

高亮度發光二極體於生物產業之應用

方 焯⁽¹⁾ 饒瑞佶⁽²⁾

- (1). 國立臺灣大學生物產業機電工程學研究所教授
- (2). 私立建國技術學院資訊管理系助理教授

摘要

長久以來在農業生產上，螢光燈管 (Tubular Fluorescent Lamp, TFL) 與高壓鈉燈(High Pressure Sodium Lamp, HPS)是最主要也最普遍的人工光源。如何補光、提高補光均勻度、調整光質與研發更高效率的人工光源一直是學界研究的重點。近年來光電技術的進步大幅提昇了發光二極體 (Light-Emitting Diode, LED) 的亮度與效率，使得利用此種光源在農業生產上變得可行。發光二極體具有高光電轉換效率、使用直流電、體積小、壽命長、波長固定與低發熱等幾項優點，相較於目前使用螢光燈或高壓鈉燈為人工光源的系統而言具有光量 (Light Intensity) 可調整、光質 (Light Quality, 紅/藍光比例或紅/遠紅光比例) 可調整、冷卻負荷低與允許提高單位面積栽培量等優點，因此對封閉有環控的農業生產環境 (如植物組織培養室、植物生長箱等) 是一種非常適合的人工光源。美國太空總署首創 LED 應用於太空農業上，其後續亦將 LED 應用於治療惡性腫瘤的光動力療法上取代傳統使用的雷射光。皮膚醫學領域繼雷射，脈衝光之後，LED 也成了新寵，其在柔光回春(low intensity photo rejuvenation)領域的應用正方興未艾；其他光療法應用領域包括對關節炎、黃膽病、生理時鐘失調、心肌梗塞、中風、紓解壓力、鼻炎、皰疹與季節性情感失調等的治療。本文針對近年來發光二極體在生物產業上之應用做一回顧。

關鍵詞：人工光源，發光二極體，生物產業，組織培養，光療法，光回春

前言

發光二極體(Light-emitting diode, LED)的相關產品早在 1968 年就已經問世，不過當時光強度低且沒有全彩化，所以應用上仍侷限於標示或觀賞等用途。經過這幾年光電科技的進步，不但發展出高亮度的 LED(1980 年代中期)，1993 年日本日亞公司(Nichia)更成功開發出高亮度藍光 LED，使全彩化的 LED 產品得以實現，也拓展了其用途，包括汽車、通訊產品、資訊產品、交通號誌、照明及生物產業等，其中生物產業上的用途就是近幾年來相當熱門的一個領域。本文旨在針對近年來高亮度發光二極體在生物產業上的應用做一回顧。所謂生物產業，在此分為農業生產與生物醫療兩大方面。

一、 農業生產上的應用

光為植物生長中重要的環境因子之一，主要來自於太陽的輻射能。太陽的輻射自極長之無線電波、遠、中、近紅外線、可見光、紫外線 A、B、C、X 射線至極短之宇宙線，為一種連續光譜，一般稱為電磁波。

隨著科技進步及農業生產型態的改變，漸漸導入人工光源來取代或補充天然日光的不足已是環控農業中的常態，使用的人工光源包括螢光燈(Tubular Fluorescent Lamp, TFL)、高壓鈉燈(High Pressure Sodium Lamp, HPS)、金屬鹵素燈(Metal Halide Lamp, MHL)及燈泡(Incandescent Lamp)等。

高效率人工光源的發展一直是農業生產上或研究上非常重要的一項課題(Bula, et al., 1991)。近年來光電技術的進步帶動了高亮度紅光、藍光與遠紅光發光二極體(Light-Emitting Diode, LED)的誕生，LED 具有高光電轉換效率、使用直流電、體積小、壽命長、波長固定與低發熱等優點，相較於目前普遍使用的螢光燈或高壓鈉燈而言具有光量(Light Intensity)可調整、光質(Light Quality, 紅/藍光比例或紅/遠紅光比例等)可調整、冷卻負荷低與可提高單位面積栽培量等優點，因此對氣密性良好有環控的農業生產環境如太空農業，植物組織培養室或植物生長箱等是一種非常適合的人工光源(Barata et al., 1992; Bula et al., 1994; Hoenecke et al., 1992; Eiichi et al., 1997)。基於光量與成本的考量，動物生產上尚無應用 LED 的先例，但使用其他人工光源則已頗為普及。

1. 光與植物栽培

在太陽輻射電磁波中有三區段的輻射對植物生長發育有決定性的影響，除了可見光(380 780 nm)外，尚有紫外線(UV, 100 380 nm)和紅外線(780 10⁵ nm)。此主要是由於植物的三套受光系統所致，葉綠素吸收近於 660nm 波長進行光合作用，光敏素吸收 660、730nm 波長控制許多形態發生的反應；而類胡蘿蔔素吸收 450 nm 波長引起屈光性以及高能量光形態發生(photomorphogenesis)。

植物是唯一能夠把太陽光能量轉化為質量的生物，植物的光合作用是地球上一切生命的基礎。光合作用需要波長範圍在 400 700nm 之間(可見光部分)的光，但是光對植物的影響除了提供光合作用所需之外，尚包括光週期(photoperiod)的調節，另外，光質(紅、藍光比例，紅、遠紅光比例等)對植物的型態發生亦有決定性的影響。

超高亮度 LED 研發成功後，基於價位的考量與適當波長的取得不易，早期只限於太空農業的相關研究。超高亮度紅光與藍光 LED 的售價在 1994 年分別高達 1 美元與 8 美元 1 顆，在台灣尚無法小額採購；1998 年 2 月在台灣的單價分別為 10 元台幣與 40 元台幣 1 顆，1999 年 8 月已分別降至 3 元台幣與 26 元台幣 1 顆。目前，2002 年 6 月分別降至 3 元與 9 元台幣 1 顆。

後續，隨著光電科技的進步，光量更增，價位更降與取得容易的結果，造成全球性應用超高亮度 LED 於作物栽培的研究正方興未艾。截至目前為止，LED 已經被應用於許多植物光生理領域的研究或植物栽培上，例如藻類培養生物反應器(Lee and Palsson, 1994)、葉綠素合成研究(Tripathy and Brown, 1995)、光型態發生(Hoenecke et al., 1992)及光合作用(Tennessen et al., 1994; Tennessen et al., 1995)等研究上。

在作物種類上許多作物或花卉已經被證實可成功的應用 LED 來栽培，包括有：萵苣(Bula et al., 1991; Hoenecke et al., 1992; Yanagi et al., 1996; Okamoto et al., 1997)、胡椒(Brown and Schuerger, 1995; Schuerger et al., 1997)、胡瓜(Schuerger and Brown, 1994)、小麥(Tripathy and Brown, 1995; Goins et al., 1997)、菠菜(Yanagi and Okamoto, 1994)、虎頭蘭(Tanaka et al., 1998)、草莓(Nhut et al., 2000)、馬鈴薯(Iwanami et al., 1992; Miyashita et al., 1995; 饒與方, 2001, Jao and Fang, 2002)、蝴蝶蘭(饒與方, 2002)、白鶴芋(Nhut et al., 2001)及藻類(Lee and Palsson, 1994; Hans, et al., 1996)。其中，在藻類栽培上證實只需要紅光 LED 即可(Hans et al., 1996)，但是對其他植物而言，除紅光外，藍光(Hoenecke et al., 1992)與遠紅光(Miyashita et al., 1995)光量大小同時會影響生長及型態發生。不同紅、藍與遠紅光組合光源光譜可以影響並控制某些植物病原菌的發生(Schuerger and Brown, 1994, 1997)。

組織培養是在室內快速且大量繁殖植物種苗的方法，一般使用螢光燈為人工光源。然而，基於燈管的壽命、發光效率不夠理想與發熱大，用於照明與降溫的耗電成本頗高。研發較低散熱與較高效率的人工光源以降低量產成本為業界所需。饒與方(2001)使用紅光與藍光高亮度 LED 建立可調整光量、光質、給光頻率(Frequency)與工作比(Duty Ratio)的人工光源，可視需要提供連續無閃爍的光或高頻閃爍的光。在不影響植物生長速率下，工作比可調進一步提供省電空間。此設備可作為植物光生理研究者的研究工具。

因為 LED 使用直流電源，因此同時具有光量、頻率與工作比可調整的特性，進而可產生出連續光源(Continuous Light)或間歇光源(Intermittent Light)的變化，Lee and Palsson(1994), Hans, et al.(1996)與 Ladislav et al.(1996)就使用 LED 所產生

的間歇光源來促進藻類的生長與生產；Iwanami et al.(1992)透過使用 LED 補充紅光或遠紅光光量來改變光質，進而討論控制馬鈴薯組培苗莖長度與生長狀況；Yanagi et al.(1996)使用紅光與藍光 LED 來探討光質與光量對萵苣生長與光型態發生(Photomorphogenesis)之影響。Nhut et al.(2000) 發現使用 LED 作為草莓組培苗生長的人工光源可提高其在馴化階段之存活率，同時亦使用 LED 作為白鶴芋組培苗生產之人工光源(Nhut et al, 2001)，比起螢光燈光源來更加有效率。Johnson et al.(1996)發現將原先定義的光重力(Light-Gravity)光譜範圍擴大延伸到紅外光光譜區，實驗發現加入紅外光 LED 光源將改變原燕麥苗的生長狀態與對重力的反應(Gravitropic Response)。

Jao and Fang (2001b, 2003b)使用高頻閃爍的紅、藍光 LED 為光源(2001a, 2003a)，發現可在不提高耗電成本下提高馬鈴薯組培苗的生長速率。饒與方(2002)使用不閃爍的紅、藍光 LED 栽培蝴蝶蘭種苗，發現與螢光燈下栽培除了葉長之外並無明顯差異，證實 LED 可用來栽培蝴蝶蘭組培苗，亦適用於做為光型態發生基礎研究之人工光源。

饒與方(2002)使用不閃爍的紅、藍光 LED 為光源(2001a, 2003a)，探討在總累計光量不變(5.67 mol/m^2 ，紅光總計佔 40%，藍光總計佔 60%)與光週期不變(16/8 hrs 明期/暗期)的情況下，同時給紅、藍光(各 1 單位光量，各 16 小時)與交替給紅、藍光(各 2 單位光量，各 8 小時)時，對馬鈴薯組培苗生長的影響。結果顯示同時提供紅、藍光者有最高生長速率；總累計光量相同時，低光量、長光照時間優於高光量、短光照時間；當給藍光時間(譬如 8 hrs)短於給紅光時間(譬如 16 hrs)時，最佳的給光時機是一開始就同時提供紅光與藍光 (Jao and Fang, 2003c)。

2. 燈具改良與儀器研發

除了在植物生理與植物栽培應用上的研究外，許多學者也投入 LED 光源本身特性及燈具改良與研發上的研究。Takita et al.(1996)發展 LED 光源光量與光譜分佈模擬模式，將 LED 當作點光源(Point Light Source)並配合光量倒平方法則(Inverse Square Law)來建立模式，協助預測及計算使用 LED 為光源時栽培平面上之光量與光質(B/R Ratio)分佈狀況。

Ono et al.(1997)量測了四家公司(Everlight, Panasonic, Toshiba and Rohm Corp.)生產的紅、藍光 LED，並找出各自最佳的工作電壓及電流，Fang and Jao (2000)則針對另外四家(Excellence, Everlight, Hewlett Packard and Nichia Corp.)做了相同的檢驗(結果如表 1 所示)，同時計算其在光量子、照度與能量單位間之轉換常數，結果如表 2 所示。表 3 則列出了本論文中所提及相關研究所使用應用於植物栽培的 LED 產品規格。

Okamoto et al.(1996)發展使用 LED 為光源的栽培盒，方法是將 LED 封裝在培養盒(11 cm x 11cm x 14 cm)的蓋子上當作光源，總共使用 9 顆藍光 LED 與 36

類紅光 LED(此部份另稱為 LEDCAP), 並將此設備命名為 UNIPACK, 之後許多類似設備但命名不同的產品也相繼由相同團隊研發完成, 包括有 LED PACK, BIOLED 及 COMPACK 等。一套使用 LED 為光源, 適合教學與植物光生理研究的設備- Photo-Manipulation-Boxes 也在 2000 年問世(Williams, 2000), 並應用此設備進行一系列莖莖種子發芽光生理之研究。除上述偏重研究用途之設備外, 市面上也已經開始販售使用 LED 為光源並搭配有人機操作介面(Human Machine Interface)的植物生長箱(Ryusho Industrial Co., Japan; Quantum device, USA)。上述設備都同時搭配有紅光(660nm)、藍光(470nm)與遠紅光(735nm)三種光譜波段之 LED 光源, 而這符合大部分植物在光生理與光合作用中光敏素與葉綠色之吸收光譜, 這種選擇光譜的特性是傳統人工光源所無法達成的。

應用高等植物葉片內葉綠素 a, b 對不同光譜有不同吸收能力的特性, 亦有廠商研發葉綠素偵測儀器(Minolta SPAD 502, Spectrum Technologies, U.S.A.), 該儀器內主要使用 650 與 940nm 波長的紅光與紅外光 LED, 量測前者的穿透率可間接求出吸收率, 650nm 的波長極接近葉綠素 a 與 b 吸收光譜的兩個峰值之一; 量測後者的穿透率則可作為校正基準。然而, 此設備無法區分葉綠素 a, b 為其缺失。陰性植物葉綠素 a/b 比值通常低於 3, 陽性植物則通常高於 3 (Chang and Troughton, 1972), Dale and Causton (1992)認為葉綠素 a/b 比值可作為植物適應光環境的指標。目前尚無可分別量測葉綠素 a 與 b 或量測葉綠素 a/b 比值的儀器。

Jao and Fang(2001a)使用 LED 為光源發展一套適用於組培苗與種苗栽培的光源設備-LEDSet, 主要包含 4 顆高亮度藍光 LED 及 9 顆高亮度紅光 LED、一個驅動器、一個控制器及一支由市售一公尺長電軌改良的裝置。透過控制器可調整光量、光質、頻率與工作比(Jao and Fang, 2001b)。此控制設備與光源已獲得台灣、中國與美國之專利(方等, 2001a, b; Fang et al., 2002), 後續做了一些改良並完成技術轉移 (Jao and Fang, 2003a), 相通技術亦擴展至植物生長箱新型光源之設計, 並獲得台灣、中國與美國之專利(方等, 2001c, d; Fang et al., 2003)。光量分佈的均勻度可透過電腦模擬軟體進行設計(饒與方, 2000)。該設備在 10 cm 距離內(一般常用組培瓶高度)可提供 $120 \pm 20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光量, 可搭配現行栽培架進行安裝, 同時因為 LED 低發熱的特性, 栽培時可以盡可能靠近組培瓶, 也同時提高原栽培架的空間利用率。

LED 做為作物栽培的光源, 可提供高度的彈性, 譬如: LED 可提供各種色光, 常用的為藍光(450nm), 紅光(660 nm)與紅外光(730 nm)。LED 具光量可調的特性允許模擬一天中太陽光強度的變化; 給光頻率與工作比可調的特性, 允許提供高頻間歇給光模式, 有利於探討光合作用中光反應與暗反應的相關機制, 並允許進一步節省用電; 紅光配合藍光 LED 的使用能提供一適當的光質; 紅光與紅外光 LED 搭配可探討兩者對光型態發生的影響, 進而了解光敏素的機制。

3. 光與動物生長繁殖

光強度、光質與光照時間三者對動物的影響反應於生產上的包括乳牛的泌乳量，蛋雞的產蛋率，肉雞、肉牛等的增肉率，與雞蛋內膽固醇含量等。

周(2002)使用計數器配合單晶片電路研發低價的雞蛋計數系統。初步安裝 8 個蛋道，量測一個月的數據已明顯觀察出立體化環控雞舍內上下層光量差異明顯與產蛋率呈現正相關。

牛舍內照度不足會明顯影響食慾，亦會影響增肉率與泌乳量(ASAE, 1988)，肉雞舍生長管理中頗重要的一項即為光線管理。Lieberman(1991)提及全譜光下飼養的雞隻比其他人工燈光下飼養的雞來得健康，壽命延長兩倍，能下更多蛋，且所下的蛋大約減少 25%的膽固醇含量。

二、 生物醫療上的應用

除了農業生產上的應用外，LED 做為醫療儀器光源亦具有高度發展潛力，相較於動、植物光生理學，人體光生理學是值得深入了解與待開發的一塊新領域。

1. 光線與自律神經系統

Krakov(1951)檢驗色彩視覺與自律神經系統的關聯，提出紅光可以刺激交感神經系統，代表增加興奮和緊張；而藍光可刺激副交感神經系統，代表放鬆、減輕焦慮和減輕敵意。而此項說法在 1958 年被 Gerard 所證實(Lieberman, 1991)。此類用於紓解壓力的光照療法在近年來已有專利被申請 (Frenkel and Frenkel, 1999)，專利內容強調有色的色光，對光源種類則無明確訂定。

2. 光線與生理時鐘

光線進入眼睛提供了視覺與非視覺功能，前者到視網膜，後者到腦中的下視丘、腦下垂體與松果腺(epiphysis cerebri)，其中松果腺則與生理時鐘直接相關。松果腺，字義為腦的頂端，位於兩個腦半球中心深處，在腦垂體的後上方，大小如豌豆。松果腺針對透過眼睛進入的光資訊，協調整個人體運作以及和外界的一致變化。它藉由運用來自下視丘的生理時鐘相關訊息，決定何時釋出功能強大的褪黑激素(Melatonin)。褪黑激素是重要的神經內分泌調節器，可調節身體的分泌節律，並對大部份人體器官的自律、荷爾蒙及行為功能等有著深遠的影響。由於褪黑激素可穿透任何體內血管障壁的特性，使它在生理功能扮演中樞的角色，且可調合心靈、身體及環境間複雜的交互作用(Lieberman, 1991)。

視網膜接受光源的刺激可以經由神經傳至松果腺，進而改變血清素轉變為褪黑激素的數量。個人的視覺系統必須是完整無缺，才会有正確的褪黑激素分泌節律。儘管環境中充滿了時間變化的刺激，對盲人而言，通常還是沒有正確的褪黑激素分泌節律，只有內生性的循環規律著生理時鐘(Lieberman, 1991)。

澳洲已有治療時差的接近商品化的眼鏡問世，其為在眼鏡內側安裝 LED，

建議使用者在上機之前數天，每天佩帶數小時，即可免除下機後的時差問題。此系統目前仍屬測試階段，若成功，可望應用於 2008 年在澳洲舉行的奧運會上。目前也有應用 LED 治療生理時鐘失調光照療法的專利被申請(Vreman and Stevenson, 2002)。

3. 季節性憂鬱症

根據美國國家心智健康研究院(National Institute for Mental Health , NIMH)的統計，目前約有 10%的美國人患有季節性憂鬱症(Seasonal Affective Disorder, SAD)及相關衍生的健康問題。SAD 發生在秋天、冬天，而春天、夏天就會消失，罹患者是受到陽光不足的影響，心情通常都會隨著季節而改變。這表示日照長短在這段季節裡作為生物時鐘的時間暗示或是賦予者，因其長度或強度不足所造成的結果，是重要的致病原因。現代精神醫學也已相信，使用人工照光方式是改善病情的有效生理療法。

有季節性憂鬱症的患者，其褪黑激素的分泌量會升高。由於完整光譜光線可以減少褪黑激素分泌，因此以光線治療患有 SAD 的病患非常有效。綠色光(540nm)是抑制褪黑激素分泌最明顯的光譜，這與人類視紫質(rhodopsin)的吸收光譜相同。Lieberman(1991)提到 Lewy(1980)認為每日起床後以強度 10,000 lux 的白光照射 30 分鐘可抑制褪黑激素的分泌，可紓解季節性憂鬱。這項觀察結果不僅對瞭解褪黑激素的生理結果非常重要，同時也有助於調節分泌節律，以治療 SAD 及其他健康上的問題。目前已有應用 LED 的相關專利被申請，內容為用於多種生理精神失調的光照療法，譬如 SAD 的光照療法(Lopez-Claros, 1996)。

4. 藍光的醫療應用

60%新生兒有一種稱為膽紅素的黃色色素累積在皮膚與身體組織，終致皮膚泛黃，稱為小兒黃膽。Lucey(1968)臨床證實將患黃膽的新生兒暴露於全譜光或藍光(450nm)八天後，其膽紅素可降至安全範圍。目前已有使用裝有發光二極體的衣服的黃膽新生兒的光療法專利被申請(Vreman, 2003)。另外，McDonald(1982)認為關節疼痛的減輕與藍光及接觸時間有直接關聯。接觸時間愈長，疼痛減輕程度愈大(Lieberman, 1991)。目前已有針對關節炎的光療法專利被申請(Hart and Malak, 2003)。Perricone (2003)也提出使用藍光與紫光為主，綠光為輔，針對皮膚的光療法專利。

5. 紅光的醫療應用

Lieberman(1991)提到近來的研究顯示以不同速度間隔閃爍紅光，開始治療後 1 小時，72%患者表示嚴重的偏頭痛已停止，其餘的 28%中，93%認為感覺好了許多，大多數患者認為快速的閃爍及高強度的光是最舒服的。Texas 州立大學研究發現紅光提昇 13.7%的力量及增加臂肌 5.8%的活動力，研究結果證實紅光可協助需快速爆發力的運動表現。

紅光用於皮膚潰瘍治療與輔助傷口癒合已有專利被申請(Mendes and Lison, 1993)，目前以色列也有商品化產品(Biobeam 660 傷口光療器)問世。該產品在使用時分連續光與 10%脈衝光(100Hz)兩種模式，分別提供淺層(尖峰功率 18 mW)與深層(尖峰功率 75 mW)治療。相同設備亦宣稱對治療單純性皰疹有療效，此部分亦有另一個專利被申請(Mendes and Harel, 1996)，然而專利內容未明述使用何種光源。

6. 紅、藍光併用的醫療應用

Papageorgiou 等(2000)發現藍光(415nm)與紅光(660nm)併用可治療輕微至中度嚴重的青春痘，療程三個月。其中藍光 LED 光譜範圍內包括了 9%在紫外光範圍，具殺菌效果，且不會殺傷皮膚。照射量： 4.23 mW/cm^2 ，每天 15 分鐘，累計 320 J/cm^2 。紅光具抗發炎效果，照射量： 2.67 mW/cm^2 ，每天 15 分鐘，累計 202 J/cm^2 。青春痘光療法亦有只使用紫外光(320-350 nm)的專利被申請，該專利使用雷射為光源 (Kollias, et al., 2003)。

7. 紅外光的醫療應用

Souil et al.(2001)證實 815nm 近紅外線可促進傷口癒合：使用近紅外線雷射二極體可誘導具長效的 72-kDa 熱休克蛋白(heat shock protein, HSP)的產生(HSP 70)。HSP 是溫血動物遭逢體溫升高達 5 時，體內所增生的一種蛋白質，允許身體細胞、組織與器官對抗昇溫逆境。後續發現此蛋白質亦能提高身體對抗低氧症、貧血、發炎與暴露在重金屬污染與菌體內毒素污染等逆境的能力。

針對關節炎、肌腱炎、背痛、網球手肘與五十肩等亦有酸痛光療器(BioBeam 940)的產品問世，然而，該光療器使用的光線波長為 940 nm，屬紅外光(近紅外線)範圍，與前述 McDonald (1982)研究中使用的藍光不同。BioBeam 940 提供兩種使用模式：連續光與 3%脈衝光(100Hz)的尖峰功率分別為 25mW 與 270mW。

8. 光療法應用於美容

光療法使用雷射，從近視、除斑、除毛、除色素等，在美容領域中獨占鰲頭了好一陣子，直到脈衝光(intense pulse light, IPL)興起。脈衝光也是一種能量治療方法，波長從 560 nm 至 1200nm 光譜光波，可配合個人體質作參數的調整，以除斑、除毛與光回春的應用為最受歡迎。

回春治療(photo rejuvenation)主要包括色素、靜脈屈張、血管斑及老化產生的膚質現象如鬆弛、皺紋等，涵蓋範圍廣泛。脈衝光沒有雷射治療後產生的破皮及受傷情況，因此頗受整型診所與愛美女性的喜愛。脈衝光的光源包括了低功率雷射與高亮度 LED。柔光回春治療(low intensity photo rejuvenation) 專指應用高亮度 LED 為光源的脈衝光，市面上已有商品化產品，有分診所使用型與個人使用型。前者台灣有進口，醫院的文宣海報將該設備稱為戰痘藍波，似乎只著重單方面的功能。後者如以色列 Biolight 公司的美光器與美國 DermaWave 公司的類

似產品，兩產品均針對柔光回春市場並宣稱兼有治療青春痘之效果。

回春治療主要針對皮膚的纖維母細胞 (fibroblast) 提供能量以調節其衍生的細胞和膠原蛋白。相關療法的專利包括針對臉部治療(Ella, 2003)與強調使用藍光與紫光為主，綠光為輔的處理皮膚的光療法(Perricone, 2003)。

9. 光動力療法(Photodynamic Therapy)

目前在癌症治療上使用的光動力療法是給癌症病患服用 Photofrin (藥名)，該藥物受紅光照射後可附著於癌症細胞上進而殺死癌症細胞，而光源目前多使用雷射，但雷射有價格昂貴、體積龐大及不穩定的缺點，近來的研究著重在使用高亮度紅光 LED 取代雷射用於光動力療法，LED 的紅光比雷射光溫和，不致傷害其他健康的細胞。不會產生不良副作用。

美國太空總署(NASA)的中小企業創新研究計畫與美國 Quantum 公司共同研發一套以 LED 進行光動力療法的設備，經過 5 年時間的試驗證實確實有效，並且獲得美國食品藥品管理局(FDA)的批准進行更進一步的人體臨床實驗，目前的重點著重在皮膚癌及腦腫瘤的治療上。

10. 無重力下組織癒合研究

在無重力的狀態下，受傷的細胞組織生長復原的相當緩慢，在威斯康辛大學的一組研究人員就使用 LED 為光源來治療受傷的人類細胞，發現生長復原的速度是正常細胞的 5 倍之多(Whelan, 2001)，進一步實驗結果如果確實可行，將來這項技術將可被應用在長途及長時間的太空旅行上，用來治療太空人發生受傷的情形。

11. 其他

其他 LED 相關應用已被申請專利的尚包括用於治療鼻炎(Mendes and Neuman, 1997)，治療心肌梗塞(Streeter, 2003a)與治療中風(Streeter, 2003b)等的光療法。前者也有商品化個人用產品問世(Biolight 公司的光鼻器)。專利說明內容中有關使用何種波長的光，多大的光功率密度(mW/cm^2)與治療時間都未明述，只知使用發光二極體為光源。

結果與討論

LED 光源在目前多屬研究機構進行基礎或應用研究所用，然而，隨著科技的進步，LED 光度的增加與因量產、競爭與達成投資回收所造成價格的降低，LED 取代日光燈光源應用在量產規模的組培苗栽培及作物栽培上應是指日可待

LED 在生物產業範圍內的應用甚廣，除了在環控農業領域取代傳統人工光源使用之外，在作物栽培模式，銷售運輸模式與儀器研發上都有發展空間。紅光

與紅外光可抗發炎，促進傷口癒合，此特性應用於植物組織培養癒傷組織的快速恢復應該頗具發展潛力與商業價值，組培苗出瓶時機與出瓶後馴化存活機率都可做進一步探討。花卉或種苗經長期黑暗運輸不僅會產生乙烯，更會消耗內存糖分，造成負成長。LED 配合電池可提供光補償點的光量，使得長期運輸為可行；當空運可改為海運時，運輸成本的節省相當於提高競爭力。現階段使用儀器只能量測葉片內葉綠素整體的含量，無法區分葉綠素 a 或 b，更無法求出葉綠素 a/b 比值，後者可做為植物適應光環境的指標，可透過不同波長的 LED 進一步研發相關儀器。

動、植物與人體光生理學都是值得深入了解與待開發的領域。尤其是後者，不論是儀器設備的研發或成效的調查，都屬生機領域跨入醫學工程領域很好的切入點。此類研究的進行與落實研究成果需要跨領域的合作與推動，是值得吾人後續努力的方向。

目前雖說已有許多光療法相關專利被申請，但查其內容多半語焉不詳，或許基於機密考量但也有搶先機的意味，是否真正具備療效，仍有待更進一步的人體實驗。市面上國外商品也才開發，仍屬戰國時代，其技術瓶頸並不高，但獲利空間頗高；或許國內的光電業者做應用的下游廠商可針對此方面做一些佈局與相關專利上的迴避，發揮創意開發國人自製的相關產品。如此，不僅可行銷國際，更可避免國外廠商漫天叫價，提供比價與議價的空間與功能。更重要的是療效要有醫界的背書，此方面國外的整合研究正積極開展中，國內不應落後。有興趣的廠商應該主動提供相關設備給醫界或學術界進行整合應用研究。

參考文獻

1. 方煒、李登華、蔡田龍。2001。以發光二極體為光源的植物栽培裝置。中華民國新型第 169676 號。
2. 方煒、饒瑞佶、李登華。2001。以發光二極體為光源的植物栽培裝置。中華人民共和國實用新型專利第 ZL 00 2 54762.7 號
3. 方煒、饒瑞佶、李登華。2001。以超高亮度發光二極體作為人工光源的植物生長箱。中華民國新型第 169896 號。
4. 方煒、饒瑞佶、李登華。2001。以超高亮度發光二極體作為人工光源的植物生長箱。中華人民共和國實用新型專利第 ZL 00 2 54761.9 號。
5. 周志遠。2002。雞蛋計數器之研發。學士論文。台北：台灣大學生物產業機電工程學系。
6. 饒瑞佶、方煒。2000。組合式紅、藍光發光二極體燈具之給光環境模擬。農業機械學刊 9(3): 51-63。
7. 饒瑞佶、方煒。2001。超高亮度發光二極體做為組培苗栽培人工光源之燈具製作與應用。中國園藝 47(3) : 301-312。
8. 饒瑞佶、方煒、蔡田龍。2002。超高亮度紅、藍光 LED 應用於蝴蝶蘭組培苗栽培之研究。農業機械學刊。(已接受)
9. Barta, D.J., T. W. Tibbitts, R.J. Bula and R.C. Morrow. 1992. Evaluation of light emitting diode characteristics for a space-based plant irradiation source. *Advances in Space Research* 12 : 141-149.
10. Biolight Corp.. 2003. 傷口光療器、酸痛光療器、光鼻器、美光器型錄。Israel.
11. Brown, C. S., A. C. Schuerger and J. C. Sager. 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120 : 808-813.
12. Bula R. J., R. C. Morrow, T. W. Tibbitts and D. J. Barta. 1991. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *Hortscience* 26(2) : 203-205.
13. Bula R. J., D. J. Tennessen, R. C. Morrow and T. W. Tibbitts. 1994. Light emitting diode as a plant lighting source. In "International lighting controlled environments workshop", ed. T. W. Tibbitts, 255-267. Florida, USA.
14. Chang, F.H. and J.H. Troughton. 1972. Chlorophyll a/b ratios in C3-C4 plants. *Photosynthetica*, 6:57-65.
15. Dale, M.P. and D.R. Causton. 1992. Use of chlorophyll a/b ratios as a bioassay for the light environment of a plant. *Functional Ecol.* 6:190-106.
16. Eiichi O., J.L. Cuello and K.A. Jordan. 1997. Evaluation of high intensity light-emitting diodes as light source for plant growth. ASAE Paper No. 97-4028. ASAE, St. Joseph, MI.

17. Ella, S. 2003. System and method for facial treatment. Patent no.: US20030032900A1. Thomson Delphion Patent Database.
18. Fang, W. and R.C. Jao. 2000. A Review on Artificial Lighting of Tissue Cultures and Transplants. International symposium on Transplant production in closed system for solving the global issues on environmental conservation, food, resources and energy. Chiba, Japan.
19. Fang, W., R.C. Jao and DH. Lee. 2002 Artificial lighting apparatus for young plants using light emitting diodes as light source. US patent no.: US 6474838 B2.
20. Fang, W., R.C. Jao and DH. Lee. 2003 Artificial lighting apparatus for young plants using light emitting diodes as light source. US patent no.: US 6554450 B2.
21. Frenkel, R. E. and B. G. Frenkel. 1999. Quantifying stress reduction and medical treatment as a result of colored light therapies. Patent no.: 6007569. United States Patent and Trademark Office Database.
22. Goins G.D., N.C. Yorio, M.M. Sanwo and C.S. Brown. 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. J. Exp. Botany v48 : 1407-1413.
23. Hans, C.P.M., H. Balke, U.M. Van Hes, B.M.A. Kroon, L.R. Mur and R.A. Binot. 1996. Application of light-emitting diodes in bioreactors: flashing light effects and energy economy in Algal culture (*Chlorella pyrenoidosa*) . Biotech. and Bioeng. 50:98-107.
24. Hart, B. M. and H. Malak. 2003. Joint / tissue inflammation therapy and monitoring device(s) JITMon device. Patent no.: US20030167080A1. Thomson Delphion Patent Database.
25. Hoenecke M.E., R.J. Bula and T.W. Tibbits. 1992. Importance of “Blue” photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. Hortscience 27(5) : 427-430.
26. Iwanami, Y., T. Kozai, Y. Kitaya and S. Kino. 1992. Effects of supplemental red and far-red lighting using light emitting diodes on stem elongation and growth of potato plantlets *in vitro*. Abstr. Intl. Symp. Transplant Production Systems. P183.
27. Jao, R.C. and W. Fang. 2001a. Development of a flexible lighting system for plant related research using super-bright red and blue light-emitting diodes. Acta Horticulturae. 578:133-140.
28. Jao, R.C. and W. Fang. 2001b. Adjusting frequency and duty cycle to promote growth of potato plantlets *in vitro* using super-bright red and blue LEDs. Proceedings of "International Symposium on Design and Environmental Control of Tropical And Subtropical Greenhouses". April 15-18, Taichung, Taiwan.

29. Jao, R.C. and W. Fang. 2003a. An adjustable light source for photo-phyto related research and young plant production. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol.19(5):601-608.
30. Jao, R.C. and W. Fang. 2003b. Effects of frequency and duty ratio on the growth of potato plantlets *in vitro* using LEDs. *HortScience*. (Accepted)
31. Jao, R.C. and W. Fang. 2003c. Growth of potato plantlets *in vitro* is different when provided concurrent versus alternating red and blue light photoperiods. *HortScience* (Accepted).
32. Johnson C.F., C.S. Brown, R.M. Wheeler, J.C. Sager, D.K. Chapman and G. .F. Deitzer. 1996. Infrared light-emitting diode radiation causes gravitropic and morphological effects in dark-grown oat seedlings. *Photochemistry and Photobiology* 63(2) : 238-242.
33. Kollias, N.R.G. and W.D. Tian, 2003. Phototherapy method for treatment of acne. Patent no.: 6663658. United States Patent and Trademark Office Database.
34. Ladislav N., V. Tichy, F. Xiong and J.U. Grobbelaar. 1996. Microscopic green algae and cyanobacteria in high-frequency intermittent light. *J. App. Phy.* 8 : 325-333.
35. Lee, C.G.. and B. Palsson. 1994. High-density algal photobioreactors using light-emitting diodes. *Biotech. And Bioeng.* V44 : 1161-1167.
36. Liberman, J. 1991. *Light: Medicine of the Future. How we can use it to heal ourselves now.* ISBN 957-529-729-6.
37. Lopez-Claros, M.E. 1996. Light therapy method and apparatus. Patent no.: 5562719. United States Patent and Trademark Office Database.
38. McDaniel, D. H. 2003. Low intensity light therapy for the manipulation of fibroblast, and fibroblast-derived mammalian cells and collagen. Patent no.: US20030004556A1. Thomson Delphion Patent Database.
39. Mendes, E. and A. Harel. 1996. Method of treating herpes. Patent no.: 5500009. United States Patent and Trademark Office Database.
40. Mendes; E. and Y. Lison. 1993. Light therapy system. Patent no.: 5259380. United States Patent and Trademark Office Database.
41. Mendes, E. and I. Neuman. 1997. Treatment of rhinitis by biostimulative illumination. Patent no.: 5683436. United States Patent and Trademark Office Database.
42. Miyashita Y., Y. Kitaya and T. Kozai. 1995. Effects of red and far-red light on the growth and morphology plantlets *in vitro*: using light emitting diode as a light source for micropropagation. *Acta Horticulturae* 393 : 189-194.
43. Nhut, D.T., N., T. Takamura, H. Watanabe and M. Tanaka. 2000. Light emitting diodes (LEDs) as a radiation source for micropropagation of strawberry. In

- “Transplant Production in the 21st Century”, ed. Kubota and Chun, 114-118. Japan.
44. Nhut, D.T., T. Takamura, H. Watanabe and M. Tanaka. 2001. Artificial lighting source using light-emitting diodes (LEDs) in the efficient micropropagation of *Spathiphyllum* plantlets.
 45. Okamoto K., T. Yanagi and S. Takita. 1996. Development of plant growth apparatus using blue and red LED as artificial light source. *Acta Horticulturae* 440:111-116.
 46. Okamoto K., T. Yanagi and S. Kondo. 1997. Growth and morphogenesis of lettuce seedlings raised under different combinations of red and blue light. *Acta Horticulturae* 435 : 149-157.
 47. Ono, E., J.L. Cuello and K.A. Jordan. 1997. Evaluation of high intensity light-emitting diodes as light source for plant growth. ASAE paper 97-4028.
 48. Papageorgiou, P., A. Katsambas and A. Chu. 2000. Phototherapy with blue and red light in the treatment of acne vulgaris. *British Journal of Dermatology* 142 : 973-978.
 49. Perricone, N.V. 2003. Skin treatments using blue and violet light. Patent no.: US20030009158A1. Thomson Delphion Patent Database.
 50. Schuerger, A.C. and C.S. Brown. 1994. Spectral quality may be used to alter plant disease development in CELSS. *Advances in Space Research*. 14 : 395-398.
 51. Schuerger A.C. and C.S. Brown. 1997. Spectral quality affects disease development of three pathogens on hydroponically grown plants. *Hortscience* 32(1) : 96-100.
 52. Schuerger A.C., C.S. Brown and E.C. Stryjewski. 1997. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Ann. J. Botany* 79 : 273-282.
 53. Souil E., A. Capon, S. Mordon, A.T. Dinh-xuan, B.S. Polla and M. Bachelet. 2001. Treatment with 815 nm diode laser induces long-lasting expression of 72-kDa heat shock protein in normal rat skin. *British Journal of Dermatology* 144 : 260-266.
 54. Streeter, J. 2003a. Low level light therapy for the treatment of myocardial infarction. Patent no.: US20030212442A1. Thomson Delphion Patent Database.
 55. Streeter, J. 2003b. Low level light therapy for the treatment of stroke. Patent no.: US20030109906A1. Thomson Delphion Patent Database.
 56. Takita S., K. Okamoto and T. Yanagi. 1996. Computer simulation of PPF distribution under blue and red LED light source for plant growth. *Acta Horticulturae* 440 : 286-291
 57. Tanaka M., T. Takamura, H. Watanabe, M. Endo and T. Yanagi. 1998. *In vitro*

- growth of *Cymbidium* plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *J. hortic. Sci. biotech.* 73(1) : 39-44.
58. Tennessen D. J., R.J. Bula and T.D. Sharkey. 1995. Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation. *Photosynthesis Res.* 44 : 261-269.
 59. Tennessen D.J, E.L. Singaas and T.D. Sharkey. 1994. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. *Photosynthesis Res.* 39 : 85-92.
 60. Tripathy, B.C. and C.S. Brown. 1995. Root-shoot interaction in the greening of wheat seedlings grown under red light. *Plant Physiology.* 107 : 407-411.
 61. Whelan H.T., E.V. Buchmann, N.T. Whelan, S.G Turner, V. Cevenini, H. Stinson, R. Ignatius, T. Martin, J. Cwiklinski, G.A. Meyer, B. Hodgson, L. Gould, M. Kane, G. Chen and J. Caviness. 2001. NSAN light emitting diode medical applications from deep space to deep sea. In "Space Technology and Applications International Forum", ed. M. S. El-Genk, 35-45. NASA, USA.
 62. Williams K. 2000. "Photo-Manipulation-Boxes"; An Instrument for the Study of Plant Photobiology. *Bioscene.* 26(1) : 3-15.
 63. Yanagi, T. and K. Okamoto. 1994. Super-bright light emitting diodes as an artificial light source for plant growth. Abstract of 3rd International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture, 19.
 64. Yanagi T., K. Okamoto and S. Takita. 1996. Effects of blue and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. *Acta Horticulturae* 440 : 117-122.
 65. Vreman; H.J., D.S. Seidman, D.K. Stevenson. 2003. Phototherapy of jaundiced newborns using garments containing semiconductor light-emitting devices. Patent no.: 6596016. United States Patent and Trademark Office Database.
 66. Vreman, H.J. and D.K. Stevenson. 2002 Devices for treating circadian rhythm disorders using LED's. Patent no.: 6350275. United States Patent and Trademark Office Database.

表 1 高亮度紅、藍光 LED 量測結果

Table 1 Super bright red and blue LED measured.

製造商 Manufacturers	型號 Model	光量 (量測數目) mcd (no. of measured)	光量 (摘自型錄) mcd from Data sheet	光譜峰值 Peak wavelength
Everlight, Taiwan	383URC-3	2372 (5)	2000-3000	660 nm
Excellence, Taiwan	5ERBCCW-DG	8579 (30)	6617	622 nm
Hewlett Packard	HLMP-EG08-VY000	3757 (30)	3600-13800	626 nm
Nichia, Japan	NSPB500S	3533 (4)	3700	470 nm
Everlight, Taiwan	333-UBC	219 (14)	630-1000	430 nm
Excellence, Taiwan	5GBCCCT-EG	1631 (30)	2500	467 nm
Hewlett Packard, USA	HLMP-CB16	1900 (30)	1575	472 nm

表 2 量測 LED 之單位轉換常數

Table 2 Conversion factors of super bright LED measured.

製造商 Manufacturer (Color)	光量 mcd ^{*1}	光量 mW ^{*2}	光量 Quantum ^{*3} , μmole/m ² /s	光量 Photometric ^{*4} Lux	光量子/照度 μmole/m ² /s per lux	能量/光量子 mW per μmole/m ² /s
Hewlett Packard (Red)	3230	37	11.03	374.4	0.029	3.35
Excellence, Taiwan (Red)	5878	45.8	11.08	479.6	0.023	4.13
Everlight, Taiwan (Red)	2207	37	10.27	135.1	0.076	3.60
Hewlett Packard (Blue)	1899	64.2	10.41	195.3	0.053	6.2
Excellence, Taiwan (Blue)	1670	70.4	4.83	99.6	0.048	14.57
Everlight, Taiwan (Blue)	205.6	80	1.09	14.9	0.073	73.39
Nichia, Japan (Blue)	3460	68	6.27	188.3	0.033	10.84

*1. 使用光量計 J17 配合 J1805 (TekLumaColor, Inc., USA) 量測頭進行量測

*2. 在順向電流 20mA 下進行量測

*3. 使用 LICOR 190SB (LI-COR Corp., USA) 光量計在高度 10cm 處進行量測

*4. 使用光量計 J17 配合 J1811 (TekLumaColor, Inc., USA) 量測頭在高度 10cm 處進行量測

表 3 本文提及農業領域內相關研究所用之 LED 規格

Table 3 Characteristics of LED listed in the Agriculture related literature reviewed.

製造商 Company (Model)	光譜峰值 Peak wavelength	耗電量 Power consumed (standard current)	光量 quantum yield (Luminous Intensity)	出處 Source
N/A	660 nm	N/A	N/A	Bula et al., 1991
Stanley Electric Co. Ltd. (H1000)	660 nm	40 mW	N/A	Miyashita et al., 1995
Stanley Electric Co. Ltd.	730 nm	N/A	N/A	Miyashita et al., 1995
Nichia (NLPB520)	450 nm	72 mW (20mA)	N/A	Okamodo et al., 1996
Toshiba (TLRA120)	660 nm	36 mW (20mA)	N/A	Okamodo et al., 1996
Shinko Denshi	730 nm	N/A	N/A	Okamodo et al., 1996
Panasonic (LNG992CF9)	N/A Blue	68 mW (20mA)	145 μ mole/m ² /s (1400 mcd)	Ono et al., 1997
Panasonic (LNG901CF9)	N/A Blue	N/A	(500 mcd)	Ono et al., 1997
Toshiba (TLSH180P)	623 nm	42 mW	180 μ mole/m ² /s (7000 mcd)	Ono et al., 1997
Panasonic (LN261CAL,UR)	665 nm	N/A	(2000 mcd)	Ono et al., 1997
Rohm (SLA570JT3)	660 nm	N/A	(1000 mcd)	Ono et al., 1997
Rohm (SLA570MT3)	660 nm	N/A	(1000 mcd)	Ono et al., 1997
Quantum Devices, Inc. (3009A001)	660 nm	N/A	N/A	Schuerger et al., 1997
Quantum Devices, Inc. (3009A002)	735 nm	N/A	N/A	Schuerger et al., 1997

Review of Applying LEDs in Bio-Industry

Wei Fang⁽¹⁾ Ruey-Chi Jao⁽²⁾

- (1). Professor, Dept. of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University.
- (2). Assistant Professor, Dept. of Information Management, Chien Kuo Institute of Technology.

ABSTRACT

Tubular fluorescent lamp (TFL) and high-pressure sodium lamp(HPS)are the principal artificial light source used in agriculture applications. Efficient means to apply light, uniformity, quantity and quality of light and various efficient light sources were under investigation worldwide. Recent development of photoelectronics has enabled the commercialization of super bright light-emitting diodes (LEDs), thus, making the possibility of applying LEDs in plant production become possible. LEDs have many advantages over conventional light source including high energy-conversion efficiency, using DC power, small volume, long life, wavelength specific, light intensity/quality adjustable and low thermal energy output, thus, making it a promising light source for plant growth in confined environment such as plant tissue culture room and growth chamber, etc. NASA is the first organization using LEDs in the mission to Mars. At present, their research has expanded the applications of LEDs to replace LASER in photodynamic therapy for cancer treatments. In the field of Dermatology, LED is the low intensity light source as another alternative in photo rejuvenation following LASER and pulse light. Besides skin treatment, LED can be used in other light therapies for the treatments of joint/tissue inflammation, jaundiced newborns, circadian rhythm disorders, myocardial infarction, stroke, stress reduction, rhinitis, herpes and seasonal affective disorder, etc. The objective of this study was to review the means in applying LEDs in bio-industry.

Keywords : Artificial lighting, Light emitting diodes, Bio-Industry, Tissue culture, Light Therapy, Photo rejuvenation