管壁內的螢光粉產生可見光（如圖 3）。磁鐵蕊就像變壓器中鐵心，而燈管可視為 1 圈二次側繞組。[7]

無極燈原始設計是在 MHz 頻率下運作，然而會產生 EMI 干擾，因此，

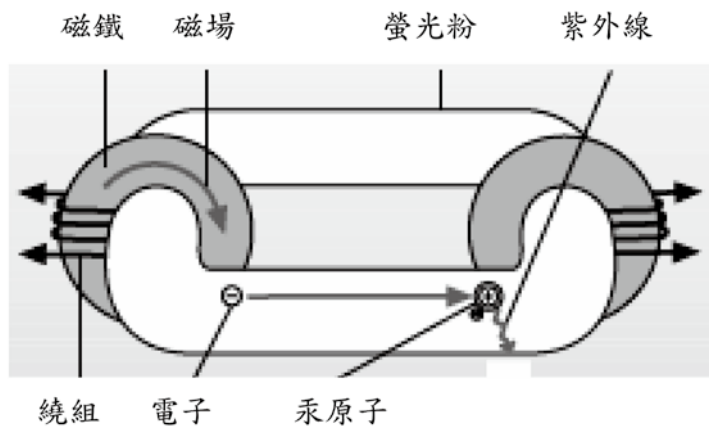


圖 3 無極燈運作原理（來源：OSRAM 網站）

新發展技術是降低激發電流頻率至 kHz，以降低 EMI 干擾。

無極燈沒有電極，因此，就沒有電極塗佈物質因起動而損耗，理論上無極燈的壽命可以達無限長。然而，光輸出隨著玻璃管內的汞蒸氣逐漸洩漏而降低。大約 6 萬小時後，光輸出會降低 25-30%，因此，建議此時最好更換燈管。

無極燈的優點：

1. 超長壽命，額定壽命大約為 6 萬小時（資料來源：OSRAM ENDURA）。
2. 高演色性 $R_a > 80$
3. 高發光效率 ($> 80 \text{ lm/W}$)
4. 快速無閃爍起動（很短時間到達光輸出的 80%）
5. 低溫度 (-25°C) 點燈
6. 在壽命週期內色溫變動很小

無極燈適合應用於維修或更換費用昂貴的地方，其需長壽命燈，如隧道、高塔、工廠等。

陸、發光二極體燈 (Light emitting diode (LED) lamps)

LED 是一種半導體元件，初期多作為指示燈、顯示板等，隨著白光 LED 出現，也被用作照明。LED 發展現況已具備輕薄、短小、效率高、壽命長等傳統光源無法與之比較優點。

與其它二極體一樣，這些半導體材料會預先透過注入或摻雜技術產生 P-N 半導體。P 邊含有較多的正電荷（即電洞），而 N 邊含有較多的負電荷（即電子）。當在二極體施加正電壓時，電子由 N 邊移向 P 邊而電洞由 P 邊移向 N 邊，在 P-N 介面（junction）中，電子電洞結合，而以光的模式釋放能量如圖 4。LED 發出光的波長，是由組成 P-N 架構的半導體物質決定。

因為 LED 材料技術發展，已開發出白光 LED 光源，又稱固態照明（solid state lighting, SSL），未來將逐漸取代傳統照明燈具。所謂「白光」通常係指一種多顏色的混合光，以人眼所見的白色光至少包括兩種以上波長的色光，形成

如人眼同時受紅、藍、綠光的刺激時，或同時受到藍光與黃光的刺激時均可感受為白光。以現階段技術而言，產生白光 LED 有三種普遍的方法（詳如圖 5）[8]。

第一種方法係使用 InGaAlP（紅）、InGaN（藍）與 GaP（綠）為材質的三顆 LED，分別控制通過 LED 電流發出紅、藍及綠光，因這三顆晶粒放在同

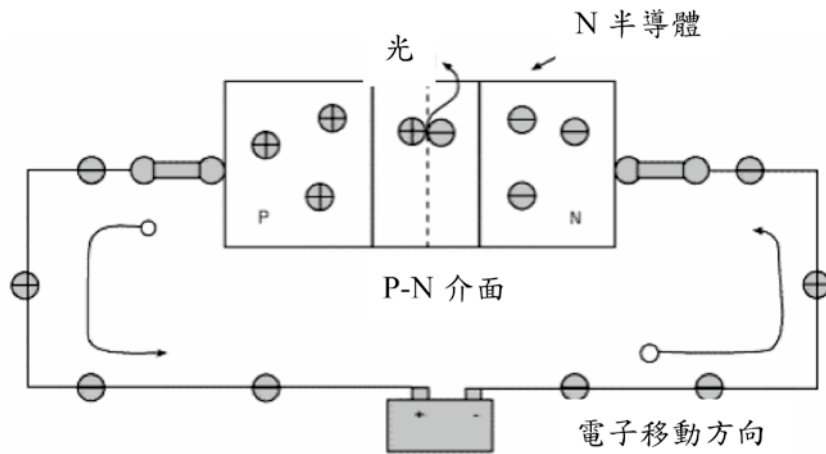


圖 4 LED 運作原理（來源：NLPIP）

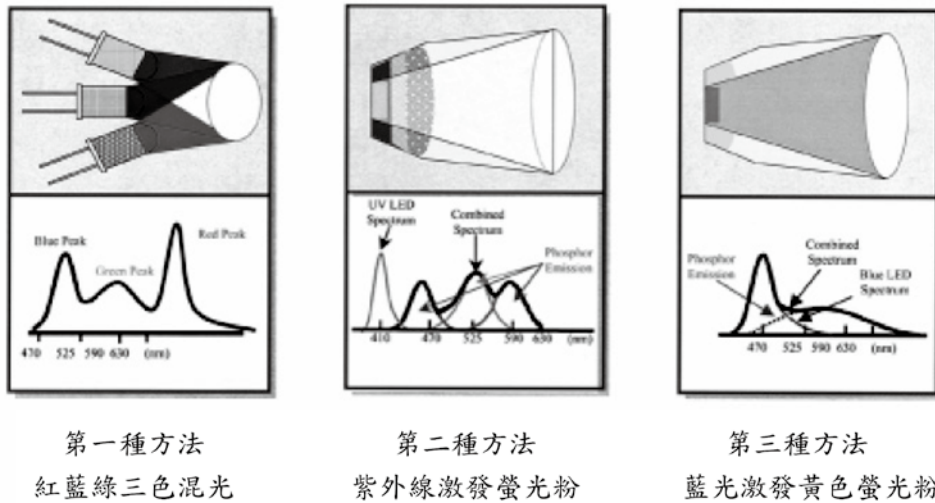


圖 5 產生白光 LED 的三種方法及頻譜圖（來源：[8]）

一燈泡中，經透鏡加以混合而產生白光。第二種有點類似螢光燈，發出近紫外光的 LED 被塗上磷光體混合物，經紫外光照射磷光體混合物，產生三波長具有連續光譜特性白光。第三種方法係使用藍光 LED 上覆蓋一層淡黃色螢光粉晶體塗層，當藍光 LED 發出藍光時，部分藍光便會被這晶體轉換成黃光，再混合 LED 本身藍光，使它看起來像白色光。

LED 燈模組係以 SMT (surface mount technology 表面黏著技術)，將數個個別 LED 附著在印刷電路板上。單一 LED 發光所需電壓為 2 至 3.5V，消耗電力為 0.025 至 1 瓦。一般 LED 利用串聯及並聯接線組合以符合供應電源 (12V 或 24V 直流)。LED 的發光效率，係在元件外量得，在 PN 介面的發光效率非常高 (150-200lm/W)，但在光經由 PN 介面穿過螢光粉填充物或其他半導體，到達元件表面時，造成光的衰減。未來，LED 燈的發光效率將因較透明半導體元件開發而與現今最有效率燈 (如 T5 螢光燈) 匹敵。

LED 有以下優點：

1. 超長壽命，但 LED 燈是由許多 LED 組成，所以燈壽命需重新定義，因一個 LED 熄滅仍有其他 LED 繼續點亮。如美國能源之星 (ENERGY STAR) 固態照明燈具標準於 2007 年 9 月發布最終版，及 CNS 15247，對於 LED 燈的壽命定義為到達初期點燈 (1000 小時 seasoning period) 光束維持率 70% 的時間。
2. 運輸便利，由於是固態元件且無玻璃或燈絲零件，因此可耐震動或移動。
3. 模組化設計，可依據使用者所需形狀或光輸出作調整。
4. 可調光源，從全光束輸出至熄滅皆可調整。

近年 LED 效率提升很快，目前大功率白光平均光輸出為 60-80 (lm/W)，2009 年 2 月，日本 LED 大廠日亞化工 (Nichia) 發表了 249 (lm/W) 高效率 LED，雖然是實驗室數據，但已經是目前最高發光效率的 LED 了。

目前 LED 白光照明的效率仍然比 T5 螢光燈管略低，而且比較昂貴很多，但隨技術發展，LED 成本會不斷降低，並有望在 2020 年以前成為照明市場主角。今年四月下旬，行政院通過「綠色能源產業旭升方案」，宣示台灣將成為

全球最大的 LED 光源和模組供應國，屆時，目前規模還不到半導體業 3% 的 LED 產業，將躍升為台灣下一個最有希望加入兆元俱樂部的明星產業 [9]。

現階段 IEC 對 LED 系統的檢測標準計有 IEC62031 (LED modules for general lighting-safety specification) 及 IEC62384 (DC or AC supplied electronic control gear for LED modules-performance requirement) 等。前者為一般照明用 LED 模組的安規檢測標準，後者為驅動 LED 模組的控制裝置性能試驗，而本局參考 IEC62384，於 97 年 3 月 28 日制定公布 CNS 15174 「LED 模組之交、直流電源電子式控制裝置－性能要求」之國家標準，提供此項關鍵元件的評測基準。另外，本局因應國際標準化組織 (CIE 國際照明委員會、IEC 國際電工委員會)，尚未訂定一致的 LED 照明光電特性及產品可靠度等性能檢測與驗證方法，本局遂以產業標準作為國家標準起草的藍本，在產業的共識基礎下積極整合各界之意見，透過產、官、學、研的集思廣益，匯聚學理、技術與經驗，經過多次討論、修正與審查，制定並公佈 CNS 15233 「發光二極體道路照明燈具」、CNS 15247 「照明用發光二極體元件與模組之一般壽命試驗方法」、CNS 15248 「發光二極體元件之熱阻量測方法」、CNS 15249 「發光二極體元件之光學與電性量測方法」及 CNS 15250 「發光二極體模組之光學與電性量測方法」等國家標準，供 LED 產業參考引用，以提升產品品質競爭力。

除了已制定完成的 5 種國家標準外，本局未來將持續與技術處合作，陸續制定 12 種 LED 照明相關國家標準，並結合本局所推動的「建置節約能源、再生能源與前瞻能源產業產品標準、檢測技術與驗證平台」科技計畫，進一步建立檢測技術與能量，厚植 LED 照明系列標準與檢測環境，為產業注入源源不斷的發展能量 [10]。

柒、結語

照明是人類基本需求，照明良窳也代表經濟活動高低。近年來由於經濟成長，帶動建築物與製造業建廠增加，都使得照明需求快速成長，耗用能源也持續增加，在全球暖化與高油價的雙重夾擊下，數十年不變、消耗地球五分之

一電力的照明產業，將成為綠色運動的頭號革命對象。當新式鹵素燈、T5 螢光燈、陶瓷金屬鹵化燈、無極燈、LED 燈等各種高效率且環保光源陸續被開發出來，照明節能已成為節能重要發展目標之一，藉由其獨特競爭力取代傳統低效率不環保光源，降低對整體自然環境的負荷。

備註：

發光效率 (luminous efficiency, lm/W)：發光效率是衡量一個光源把電能轉換成可見光的轉換效率的指標，為光源所發出的光通量與該光源所消耗的電功率之比，單位為每瓦的流明數。

光源壽命 (average life, 小時)：在受控的試驗條件，進行光源的點滅週期 (如螢光燈管 CNS691 2.5 小時點亮，0.5 小時熄滅)，適量樣本數的一批試驗光源，依統計平均值有 50% 樣品失效對應時間。由於材料和製造過程的差別，每個光源的個體壽命不盡相同。

演色性 (color Rendering Index, Ra)：光線使被照物體呈現出它們原有真實顏色的能力。比如說，購買衣服的時候，人們本能地把衣物靠近窗戶仔細察看，這樣才能使衣服的真实顏色得到還原，減少顏色失真。換句話說，太陽光及白熾燈 (產生可見光中的所有顏色光線) Ra 為 100。

色溫 (color temperature, 絕對溫度 K)：把標準黑體加熱，溫度升高到一定程度時，該黑體色溫數值越低紅色越強，數值越高藍色越強。依 CNS10839 螢光燈管之色度分類，一般光源所採用色溫會有對應的光源色：晝光色 (D) 5700-7100，冷白色 (CW) 4600-5400，白色 (W) 3900-4500，溫白色 (WW) 3200-3700。

光束維持率 (lumen maintenance, %)：當光源還是新的時候，它的光通量是最大。在壽命期間，隨著時間的推移，光源的輸出也就下降，其用來表徵光源輸出下降的程度。

參考文獻

1. G.zissis, “Electrical light sources: a challenges for the future”, Engineering Science and Education Journal 2000, October.
2. 蕭弘清, “能源技術服務業專業人員訓練課程 -- 照明節能技術”, 台灣照明學會。
3. B. Cook, “New developments and future trends in high-efficiency lighting”, Engineering Science and Education Journal 2000, October.
4. 陳怡鈞, “從 CNS、ANSI、IEC 標準要求談螢光燈壽命”, 標準與檢驗雜誌第 91 期。
5. NLPIP, “T5 Fluorescent Systems”, Lighting Answers Volume 6 Issue 1 2000, July.
7. D. H Park, H. J Kim, “Zero-Voltage-Switching High Frequency Inverter for Electrodeless Fluorescent Lamp”, IEEE Transactions on Industry Applications, 1998.
8. D. A. Steigerwald, “Illumination with solid state lighting technology”, IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 2002.
9. 蕭富元, 王曉玟, “高電價、換燈潮 LED 變身時尚產業, 改變你我生活”, 天下雜誌第 423 期。
10. 經濟部標準檢驗局網站新聞稿。