

發光二極體在照明應用上的考量

LEDs Lighting Options and Design Considerations

董雨隴、田仲豪

Yu-Lung Tung, Chung-Hao Tien

自從 1906 年第一顆發光二極體 (LED) 被發明出來，經過了 90 年的發展，直到日本的日亞化學 (Nichia) 在 1996 年發表高亮度的藍光和白光 LED 技術，LED 才被視為具有潛力成為新一代的照明光源⁽¹⁾。然而 LED 光源具有較窄的發光頻譜，和過去傳統白熾光源 (incandescent)、螢光燈 (fluorescent) 的光譜能量分布相比，在許多特性上有很大的差異。因而本文的重點主要探討 LED 做為一般照明光源使用時所擁有的優點與問題，此外，也簡單地介紹一些現有的室內照明注意事項。

LEDs make a rapid progress during the last few years since Nichia Co. successfully delivered the high power blue and white LED chips in 1996. After that, LED-based luminaries become a promising approach for future lighting applications. Unlike the conventional incandescent or fluorescent sources, LEDs have relatively narrow spectral power distribution, which leads to some unique characteristics and needs to be considered in lighting criterion. This article is aimed to briefly introduce the LED-based lighting options and design considerations in many aspects such as color rendering, luminous efficiency and color temperature.

一、前言

近年來隨著發光二極體 (LED) 製造成本不斷地降低，以及效率不斷提升，在字型背光燈、建築照明、零售展示、居家、娛樂、機械影像、保全與戶外等照明領域，幾乎都可以看到 LED 的蹤影。根據工業技術研究院產業經濟與趨勢研究中心 (IEK) 預估，2011 年全球 LED 照明市場規模可達 9.85 億美元，2006 至 2011 年市場之複合成長率更高達 37%。然而，不同於傳統的白熾光源 (incandescent lamp) 如鎢絲、鹵素燈具有連續和緩的發光頻譜 (spectral power distribution)，亦不同於螢光燈 (fluorescent) 與高壓氣體放電燈系光源 (high

intensity discharge) 如水銀燈 (mercury vapor, MV)、複金屬燈 (metal halide, MH) 及高壓鈉燈 (high pressure sodium, HPS) 等劇烈變化的寬發光頻譜，LED 光源具有相對較窄的頻譜特性。若欲利用 LED 成為新一代的照明光源，首先，必須先了解 LED 的光源特性，並從中了解 LED 和市面上所常見的光源在特性上有哪些方面的差異，如光源的演色性、電光轉換效率以及色溫等參數。接著，由於照明燈具是應用於人們的日常生活中，因此必須了解人眼和光源間的相互關係，才能知道光源該如何發展，帶給人們更加舒適的感受，以及更有效率的照明環境。最後，有關室內照明的設計是一門存在已久的知識，也包含許多經驗的累積，想讓 LED

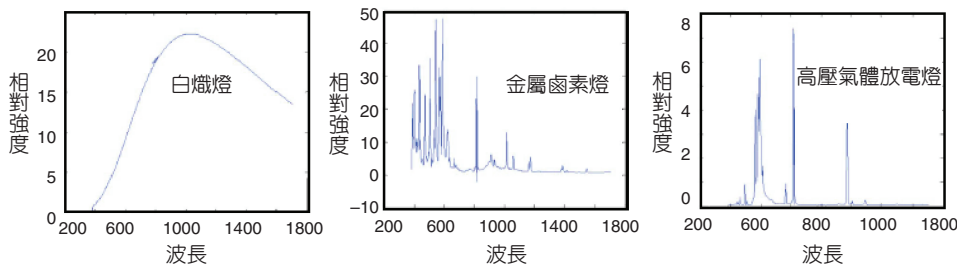


圖 1. 常見的燈源頻譜⁽¹⁰⁾。

燈源進入室內的照明環境，也必須先對過去的設計準則有些許的認識，才能做出適當的設計。

二、LED 燈源特性介紹

1906 年 Henry Joseph Round 在 SiC (carborundum) 相關的實驗中，無意間發現了微弱的光產生，第一顆 LED 也因此誕生。在 60 年代 LED 的發展主要應用於光纖通訊的紅外線光源。70 年代時著眼於其長時間操作的穩定性，LED 引入做為操控的指示燈⁽¹⁾。直到 90 年代日亞化的中村修二博士，在藍光 LED 的發光效率上取得突破，並搭配螢光粉，發表了高亮度的白光 LED，自此 LED 被視為具有成為下一代照明光源的潛力。

LED 的發光原理為半導體材料間電子電洞的結合。材料能隙決定產生的光波特性，而單一 LED 晶片，使用相同的主動發光材料，因此光源的頻譜具有窄頻寬的特性，頻譜的半強度寬 (full width at half maximum, FWHM) 約在 20 nm 左右

⁽²⁾，不像一般熱輻射的白熾燈 (incandescent) 與鹵素燈 (metal halide)，具有較連續的分布頻譜，如圖 1 所示，因而在照明效果上，和高壓氣體放電方式的高壓鈉燈 (high-pressure sodium) 一樣，因為有較劇烈變化的頻譜分布，演色性往往不高，在視覺上形成較不真實的感覺。

對於應用於照明或顯示的可見光 LED 而言，人們一直希望發展出高效率、且能呈現完整色彩的光源。而前者以發光效率 (luminance efficiency) 來衡量，這個參數代表每單位的電能 (單位為瓦特 Watt) 在光源可以產生多少的光能 (單位為流明 lm)。而這也是以往 LED 技術發展上最常被使用的一個參數，在 2000 年左右，就可達到和螢光燈差不多的 100 lm/w，如圖 2 所示，而目前白光 LED 已可達到約 150 lm/w，早已遠遠超過一般傳統白熾燈的 20 lm/w⁽⁴⁾，由於兩者同為點光源，從節能的角度來看，LED 被視為能夠取代白熾燈成為未來照明的明日之星。

除了發光機制本身的電光轉換效率之外，照明

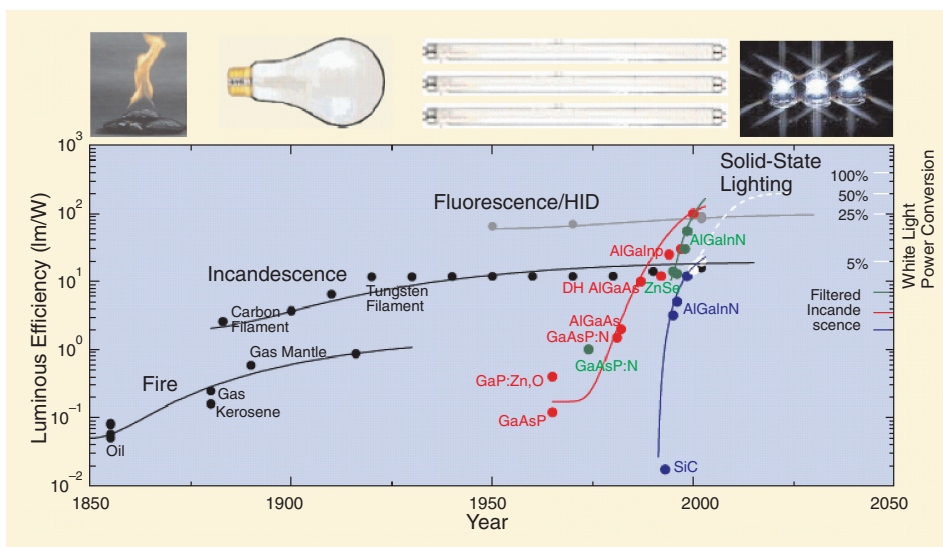


圖 2. LED 發光效率成長圖⁽⁴⁾。

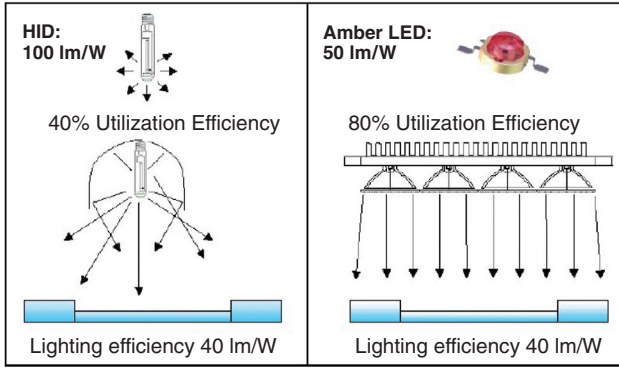


圖 3. 光源指向性對整體效率影響示意圖⁽⁵⁾。

模具的設計對於效率的影響亦是很重要的課題。LED 光源的另外一項特點，在於其出射光具有明確的投光方向與光束角度的特性，首先出射光通量會均勻分散在主動發光面的各個角度，進一步由封裝方式限制其張角。而傳統一般的散射性光源，如普通鎢絲燈泡及大部份螢光燈，其發光模式係向四面擴散，不具有任何方向性，因此在使用上，過去的燈泡必需設計良好的反射罩，讓背向射出的光線，也能夠經由反射而再利用，但是經由反射，必定會損失部分的能量，因此整體的光學出光效率下降。若是以 LED 做為燈源，則沒有這樣的問題，在考慮燈具的使用下，原則上會達到較佳整體的出光效率。舉例而言，假設一邊採用高壓氣體放電的 HID 燈源，其發光效率為 100 lm/w，但是由於光源出射光在自由空間中的均勻輻射 (Lambertian radiance)，因此其光學系統的出光效率只有 40%，經過整個系統，其電光轉換效率約為 40 lm/w。而若另一側採用 LED 燈源，其發光效率為 50 lm/w，

由於出射光方向集中，因此光學系統的出光效率較佳，假設為 80%，則整體系統的電光轉換效率，亦可達到 40 lm/w，如圖 3 所示⁽⁵⁾。上述的例子主要在強調 LED 光源與燈具的重要性，這些因素對於整體光學系統的效率具有一定程度的影響。

在實用的考量上，除了上述燈源與燈具的效率外，仍有許多外部因素需要納入做整體的考量，例如人眼的視覺。以下就先從 LED 的頻譜特性，對於人眼的頻譜刺激值和演色性 (color rendering index, CRI) 的影響來做探討。

照明上所採用的白光 LED 產生的方式主要分為兩種，第一種是使用短波長的 LED (藍光或紫外光)，然後在封裝時摻入黃色或者紅、藍、綠等多色的螢光粉，前者借由藍光搭配互補的黃光產生白色 (如日亞化的 InGaN 藍光搭配 YAG 螢光粉)，後者則是利用紫外光激發多種螢光粉，產生頻譜較寬廣的白光光源如圖 4 所示⁽⁶⁾。而第二種白光 LED，則是使用紅藍綠三種或更多種的獨立 LED 晶片，使用外部電路控制其混光比例，再配合適當的混光機構，產生具有特定相關色溫的白點。

目前市面上白光 LED 主要採用螢光粉搭配波長轉換的方式形成白光，因為其操作上只需點亮單一藍光或紫外光 LED 晶片，混光比例由當初螢光粉的調配決定，不需額外的電路控制，且由於封裝在同一晶片中，短距離內便可達成不錯的混光效果。而使用多種 LED 晶片組成的白光系統，則在驅動電路和混光機制上需要較複雜的設計，不過由於採用電路控制，因此可以動態的調整不同的混光比例，產生不同情境光源，這是使用固定螢光粉比

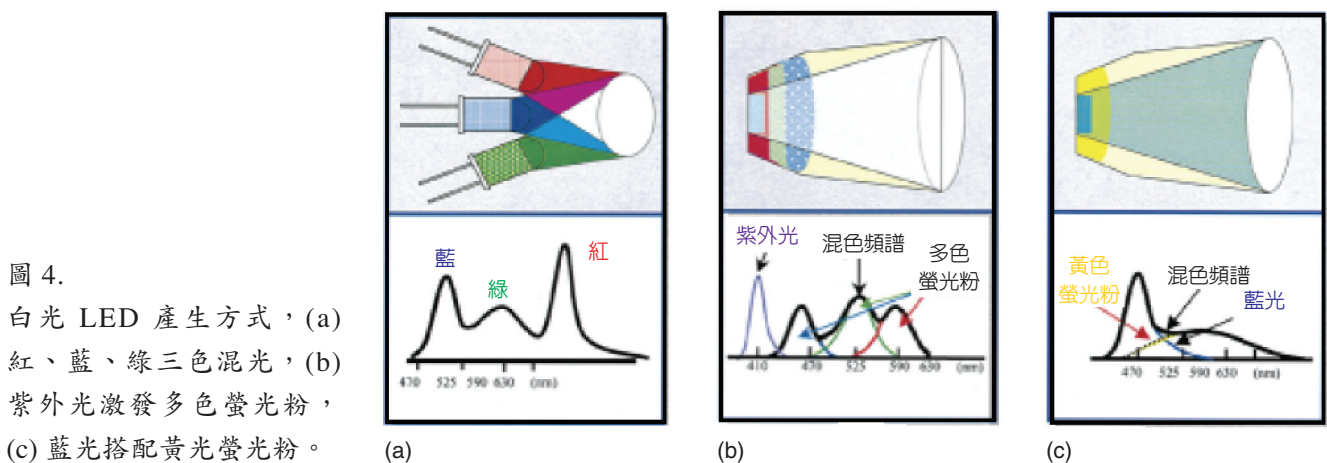


圖 4. 白光 LED 產生方式，(a) 紅、藍、綠三色混光，(b) 紫外光激發多色螢光粉，(c) 藍光搭配黃光螢光粉。

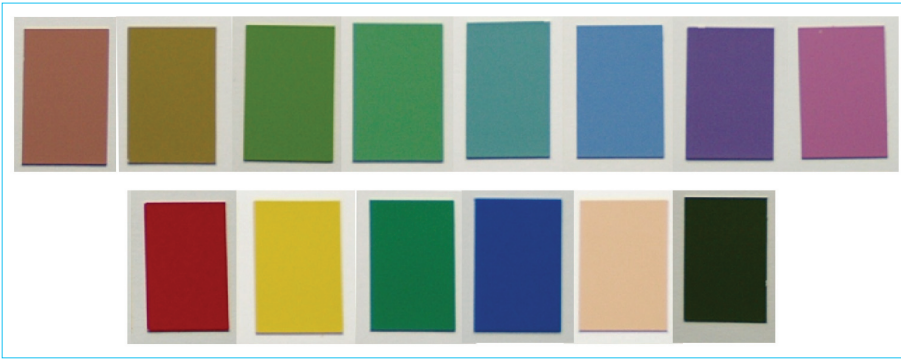


圖 5.
十四種演色性色票。

例和傳統光源皆無法做到的⁽⁷⁾，也是未來 LED 在照明使用上的另一項特點。

人眼感受的亮度，主要是由光源的頻譜和視明效率頻譜 (spectral luminous efficacy) 的乘積做積分而得。由於一般 LED 頻譜寬度 (FWHM) 只有 20 nm 左右，因此 LED 的主波長，對於人眼能夠感受到的光視亮度具有決定性的影響。多組 LED 晶片因而可以經由不同的波長組合取得較佳的光視效率，這是傳統燈源所不能辦到的。經由理想的模型推算，發現使用 450 nm 與 570 nm 的兩種 LED 光源波段的組合，可以混出標準 D65 光源的白點，並具有 425 lm/w 高光視效能的情形⁽³⁾ (一般連續可見光波段的光視效能平均值約為 180 lm/w)，這樣的燈源在其它參數上也許是不符合室內照明的規範，但用於一些單純需要亮度的地方，如保全或球場照明卻是最省能的組合。更進一步而言，是否在其它參數滿足室內照明的設定時，有著其他組合的 LED 燈源可以提供較高的光視效能，也是目前許多研究單位探討的議題。

演色性是衡量燈源是否可以用作室內照明的一項重要參數，演色性是由國際照明協會 (CIE) 所定義，主要採用 14 種色票來做測量，如圖 5 所示。前 8 種是顏色較不鮮艷的中性色 (色彩飽和度較低，反射頻譜較為連續)，用來測驗光源是否可以展現物體的一般色。色票 9 到 12，則分別是高飽和的紅、黃、綠、藍四種顏色 (反射頻譜變化較為劇烈)，用來評量光源是否可以顯示物體的鮮豔色彩。而第 13 個色票則是白種人的膚色，最後一個則是一般樹葉的顏色⁽³⁾。

演色性的計算，一般是採用 CIE 所定義的

CIELAB 或 CIELUV 色彩座標系來做計算。首先求出色票在標準光源下的色點，再出色票在待測光源下的色點，接著由兩色點的色差值再帶入下列公式：

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \quad (1)$$

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^{14} R_i}{14} \quad (2)$$

其中 R_i 代表 14 種色票的演色性，而其平均值 R_a 則代表光源整體的演色性，演色性越高，代表光源越能夠展現物體的顏色，另外，參數 4.6 是由定義早期暖白螢光燈的演色值 50 而選定⁽³⁾。

演色性過去用在照明燈源的測定上，是一個廣泛接受的參考指標，可是當使用在 LED 上時卻面臨一些問題。這些問題的產生主要是因為 LED 是窄頻的燈源，因此從頻譜的角度上來看，大部分的能量都集中在主波長附近，因此當 LED 燈源打在色票上時，尤其是高飽和的色彩時，因為其反射頻譜也很陡峭，所以 LED 的主波長只要有些微的飄移，就會讓演色值有劇烈的變化⁽²⁾。因而在某些情況下，演色值高的 LED 燈源在實際的人眼視覺觀測下，並不代表一定比演色值低的 LED 燈源來得好，只能說演色值高的恰好能夠把所選擇的色票的顏色展現出來，而演色值低的可能恰好碰到色票吸收的部分。而過去的光源幾乎都是寬頻譜、且連續的標準光源，光源頻譜並沒有劇烈的變動，因此挑選 14 種色票作測試，幾乎就能夠展現真實應用上的效果。未來考量 LED 在演色性上的表現，必須進一步發展一套適合的評量方式。

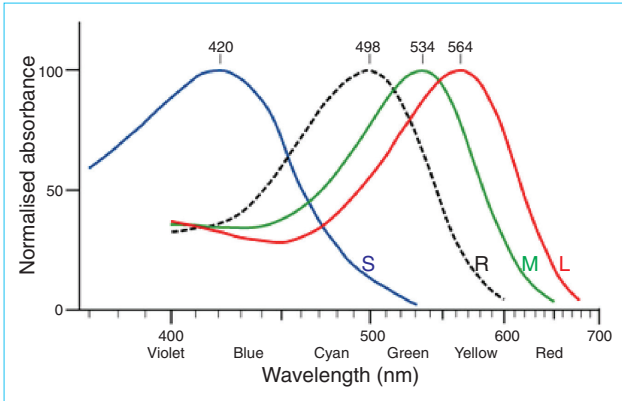


圖 6. 錐狀細胞 (藍、綠、紅) 和柱狀細胞 (黑) 感光曲線。

一般由 2 或 3 個主波段所組成的白光 LED⁽⁶⁾，在整體頻譜上的變化仍是十分劇烈，確實無法良好的展現物體的顏色，這也是為何人們總是覺得 LED 燈源的照明似乎有種不真實的感覺。不過，就顯色性而言，LED 較窄的發光頻譜讓其色點的飽和度增加，若是應用在顯示器中，可以達到增加色域 (color gamut) 的效果⁽¹²⁾。除此之外，應用在一些相近顏色的檢測上也能有良好的效果，因為如同在色票中產生的問題，兩種相似的顏色在一般寬頻光源照射下，也許人眼是很難分辨其不同，但若採用特定設計的 LED 光源照射卻可能會有極大的色差產生，進而方便檢視。然而，成為一般環境的照明燈源，仍是 LED 發展的最終目標，而若想達成較高的演色性，目前較可行的方法仍是將多組 LED 晶片盡可能的組合為寬且平滑分布的頻譜，才能夠確保將實際上物體顏色的每一個波段都反射回來。不過，除了演色性上需要加以克服之外，LED 要成為通用的照明系統仍需要納入一些視覺因素。

三、視覺與燈源選擇

人眼對外部的光學訊息，主要由兩種細胞來負責接收，第一種是柱狀細胞 (rod cell)，第二種是錐狀細胞 (cone cell)。前者負責接收環境的光強度資訊，並無任何色彩的資訊，而後者又分為三種類型，分別負責接收入射光長、中、短 (long,

medium, short) 三種可見光波段分布的資訊，這三個波段大致對應到人感受的紅、綠、藍三種顏色⁽³⁾。每種細胞都有獨特的光譜刺激曲線，因此人眼可以視為一個可見光波段的光偵測器，前方再加上四種不同的濾波片，如圖 6 所示。而大腦再經由這些資訊，做出對顏色感知的判斷。人腦做出判斷的方式，則經過了許多的心理學實驗、顯微光譜測定、電生理學檢測的結果來歸納，目前最廣為接受的，是稱為階段學說 (stage theory) 的理論。其認為人對顏色的感知，首先透過前端人眼的四種細胞，分別產生四種不同途徑 (channel) 的訊息，後端再經由對立色的應答模型來作判斷⁽³⁾。

人眼是一個非常精密的光偵測器，可以自動調節瞳孔來控制入光亮，接受的光照度範圍為 $10^{-4} \cdot 10^5$ lx。而人腦處理外部環境的亮度資訊時，是由柱狀和錐狀細胞共同決定，如圖 7 所示，但兩者的權重比例卻十分複雜。依據日本工業標準 JIS，當環境光強高於 10 lx 時 (一般夜間路燈點亮的街道)，採用的稱為明視覺 (photopic vision)，此時的外部資訊主要來自錐狀細胞的應答，因此除了亮度，還保有色彩的資訊。而當環境光低於 0.1 lx 時 (如只有星光的室外環境)，則採用暗視覺 (scotopic vision)，此時的光強度還不足以刺激錐狀細胞產生應答，因此資訊接收主要由柱狀細胞負責，只能獲得明暗的

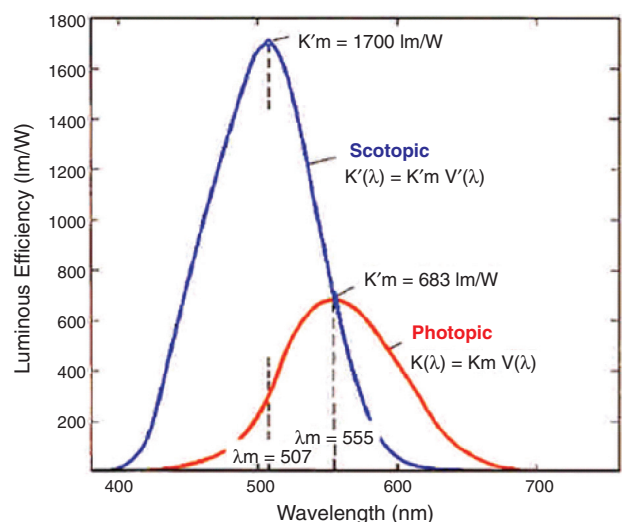


圖 7. 視明效率圖 (藍線：暗視覺 (scotopic)，紅線：明視覺 (photopic))。

亮度資訊，而沒有色彩的訊息。而環境亮度介於兩者之間時，則稱為中間視覺 (mesopic vision)，這時錐狀細胞和柱狀細胞會同時作用，而獲取的資訊為兩者的某種比例關係⁽³⁾。

人眼對於外部環境的亮度感受，在一般狀況下，是由明視覺來決定，可用下列的公式來描述

$$\phi_v = K_m \int_{vis} \phi(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

ϕ_v ：人眼感受總能量 (lm)

K_m ：光譜光視效能 (lm/watt)

$\phi(\lambda)$ ：燈源能量頻譜 (watt)

$V(\lambda)$ ：光視效率頻譜 (ratio)

這個公式，代表人眼所感受到的亮度值，是由環境的頻譜乘上視明效率曲線，再積分所得的值。從公式中可以發現不同波長的光，對人眼所感受到的亮度有著不同的權重⁽³⁾。

雖然過去的研究結果都認為柱狀細胞只有在暗視覺下才有作用，然而 1992 年 Berman 博士在加州大學柏克萊分校所提出的研究發現，在室內照明的環境下，柱狀細胞仍保持著活性，並且可以控制人眼的瞳孔大小，因此他定義一個暗視覺／明視覺比值 (scotopic/photopic ratio) 的參數，用來衡量光源頻譜對於柱狀細胞的刺激比較。由於柱狀細胞對藍、綠波段的敏感度較高，因此當光源含有較多的藍、綠光波段時 (通常指色溫較高的光源)，光源會有較高的暗／明視覺比值⁽¹¹⁾。

依據研究，在相同亮度下，使用高暗／明視覺比值的光源會使瞳孔縮小，而有較佳的景深與解析度，這主要是由於人眼會注視欲觀察的物體，因此帶有物體訊息的光線主要由瞳孔中心入射，而由瞳孔外圍入射的，則是環境中的雜散光，因而縮小的瞳孔可以適度的阻擋這些雜散光，提升訊息的辨識能力。此外，也有一些研究提及，使用金屬鹵化物燈 (S/P ratio 1.49) 和高壓鈉燈 (S/P ratio 0.4-0.62) 相比，人眼對於離軸動作的反應時間減少一半，因此認為高暗視覺／明視覺比值的光源適合用在室外場所，尤其是需要對周圍動作產生立即反映的地方，如交叉路口、會有動物穿越的道路等⁽⁸⁾。不

過，有關明視覺和暗視覺對於人的反應以及視覺上的影響，仍需有更進一步的研究來驗證。

四、室內照明注意事項

室內照明設計中，主要考量的因素可分為兩項，第一項是照度 (illuminance)，第二項是光源和環境的一些交互特性。照度依據不同的工作環境和使用者的不同，會有不同的數值規範。而光源與環境的交互特性，則主要是在探討光源的擺設方式，對使用者可能產生的一些影響，以及光源照射在物體上可能產生的一些現象。

光源照度的設定，主要是由所在環境的機能和使用者來決定，一般而言，居家室內環境和餐廳等環境，照度都是設定在 200-500 (lx) 左右，而若是賣場展示櫃台，則需要較高的照度，大約在 1000-2000 (lx)⁽⁹⁾。另外，人眼會隨著老化而降低光的穿透率，因此若是給較高齡層的人口使用 (如老人活動中心)，則略高於標準值，反而會是較好的選擇，反過來，若是給較年輕的族群 (如中小學餐廳或教室)，光源的亮度則可以略微低於標準值⁽⁸⁾。另外，光源可以分為功能性光源和背景光源兩種，功能性指的是具有特定用途，比如用在閱讀、文書處理與電腦螢幕等，功能性的光源通常具有指向性，集中在特定的範圍內，亮度也較高。另一種則是背景光源，主要是提供環境的整體照明，也可做為功能光源的輔助，其亮度較低，約設定在功能光源的 30-70%⁽⁸⁾。若能讓光源強度均勻的維持在規範值附近，當然是最完美的情況，但實際上的設計很多都將建議值視為一最低限度，而大部分的地方都會超出許多，因此如何讓光源在整體的環境中均勻分布，是可以在燈具的擺放和燈罩的設計上作進一步的規劃。

更新的建築設計中，除了人工照明，也希望將陽光引入房間，進一步的節省能源。由一些研究顯示，相同的亮度採用日光和使用電子照明相比，除了可以節省電子照明所需的電力外，建築物的散熱功率也可節省 50%⁽⁸⁾。此外，日光光源還有不會閃爍、光譜均勻等其他好處。不過，採用日光照明，其亮度仍需和人工照明的規範接近，最多不可超過

3—5 倍，因為多餘的陽光，反而會加重建築物冷卻系統的負荷⁽⁸⁾。另外，設計上也必需濾掉紫外光等危害人體的波段。因此如何讓適量的日光均勻的照射入室內形成良好的背景光源，是需要許多光學系統上的設計，而這樣的設計中，困難點在於日光的光源品質會受到天氣、環境等許多因素的影響而改變，因而很難提供穩定的日光照明，而目前的發展傾向以電子照明為主，陽光光源為輔的設計，使用電子燈源來產生穩定的燈源，再適當的加入日光以節省能源。

除了上述針對室內照明需要一些規範外，對於照明所需的光源特性，也會因為不同的使用條件而有所差異。首先考量的參數是演色性，演色性衡量的是光源是否能夠真實的呈現物體顏色給人們，越高的值代表越能把物體真實的顏色表現出來。一般的照明應用上，對於演色性的要求，都需在 80—85 以上 (標準參考光源定為 100)。而特殊的環境，如藝廊或者珠寶店，則可能會要求更高的標準，如 90 以上。反之，如用在室外公共空間照明，如公園或球場，則要求較低，約在 70 以上即可⁽⁸⁾。大部分的光源，如螢光燈、白熾燈泡等，其演色性質都可達到要求，但如高壓氣體放電燈泡 (HID)、LED 則可能略低於標準一些。

第二個考量的光源特性是色溫。黑體隨著加熱溫度不同，其顏色也會逐漸改變，將黑體溫度與其對應的色坐標在色度圖上標示出來，便可得到所謂的普朗克曲線 (Planckian locus)，如圖 8 所示。當在描述一個白光光源時，便可用色溫來簡易地表示其白光是偏暖色系 (低色溫)、或者冷色系 (高色溫)。而色溫值的取法，是以色坐標上和光源色點最接近的黑體溫度，並不一定需要在普朗克曲線上⁽³⁾。

一般市面上所建的燈源，其色溫範圍大約在 3000 K—4500 K，陽光的色溫大約在 4000 K—7500 K 之間變化，而一般白熾燈泡的黃光，色溫則約在 3500 K 左右，給人較溫暖的感覺⁽⁹⁾。依據一些統計顯示，白天時，若使用低色溫的燈源，會讓人覺得所見物體顏色偏黃或者偏紅，因而使用較高色溫 (5000 K—6500 K) 的照明會讓人有較自然的感覺。而夜間則相反，若在夜間採用高色溫的燈源，反而

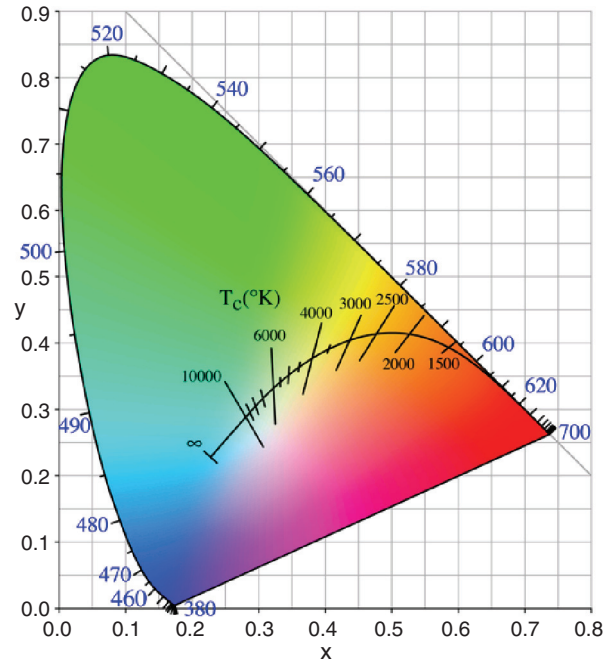


圖 8. 普朗克曲線和對應色溫。

會使人覺得物體顏色不自然，採用低色溫 (3000 K—4500 K) 的燈源則較佳⁽⁹⁾。另外，美國所作的一項統計也發現，居住在美國北邊的家庭，所用的燈源色溫約為 3000 K，美國中部的家庭，使用的色溫約為 3500 K，而南美的家庭，則使用色溫 4100 K 的燈源，這也顯示，隨著氣候的改變，居住在越溫暖地方的人，喜歡使用較冷 (高色溫) 的燈源，而居住在較冷地方的人，反之則喜歡較溫暖 (低色溫) 的燈源⁽⁹⁾。因此色溫值的選擇上，需隨著使用時間和地區作適當的調整，而若能動態的調整，將會是最佳的照明方案。

五、結論

隨著 LED 材料與製程技術的發展，其發光功率仍持續呈現爆發性的成長，將來必定更加普及的進入人們的生活。然而，LED 特殊的發光特性，具有很窄的光譜，應用於照明領域時，往往在演色性上有先天的劣勢，因而如何提升演色性是首要的課題，是故目前產業界主要致力於新型螢光粉的開發。然而 LED 窄頻的特性，也提供了其較為彈性的頻譜組合特性，因此可以針對不同的應用，作出

獨特的設計，並且在如光視效率、暗／明視覺比例等特性上，做出優化的調整，比傳統光源更符合人們的需求。

參考文獻

1. M. S. Shur and A. Zukauskas, *Proceedings of the IEEE*, **93** (10), 1691 (2005).
2. Y. Ohno, *Proceedings of SPIE*, **5530**, 88 (2004).
3. N. Ohta and A. R. Robertson, *Colorimetry*, England: John Wiley & Sons Ltd (2005).
4. J. Y. Tsao, *IEEE Circuits & Devices Magazine*, May/June, 28 (2004).
5. Commission Internationale de l'Éclairage: Method of Measuring and Specifying Color Rendering Properties of Light Sources. CIE Central Bureau CIE 13.2-1974.
6. D. A. Steigerwald, J. C. Bhat, D. Collins, R. M. Fletcher, M. O. Holcomb, M. J. Ludowise, P. S. Martin, and S. L. Rudaz, *IEEE Journal On Selected Topic in Quantum Electronics*, **8** (2), 310 (2002).
7. I. Fryc, S. W. Brown, G. P. Eppeldauer, and Y. Ohno, *Optical Engineering*, **44**, 111309 (2005).
8. Advanced Lighting Guidelines Project Team, *Advanced Lighting Guidelines*, New Buildings Institute, Inc (2003).
9. *Lighting Applications Guideline for LEDs*, Lighting Research

Center, Rensselaer Polytechnic Institute (2002).

10. M. Liu, B. Rong, and H. W. M. Salemink, *Optical Engineering*, **46**, 074002 (2007).
11. S. M. Berman, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Winter, 3 (1992).
12. F. Yamada, H. Nakamura, Y. Sakaguchi, and Y. Taira, *Journal of the SID*, **10** (1), 81 (2002).

-
- 董雨隴先生為國立交通大學光電工程研究所碩士班學生。
 - 田仲豪先生為國立交通大學光電工程博士，現任國立交通大學光電工程學系暨顯示科技研究所助理教授。
 - Yu-Lung Tung is currently a graduate student in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Chiao Tung University.
 - Chung-Hao Tien received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an assistant professor in the Department of Photonics & Display Institute at National Chiao Tung University.