OLED－人類史上第一個生理心理與環境友善的光源

OLED－A Physiologically, Psychologically and Environmentally-Friendly Light Source Ever in Human History

周卓煇、周永晟、彭祥灝

Jwo-Huei Jou, Yung-Cheng Jou, Shiang-Hau Peng

白熾燈泡和螢光燈管可以提供基本的照明需求，卻無法滿足人類對不同時段有不同光色自然光的渴望。為了實現類太陽光照明，燈具之放射光必須和日光光色相近，同時也須有寬廣的色溫變化；然而，不論是先前的 OLED，或是最新的 LED，皆無法達到太陽光般的廣色溫。因此，本文將介紹第一個人造太陽光光源，其光色變化不僅和日光相近，範圍更涵蓋 2300 ± 70 K 至 7900 ± 1400 K，足以匹配清晨曙光的 3250 K、正午日光的 5500 K，至落日餘暉的 2500 K，甚至包含高緯度正午的 8000 K。文中將簡介 OLED 的諸多侵入性特色，並闡述色溫對人類健康的影響。

Incandescent bulbs and fluorescent tubes provide fundamental lighting needs but barely satisfy our desire for natural lighting, as from the sun, with time-varying color temperature. To have sunlight-style illumination, emission with daylight chromaticity and a wide color-temperature (CT) span is essential. However, no single lighting device, including previously published white organic light-emitting diodes (OLED) as well as the latest white light emitting diode (LED), exhibits daylight-like emission with a color temperature range covering that of sunlight. Here we demonstrate a man-made lighting device that is composed of a single simple OLED capable of yielding daylight chromaticity with color-temperature ranging from 2300 ± 70 to 7900 ± 1400 K, covering that of sunlight, *i.e.* 3250 K at dawn, 2500 K at dusk, and 5500 K at noon or 8000 K at noon in high-latitude country. Throughout this context, we will first introduce some disruptive features of OLED, followed by an elucidation on the effect of CT on human health.

一、簡介

在不傷害眼睛與身體的前提之下，照明節能是一種必要的選擇，也是一種美德！但是在保護孩子眼睛與節省能源之間，我們將會如何選擇？在保護家人的生理、身體健康與節約用電之間，抉擇又會是如何？

適合白天工作使用的照明，也適合用在夜晚休息的時候嗎？埃及人在五千年前發明了蠟燭，此外，人類也一直想方設法要點亮黑夜和室內。近來

的醫學發現，夜間點燈不一定是福？尤其是最近三十年，夜晚大量使用明亮的電子照明設備以來，特別是照射強白光或藍光，與快速攀升的乳癌、結腸癌等之間的關連，已經引起先進國家的注意。

目前市面上的照明設備，包括傳統的鎢絲燈泡和螢光燈管等，只能發出單一種光色[1, 2]，皆無法涵蓋日出到日落時的各種光色。然於 2009 年，清華大學周卓煇教授研究團隊透過元件設計，藉加入一新穎的載子調製中間層，成功製備出色溫能隨電壓改變而改變的 OLED 元件[3]。更重要的是，這些色溫改變的範圍能夠涵蓋從日出到正午，直至日落的所有光色，甚至包含了陰天和晴天等不同氣候下的色溫，如圖 1 所示。

這項發現意味著不久的將來，人類將能在室內享有如在室外般的自然光源，並能隨著時間、地域和需求等加以調整。自在的色溫調變性，更是冬日或長期無陽光照射地區人們的一大福音，如北歐。此項發現將對當地人民有所幫助，改善因為長期照不到日光而發生嚴重憂鬱甚至自殺的情形。

人們在白天需要照射白光，以刺激可體松 (cortisol) 分泌，使人保持清醒有活力[4, 6, 10]；相對的，夜晚暴露在此種光源下，會使原本應在夜晚大量分泌的褪黑激素 (melatonin, MLT) 含量大幅下降。這也意味著，在本應休息的夜晚，人卻將持續保持緊張、清醒，如此，維繫人類正常生活作息的生理時鐘將受到干擾，對健康影響甚鉅。

根據醫學研究指出[12]，在 100 lux 的照度下，白光 LED 對褪黑激素的抑制速率是白熾燈泡 (色溫 2,000 K 至 2,500 K) 的三倍快，且是蠟燭的約五倍快 (色溫 1,800 K 至 2,000 K)。高色溫或是短波長的光源對褪黑激素的分泌速率影響甚大，因此，根據不同的需求和時間，選擇適當色溫光源的重要

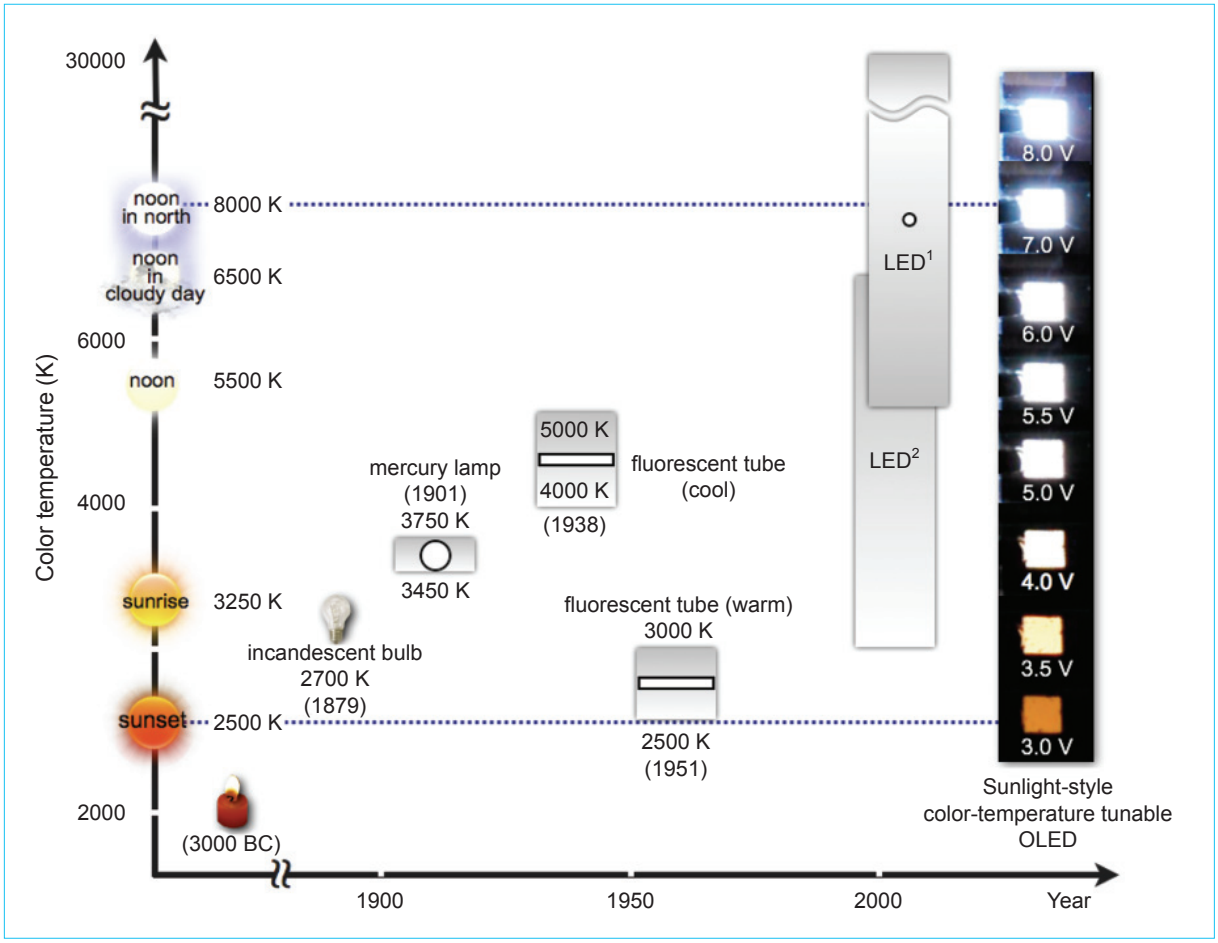


圖 1. 類太陽光 OLED 和其他光源所能涵蓋的色溫範圍[3]。

性，不容小覷。

然而，現行的主流照明燈具在白天和夜晚的使用上並無區別，因此，適當的「夜間光線 (light at night, LAN)」，或換句話說，研製一色溫可調變的照明光源，將是當前的重要課題。

二、OLED 將是人類史上最好的照明光源

傳統的顯示技術，像是陰極射線管 (CRT)、液晶顯示器 (LCD)、電漿顯示器 (PDP) 等，可以用做顯示器用途，但是卻不能用來照明；相反地，傳統的電驅動照明技術，如電燈泡和日光燈，可以用來照明，但是卻不能當作顯示器；因此照明與顯示的應用皆不會放在一起討論。

然而有些技術，像是有機發光二極體 (OLED)，既可以應用於顯示器又能作為照明燈具，此得天獨厚的特性，再加上許多其他的特色優點，將使其產品應用魅力無限，產業發展也深具前景。

從照明的角度來看，近來的醫學發現，夜間點燈並不一定是福。尤其是夜晚使用的明亮電子照明設備，特別是照射強白光或藍光，與快速攀升的乳癌和結腸癌等之關連性，已經引起先進國家的注意。以色列的研究也顯示，夜間燈光最亮的社區，其婦女罹患乳癌的比率比夜間燈光最暗社區的婦女高 73%[17]。

若從經濟發展的角度來看，2009 年全球一般照明產業為 900 億美元 (約新台幣 3 兆元)，比平面顯示器產業的產值 850 億美元 (約新台幣 2.8 兆) 高，使得我們不得不重視，更遑論它與我們的健康息息相關。

在歐盟的帶領下，世界各國逐步禁用白熾燈泡，如表 1 所列，因為其每瓦大約只產生 12 到 15 流明。然而在此節能的考量下，不禁讓人思考犧牲掉的是什麼？白熾燈泡除了耗能之外，卻有光譜連續較溫和而且不閃爍、較護眼等優點。現有「省電螢光燈管」，其較省電卻有很多缺點，如：含汞、含紫外線、光譜斷續尖起、閃爍，亦即「有一好，卻有四壞」，更不談夜間使用此高色溫、高亮度光源對生理的危害。但是，若不是優質、友善 OLED 光源不斷發明，此政策的「粗糙」、「盲動」也難以被顯明。

兼具健康且節能之外，具有其他十幾項特質的 OLED 照明技術，非常可能是人類史上最好的照明技術，不僅是我們所需要，更應該是世界各國所引頸期盼。以下謹就 OLED 在照明的特性及應用做一概略的介紹。

三、OLED 的侵入性特質

OLED 具有其他光源所缺乏的優點，其獨到的優點，幾乎都是產生殺手級應用 (killer application) 或殺手級產品 (killer product) 的利基。而類太陽光特性的發現，更是另一股助力。

OLED 作為照明具有節能減碳、無汞、原材料永續無缺、驅動電壓低且安全、平面發光、光色多變且自然、冷光無高熱、薄且輕、可曲可撓、可印刷製造[13]、演色性 (color rendering index, CRI) 高等特性。

(1) 節能減碳

OLED 的能量效率已超過傳統白熾燈泡，更接近螢光燈管，多波長近自然光效果，使 OLED 勢必成為未來高品質照明的主要技術。為了節能，自 2000 年起，美國能源部[14] 以每年 3,000 萬美元投入固態照明之研發。OLED 相關之研究經費，至

表 1. 世界白熾燈泡禁用表 (資料來源：PIDA 和 LED Inside)。

國家	政策
歐盟	2012 禁止銷售傳統燈炮
美國	大多數白熾燈泡將於 2014 年禁止銷售
加拿大	2012 年起禁用白熾燈炮
澳洲	2010 年起逐步禁止使用白熾燈泡
紐西蘭	2009 年起禁用白熾燈泡
日本	2012 年停止制造和銷售高耗能白熾燈泡
台灣	2012 年底全面停止使用白熾燈泡
韓國	2013 年底起禁止使用白熾燈泡
中國	10 年內全面禁用 (禁售) 白熾燈泡

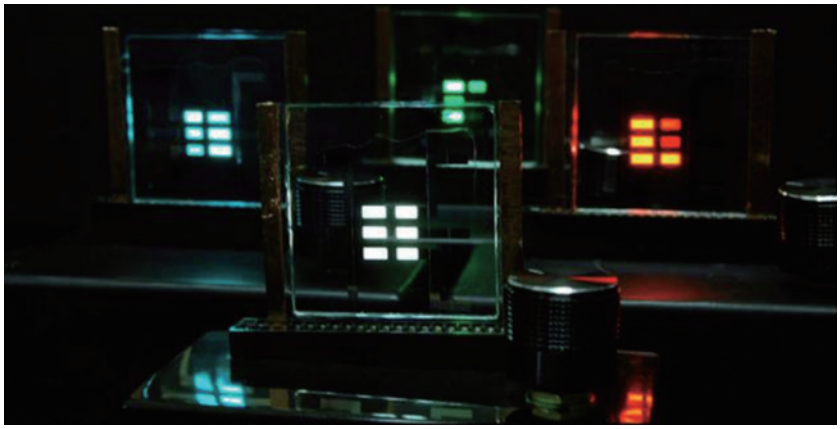


圖 2.
平面光 OLED 的各種色光。

今已投入約 2,600 萬美元；全球三大照明製造商：Philips、Osram、GE 等，均參與 OLED 照明應用研究計畫。

(2) 環保無汞、無紫外線

螢光燈管能量效率高，但是含汞燈管，將成環保問題。利用紫外線激發可見光的 LED，也需留意紫外線外露時，對人眼產生的傷害。

(3) 原料永續不斷

OLED 以使用有機材料為主。有機材料的組成元素：碳、氫、氧、氮等，大量存在於自然界中或來自原油裡，或來自天然氣中，或來自各樣植物，原料來源永續不斷。尤其是氫、氧可來自水分子，氮在空氣中佔了 80%，而碳又可以回收自擾人的二氧化碳。

(4) 驅動電壓低而安全

OLED 只需幾顆小型電池，或是一顆 9 伏特的電池，就可以驅動發光。因為驅動電壓非常低，使用上非常安全，甚至可隨身佩帶。

(5) 平面發光

傳統的鎢絲燈泡為點光源。日光燈管則為線光源，而且光色偏藍，與自然光色相距甚遠。OLED 為擴散性平面光源，如圖 2 所示，沒有光線過度集中而傷眼的問題，特別適合用於室內或車廂內之照明。

(6) 光色多變自然

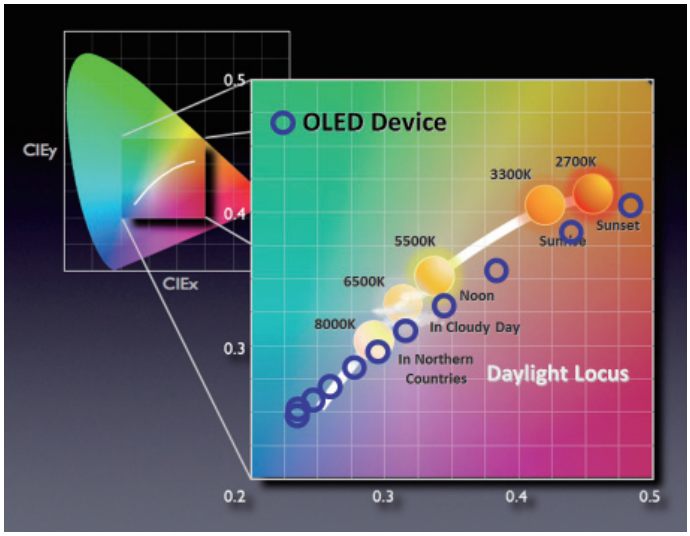
OLED 的光色柔和，其色品是所有照明燈具當中最佳的。其照明白光可設計成三、四或更多波長，接近自然光，而能夠帶給人愉悅、舒適的感受。最重要的是，近來研發的類太陽光 OLED 可發出類似日光的光色，其色品可以完全比照日光，相對色溫可以從 2,000 K 變化到 8,000 K，而涵蓋色溫 3,000 K 的清晨曙光、5,500 K 的正午日光，以及 2,500 K 的落日餘暉，如圖 3 所示。這是人類第一次成功發明出人工照明，除了照亮黑夜，更可以提供日出、日落、陰天、晴天等變化氛圍，讓高緯度長夜地區也可以擁有像日光一般自然多變的光照。

(7) 冷光而無高熱

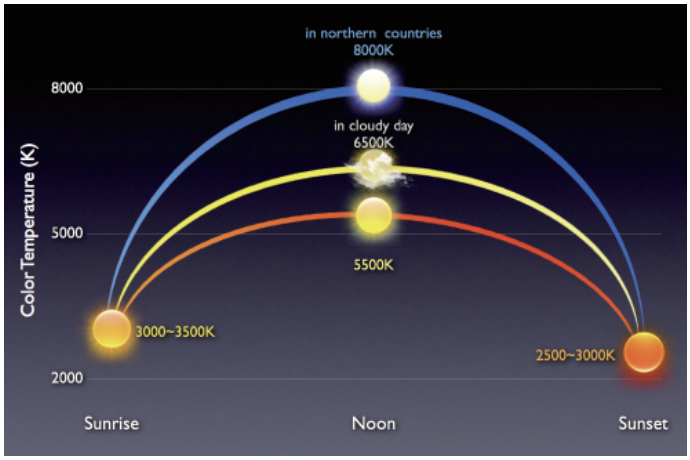
鎢絲燈泡發光效率低，耗電且發熱。高功率 LED 有不易散熱問題，正是目前發展最大的困擾；而且從燈芯到燈具中間，至少 50% 的能量損耗，使 LED 燈具聲稱的高度節能受到質疑。然而，OLED 所發出的是冷光，在使用的時候不發燙，可以減少冷氣的使用。

(8) 薄而且輕

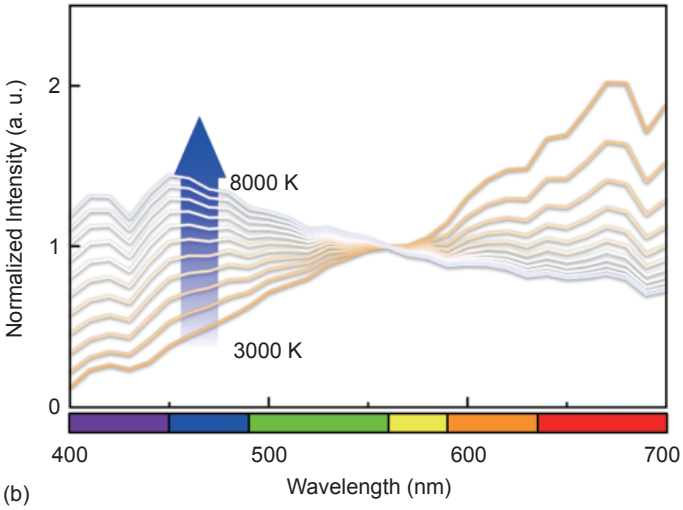
OLED 薄而且輕，特別適合用於有節油需求的飛機等照明上面，甚至適合用於人體佩帶顯示上面，如圖 4 所示。薄薄的燈片形式，將使未來的居家設計掀起一股嶄新的美學風潮。



(a)



(b)



(b)

圖 3. (a) 與 (b) 太陽光在不同時間、緯度、氣候所發光的不同色溫[3, 16]，(c) 色溫 3,000 K 至 8,000 K 的太陽光光譜[16]。

(9) 可捲可撓

鎢絲燈泡、日光燈管或 LED 燈具，沒有一個具有可撓、可捲曲的的特性。由於材質限制，加上技術現實，人類未曾多有奢望可捲可撓的照明器具，直到軟性 OLED 照明技術的出現，如圖 5 所示。軟性 OLED 不只可捲可撓，而且敲不破、敲不壞。這一個獨特的性質，將使照明產品與應用技術更加推陳出新，而遠遠超出現有的想像空間。

(10) 超高演色性

藉由多種染料的添加，可提高 OLED 的演色性，甚至可高達 98，如圖 6 所示[15]，適合攝影、美術館或博物館之使用，加上冷光特質，特別適用於外科手術照明。

(11) 連續製造價格低廉

OLED 照明元件可以做在塑膠片或金屬片上，加上 OLED 照明元件本身可以用印刷等連續方式製作，其製造成本將因此大量降低而形成競爭優勢，前景十分看好。

四、色溫可調變性

如前所述，色溫對人類的生理及心理影響極大[4-11]，高色溫的光源會使人保持清醒並活力充沛[6, 8, 10]。但是長期在晚上照射高色溫的光源，則易增加罹癌的機率，譬如乳癌、大腸癌、攝護腺癌。恰當的作為應該在入夜休息之際熄燈，若是非使用照明不可，則宜將將光線調暗，或轉用無藍光、低色溫的光源，以促使褪黑激素的有效分泌，使人放鬆並進而得以舒眠，如圖 7 所示[7]。

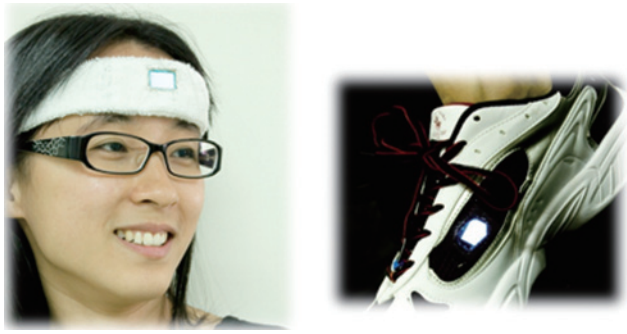


圖 4. OLED 頭帶與球鞋可以讓夜間慢跑更安全。

圖 8 所示為在不同色溫的光源照射下，使褪黑激素分泌量減至一半所需的時間不同。其中，照射蠟燭 (~1,800 K) 和白熾燈泡 (~2,500 K) 所需的時間分別是是 66 和 39 分鐘[12]，而照射較高色溫的光源，如冷白螢光燈管 (~5,600 K) 和白光 LED (5,700 K)，所需的時間則縮短至 13－15 分鐘，因此在夜晚時刻，應選擇較低色溫的光源方有利健康。

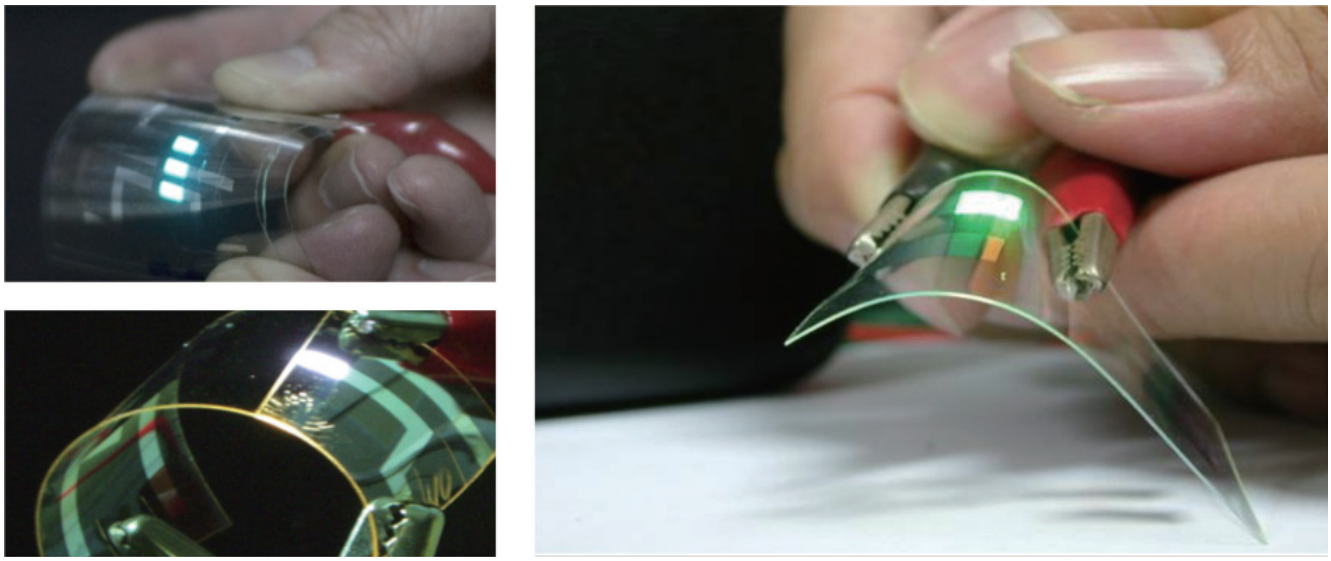
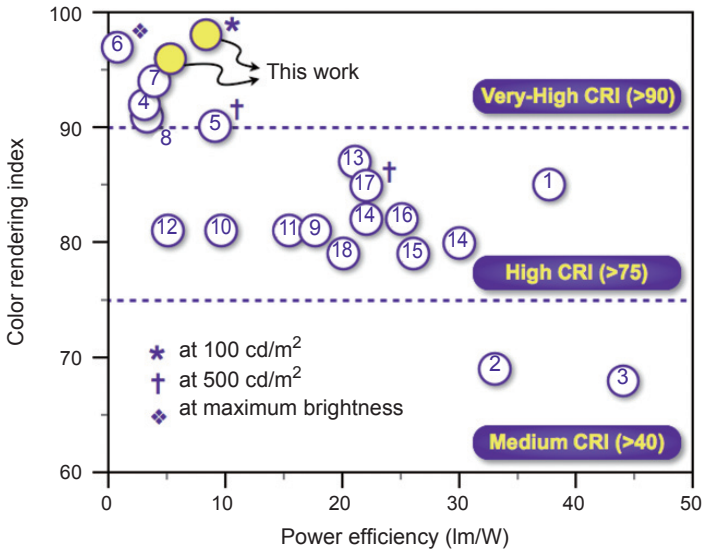


圖 5. 可彎來彎去而且敲不破的可撓式 OLED 照明元件。



1. Y. Sun, N. C. Giebink, H. Kanno, B. Ma, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **440**, 908 (2006).
2. S. Reineke, F. Lindner, G. Schwartz, N. Seidler, K. Walzer, B. Lusseml, and K. Leo, *Nature*, **459**, 234 (2009).
3. S. J. Su, E. Gonmori, H. Sasabe, and J. Kido, *Advanced Material*, **20**, 4189 (2008).
4. X. Niu, L. Ma, B. Yao, J. Ding, G. Tu, Z. Xie, and L. Wang, *Applied Physics Letters*, **89**, 213508 (2006).
5. J. Kalinowski, M. Cocchi, D. Virgili, V. Farrori, and J. A. G. Williams, *Advanced Material*, **19**, 4000 (2007).
6. G. Zhou, Q. Wang, C. L. Ho, W. Y. Wong, D. Ma, and L. Wang, Chemical *Communication*, 3574 (2009).
7. C. H. Chang, K. C. Tien, C. C. Chen, M. S. Lin, H. C. Cheng, S. H. Liu, C. C. Wu, J. Y. Hung, Y. C. Chiu, and Y. Chi, *Organic Electronic*, **11**, 412 (2010).
8. H. Yang, Y. Shi, Y. Zhao, Y. Meng, W. Hu, J. Hou, and S. Liu, *Displays*, **29**, 327 (2008).
9. X. Yang, Z. Wang, S. Madakumi, J. Li, and G. E. Jabbour, *Applied Physics Letter*, **93**, 193305 (2008).
10. M. Cocchi, J. Kalinowski, L. Murphy, J. A. G. Williams, and V. Fattori, *Organic Electronics*, **11**, 388 (2010).
11. S. Seidel, R. Krause, A. Hunze, G. Schmid, F. Kozlowski, T. Dobbertin, and A. Winnacker, *Journal of Applied Physics*, **104**, 064505 (2008).
12. C. H. Chang, C. C. Chen, C. C. Wu, S. Y. Chang, J. Y. Huang, and Y. Chi, *Organic Electronics*, **11**, 266 (2010).
13. Y. Sun and S. R. Forrest, *Journal Applied Physics*, **100**, 073106 (2006).
14. H. Kanno, N. C. Giebink, Y. Sun, and S. R. Forrest, *Applied Physic Letters* , **89**, 023503 (2006).
15. S. H. Eom, Y. Zheng, E. Wrzesniewski, J. Lee, N. Chopra, F. So, and J. Xue, *Applied Physic Letters*, **94**, 153303 (2009).
16. G. Schwartz, S. Reineke, K. Walzer, and K. Leo, *Applied Physic Letters*, **92**, 053311 (2008).
17. G. Schwartz, S. Reineke, T. C. Rosenow, K. Walzer, and K. Leo, *Advanced Functional Material*, **19**, 1319 (2009).
18. H. Kannoa, Y. Sun, and S. R. Forrest, *Applied Physics Letters*, **89**, 143516 (2006).

圖 6. 2006 年至 2010 年白光 OLED 效率與演色性對應圖[15]，無特別標記者為亮度在 1000 cd/m^2 之效率。

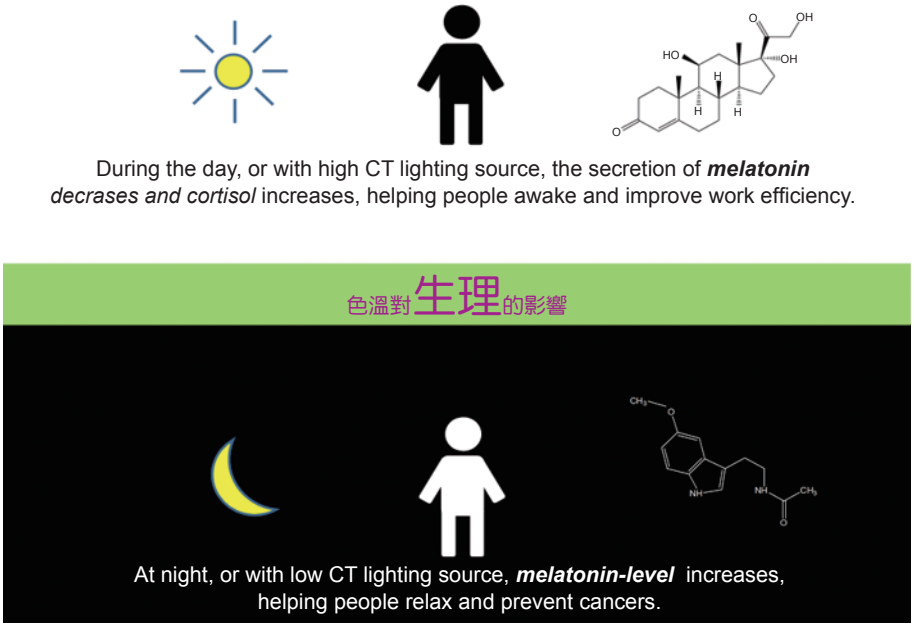


圖 7.
色溫對人生理的影響。

五、類太陽光光譜相似性

目前對於高品質照明尚未有統一的標準，因此有些廠商使用演色性作為稱尺，以作為銷售噱頭。傳統的燈具如蠟燭和白熾燈泡，其演色性可達 100；螢光燈管普遍可達 80 以上，高者可達 90。LED 透過複雜的設計，也可得到 90 以上的演色性。而 OLED 則藉由多染料的摻雜，即可得非常接近 100 的演色性[15]。然而，螢光燈管和 LED 等具有間續尖起的光譜之光源，如圖 9 所示，以演色性作為高品質照明的指標，似乎無法令人信服。

因此，我們以自然的太陽光為最高品質的照明，提出「太陽光光譜相似性 (sunlight style resemblance, SSR)」，如圖 9 所示，作為評判高品質照明光源的準則。節能的螢光燈管及 LED，其演色性雖有 82 及 75，但存在尖刺、不連續的放光光譜，使其太陽光光譜相似度非常差。而白熾燈泡雖有最高的 SSR (72)，但其能量效率過低，近年已逐步禁用。相較之下，OLED 天生擁有寬廣的發光光譜，藉由多種染料的摻雜，以及簡易的元件設計，進而調控色溫以及各個峰值的強度，達到高太陽光光譜相似度 (SSR = 63)。

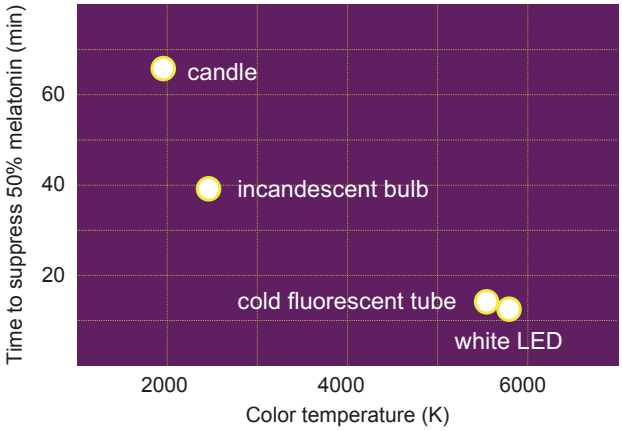


圖 8. 不同色溫光源抑制一半褪黑激素所需的時間[12]。

六、OLED 所面臨的挑戰

就技術面而言，OLED 照明現階段所面對的挑戰有三項，亦即：壽命、效率與成本。OLED 元件使用壽命，基本上和其使用的亮度平方成反比，也就是當所使用的亮度變成兩倍時，其可使用壽命將變成原來的 1/4。由於 OLED 元件壽命與其效率高低有關，拜高效率元件之賜，特別是元件內部出光與外部出光結構之設計與改良，白光 OLED 能量效率躍增 100%，相對地，其原有可能壽命，從 100,000 小時推進到 400,000 小時，問題就剩該項技術量產的成本效益。

圖 10 顯示自 1995 年至 2011 年白光 OLED 能量效率的世界紀錄。趨勢清楚指出，白光 OLED 的效率逐年上升，截至 2011 年為止，白光 OLED

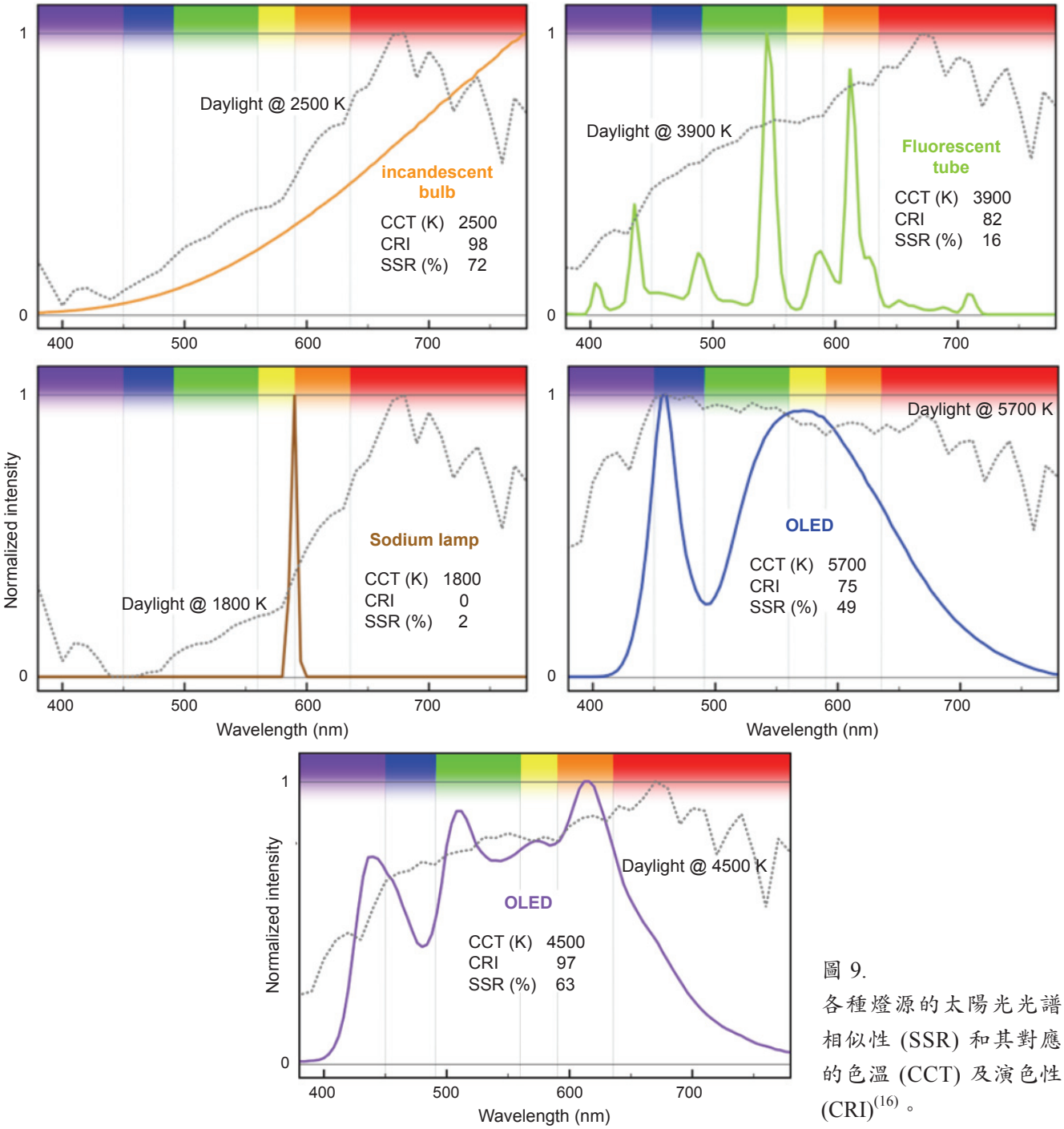
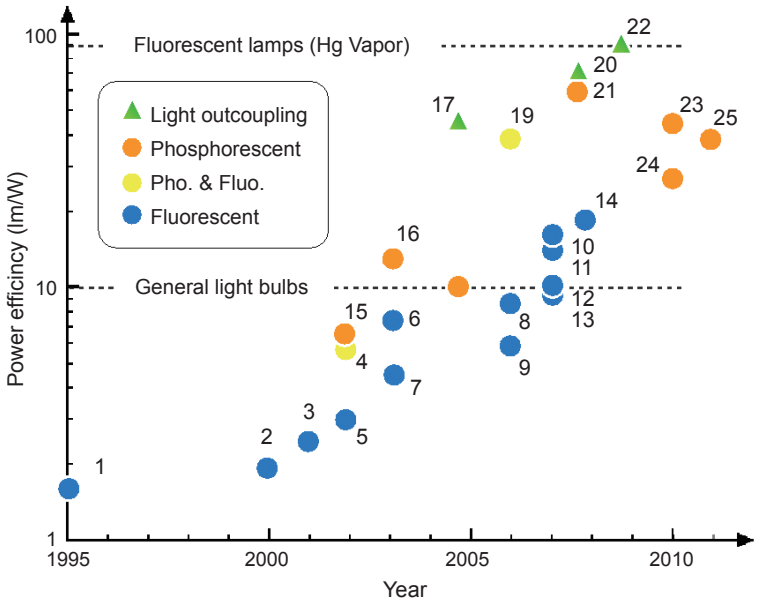


圖 9.
各種燈源的太陽光光譜相似性 (SSR) 和其對應的色溫 (CCT) 及演色性 (CRI)[16]。

透過出光擷取，其能量效率已直逼 100 流明瓦，已和螢光燈管並駕齊驅。日本城戶淳二教授更指出：已看到 200 流明瓦的可能性。目前效率雖只有 LED 的一半，但因 LED 在經晶粒封裝與光線分散之後，再加上高溫致使效率下滑等因素，其能量效率幾乎減半，故實際上，OLED 已可和 LED 同台競爭。

實際上，製造 OLED 照明的成本才是決勝的關鍵。而成本首要決定關鍵在專利，再者是設備，再其次是模組與材料；台灣對國外設備的依賴將近百分之百，這將是最大的隱憂。所幸，國內工研院機械所等一些有遠見的專家，正努力提案研發新穎面型蒸鍍製造設備，開發自有製造技術，將可大量提高材料使用率，並加快生產速率，直接降低生產



[1] J. Kido, et al. *SCIENCE* 267 (1995)
[2] Y. D. Jin, et al. *Chemical Physics Letters* **325**, 251 (2000)
[3] Y. T. Tao, et al *Applied Physics Letters* **79**, 25 (2001)
[4] J. H. Jou, et al. *Applied Physics Letters* **80**, *15* (2002)
[5] Y. T. Tao, et al *Applied Physics Letters* **81**, 24 (2002)
[6] M. E. Thompson, et al *New J. Chem.*, **26,** 1171 (2002)
[7] G. Cheng, et al. *Applied Physics Letters* **82**, *24* (2003)
[8] J. H. Jou, et al. *Applied Physics Letters* **88**, *193501* (2006)
[9] J. H. Jou, et al. *Org. Electronics* **7**, 8 (2006)
[10] J. H. Jou, et al. *Org. Electronics* **8**, 29 (2007)
[11] J. H. Jou, et al. *Org. Electronics* **8**, 735 (2007)
[12] C. S. Lee, et al. *Applied Physics Letters* **91**, *023503* (2007)
[13] C. S. Lee, et al. *Applied Physics Letters* **90**, *203510* (2007)
[14] J. H. Jou, et al. *Adv. Funct. Mater.* **18**, *121* (2008)
[15] S. R. Forrest, et al. *Adv. Mater,* **14**, *No. 15,* (2002)
[16] M. E. Thompson, et al. *Org. Electronics,* **4**, 77 (2003)
[17] R. F. Service in *Science* **310,** 1762 (2005)
[18] S. Tokito, et al.*Current Applied Physics* **5** 331 (2005)
[19] S. R. Forrest, et al. *Nature* **440** 13 (2006)
[20] S. R. Forrest, et al. *Nature Photonics* **2**, 483 (2008)
[21] J. Kido, et al. *Adv. Mater*. **20**, 4189–4194 (2008)
[22] Sebastian Reineke, et al. *Nature* **459** 14 (2009)
[23] J. Kido, et al. *Adv. Mater.* **22**, 5003–5007 (2010)
[24] D. Ma, et al. *Adv. Mater.* **22**, 5370–5373 (2010)
[25] Y. Wang, et al. *J. Mater. Chem.* **21**, 3551–3553 (2011)

圖 10. 白光 OLED 自 1995 年至 2011 年的能量效率發展一覽[17]。

成本，有效提升全球競爭能力。

然而，台灣發展 OLED 照明或顯示能否有效成功，均莫過於政策影響！和過去台灣矽谷的興起一樣，必須要有政策的重視，才能發揮整合的效果。「OLED 群聚」、或是「有機電子谷」，若能適時獲得政策的些許重視，產業鏈一旦形成，上中下游整合，OLED 製造成本自然可以進一步大幅降低，優質 OLED 產品自然應運而生，產品技術優勢自然提升。因此之故，在發展技術之餘，科技人仍得學習善用民主運作機制，有效督促政府制訂相關產業政策，方可取得致勝先機。

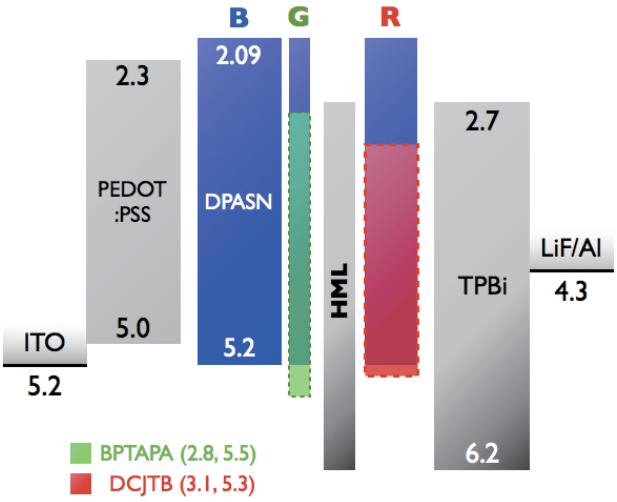


圖 11. 類太陽光 OLED 元件結構示意圖[3]。

七、類太陽光的產生

要產生如同太陽光的光色，首先必須選擇恰當的發光染料和配比，以使元件所得光色和太陽光相似；其次，最好使用三或更多種的發光染料，以使所得光色變化軌跡，可以像太陽光色，如在 CIE 色座標圖上的日光軌跡一般，逐漸彎曲改變。

圖 11 顯示螢光型類太陽光 OLED 的元件結構圖，依次為陽極 (indium tin oxide, ITO)／電洞注入層／藍光發光層／綠光發光層／載子調製層 (carrier modulating layer, CML)／紅光發光層／電子傳輸層／電子注入層 (LiF)／陰極 (Al)[3]。色溫可調變的關鍵在於載子調制層的選用，和其在元件中的放置位置。在選用載子調制層時，必須考慮到其

能階結構是否恰當，對螢光型 OLED，需考慮其單重態能隙，對磷光型 OLED，則必須同時顧慮到單重態和三重態能隙。選擇合適的載子調制層，方能在不同電壓下得到理想的載子分布情形，並使最終放射光色皆坐落在日光曲線或附近。

八、結論

人類的照明史至少有五千多年，然而可以選用的燈源卻屈指可數，當中兼具對人類健康與環境保護的光源，更是聞所未聞。OLED 具有節能減碳、無汞、原材料永續無缺、驅動電壓低且安全、平面發光、光色多變且自然、冷光無高熱、薄且輕、可彎可撓、可印刷製造、高演色性等特性，更重要的是其仿太陽光的能力，能讓室內擁有和室外同樣的自然光，且能依不同時間、地域、緯度調整色溫。此般超高自由度的燈源，讓人類不再被燈源所侷限，而是能自在地依個人喜好調整適當的色溫。

此項發明對於照明、攝影、裝潢、心理、醫學、農業等領域發展，均將有所助益。冬日或長期無陽光照射的地區，如：冬日的北歐，人們因長期照射不到日光而發生嚴重的憂鬱，甚至自殺，或可因此照明而獲致改善。

就技術面而言，OLED 照明目前所面對的挑戰有壽命、效率與成本問題，其中製造成本是決勝的關鍵。然而，OLED 具有其他光源無法提供的功能，譬如：溫和、自然、色溫可調、透明、可撓等的特質，則是 OLED 的致勝關鍵。OLED 技術在這兩三年的快速進展，給了人們第三種的照明選擇，亦即「節能且健康」。

參考文獻

1. D. B. Judd, D. L. MacAdam, and G. Wyszecki, *Journal of the Optical Society of America*, **54**, 1031 (1964).
2. S. R. Das and V. D. P. Sastri, *Journal of the Optical Society of America*, **55**, 319 (1965).
3. J. H, Jou, M. H. Wu, S. M. Shen, H. C. Wang, S. Z. Chen, S. H. Chen, C. R. Lin, and Y. L. Hsieh, *Applied Physics Letters*, **95**, 013307 (2009).
4. J.M. van Bommel Wout, J. H, Jou, M. H. Wu, S. M. Shen, H. C. Wang, S. Z. Chen, S. H. Chen, C. R. Lin, and Y. L. Hsieh, *Applied Ergonomics*, **37**, 461 (2006).
5. R. Küller and L. Wetterberg, *Lighting Research and Technology*, **25**, 71 (1993).
6. P. R. Mills, S. C. Tomkins, and L. J. M. Schlangen, *Journal of Circadian Rhythms*, **5**, 2, (2007).
7. S. M. Pauley, *Medical Hypotheses*, **63**, 588 (2004).
8. G. C. Brainard, B.A. Richardson, T. S. King, and R. J. Reiter, *Brain Res*, **294** (2), 333 (1984).
9. S. W. Lockley, G. C. Brainard, and C. A. Czeisler, *The Journal of Endocrinology & Metabolism*, **88** (9), 4502 (2003).
10. F. A. J. L. Scheer and R. M. Buijs, *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, **84**, No. 9, (1999).
11. M. Sato, T. Sakaguchi, and T. Morita, *Biological Rhythm Research*, **36** (4), 287 (2005).
12. S. M. Pauley. *Medical Hypotheses*, **63**, 588 (2004).
13. F. So, J. Kido, and P. Burrows, *MRS Bulletin*, **33**, 663 (2008).
14. http://www.eere.energy.gov/
15. J. H. Jou, S. M. Shen, C. R. Lin, Y. S. Wang, Y. C. Chou, S. Z. Chen, and Y. C. Jou, *Organic Electronics*, **12**, 865 (2011).
16. J. H. Jou, S. M. Shen, M. H. Wu, S. H. Peng, and H. C. Wang, *Journal of Photonics for Energy*, **1**, 011021 (2011).
17. J. H. Jou, Y. C. Tsai, and S. M. Shen, *ACS Journal*, **3**, 3134 (2011).

周卓煇先生為美國密西根大學高分子科學與工程學系博士，現任國立清華大學材料科學工程學系教授。

Jwo-Huei Jou received his Ph.D. in macromolecular science and engineering program from the University of Michigan. He is currently a professor in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.

周永晟先生現為國立清華大學材料科學工程學系碩士班學生。

Yung-Cheng Jou is a MS student in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.

彭祥灝先生現為國立清華大學材料科學工程學系博士班學生。

Shiang-Hau Peng is a Ph.D. student in the Department of Materials Science and Engineering at National Tsing Hua University.