

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽光奈米混光技術研發

Solar light-mixing technology using nano-grating

計畫編號：1042001INER015

受委託機關(構)：國立中央大學機械工程學系

計畫主持人：韋安琪

聯絡電話：03-4267378

E-mail address：acwei@ncu.edu.tw

核研所聯絡人員：李家銘

報告日期：104 年 12 月 15 日

壹、計畫緣起與目的.....	1
貳、研究方法與過程.....	1
一、系統架構.....	1
二、關鍵元件.....	2
(一)光譜儀.....	2
(二) 介面控制元件.....	3
(三)複合拋物面集光器.....	6
(四)光箱.....	10
(五)發光二極體(LED).....	14
(六)太陽光模擬器.....	14
三、實驗架構.....	14
參、主要發現與結論.....	17
一、混光後之光源均勻度與效率.....	17
二、光色補償.....	20
三、結論.....	21
肆、參考文獻.....	23

太陽光奈米混光技術研發

Solar light-mixing technology using nano-grating

(計畫編號：1042001INER015)

韋安琪 李朱育 羅士傑 洪珮芳 林俊廷

中央大學光機電工程研究所

中文摘要

本計畫提出一種太陽光混光技術，利用發光二極體光源 (LED) 作為輔助光，並與太陽光源進行混光，以穩定光照度與演色性。該技術可應用於室內之太陽光照明系統。當引入太陽光作為室內照明的光源時，環境因素如氣象、大氣微粒等易影響光源入射的穩定度，而使得光照度及光色變化，造成室內環境使用上的困擾。鑑於此，本計畫開發 LED 混光技術，藉由混合太陽光與適當比例之 LED 光，達成穩定之太陽光照明光源。此太陽光混光技術，不僅可應用於室內照明，亦適用於植物工廠、醫療照明...等特殊照明。

英文摘要

In this project, we have designed a light-mixing system using LEDs as an auxiliary light source to compensate the unstable sunlight. Such a system is applicable to the indoor solar lighting system. Once sunlight is the main source of indoor lighting, the environmental factors, such as cloud, particles may affect the luminous stability, leading to unstable illuminance and color. Thus, we developed a LED light-mixing technology, which mixes sunlight with proper portion of LED light, to provide stable solar lighting. Such a light-mixing system has various applications, such as indoor lighting, lighting for plant factory, medical lighting, and other special lighting.

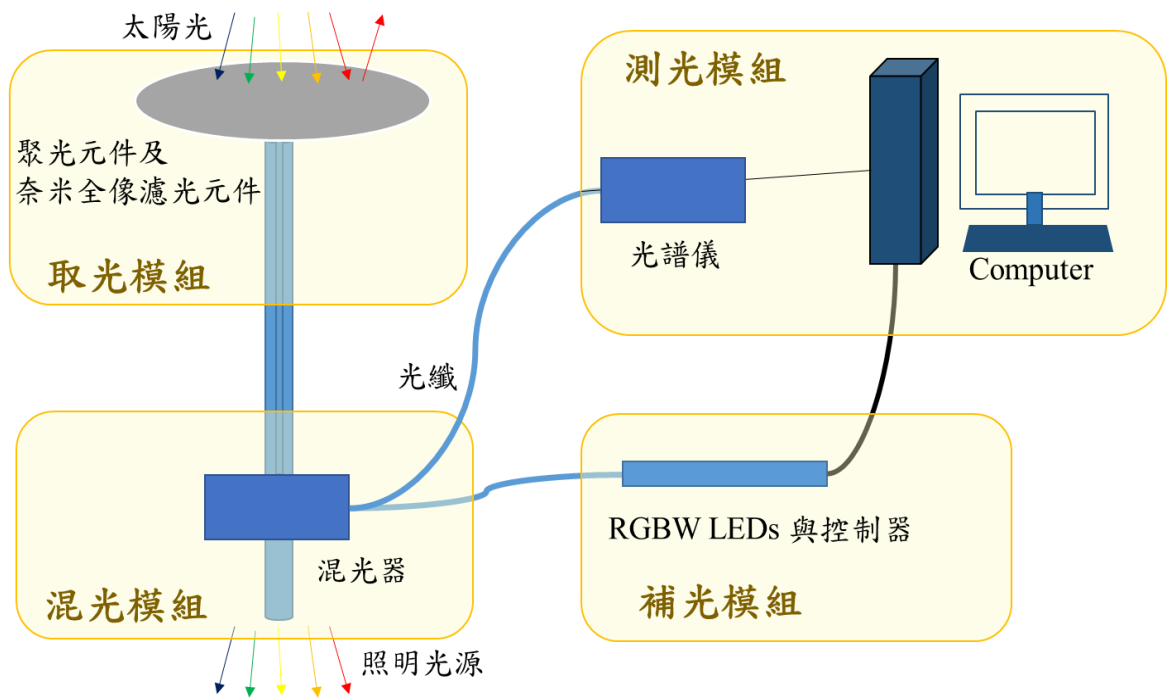
壹、計畫緣起與目的

太陽光是一種免費的綠色能源[1]，近年因節能意識提高，如何將太陽光應用於室內照明亦為熱門研究議題之一。當太陽光引入室內時，雖能提供最自然舒適的照明，且可節能省電，但太陽光易受雲或大氣微粒影響，以致光照度變化。因此，雖文獻上有收集太陽光應用於室內照明之案例[2-7]，卻少有文獻討論在太陽光照度不足時的處理辦法，也少有討論太陽光照度變動時的動態補光方式。是以，為提供良好的太陽光照明品質，本計畫研發太陽光混光系統，使用紅、綠、藍、白四色發光二極體(RGBW LEDs)作為輔助光，以補償太陽光照度及顏色，並維持照度及顏色穩定。研究上，先運用奈米濾光元件，將太陽光譜中的可見光取出，並量測、分析各波長之能量權重；接著，計算並輸出最佳比例之LED光；再將太陽光與該LED光導入研製的混光模組，以輸出穩定的類太陽光。預期此太陽光混光技術，不僅可應用於室內照明，亦適用於植物工廠、醫療照明...等特殊照明。

貳、研究方法與過程

一、系統架構

本計畫之太陽光混光系統包含以下幾個模組:取光模組、測光模組、補光模組以及混光模組，如圖一所示。太陽光照射於取光模組時，將被聚光元件會聚引入系統，其透過奈米濾光元件後，可見光波段將被取出。此可見光接著進入測光模組與混光模組，該測光模組用以監測並分析各色光權重，並將分析結果輸出予補光模組。補光模組計算並輸出適當比例的 RGBW LED 補償光予混光模組。混光模組混合來自取光模組的可見光及來自補光模組的 LED 補償光，以輸出光色與照度穩定之照明光源。



圖一、系統架構圖

本計畫於取光模組研發全像濾光元件，藉由堆疊全像片法，已於紅外波段(900~1800nm)達到約 70% 的繞射效率，可將太陽光譜中的紅外線大幅繞離，留下可見光供後續使用[8]。本計畫之測光、補光、混光模組則結合光譜儀、介面控制元件與自行開發的光學元件與光箱，達成混光目標。下一節將說明系統中重要元件的原理與研究方法。

二、關鍵元件

(一)光譜儀

本系統之測光模組使用之光譜儀為 StellarNet Inc. 的 EPP2000，如圖二所示。該儀器使用 40mm 直徑的凹面光柵，以解析光譜；可量測之波長範圍為 300nm~1500nm，已包含可見光之範圍，且輸入端為光纖，可與本系統之取光模組搭配，因此選用之。



圖二、光譜儀 EPP2000

(二) 介面控制元件

(1) Arduino 介面控制

Arduino 包含了硬體與軟體兩大部分，硬體部分是一個手掌大小的電路控制板，如圖三所示。其核心使用八位元 ATMEGA8 系列的微控制器，可支援 USB 資料傳輸，如同一個開放原始碼的單晶片微電腦，不僅建構在簡易輸入/輸出介面板(simple I/O)，且軟體語法與 C 語言相似，因此控制自由度高並易於編寫程式。

在本系統中，Arduino 負責補光模組之控制。我們將利用 Arduino 來驅動 RGBW LED 補償光源，依據計算得出的 LED 光量比例，分別給與各 LED 不同的電壓值，以滿足混光所需的補償光源功率。



圖三、Arduino 外觀

(2) LabVIEW 人機介面

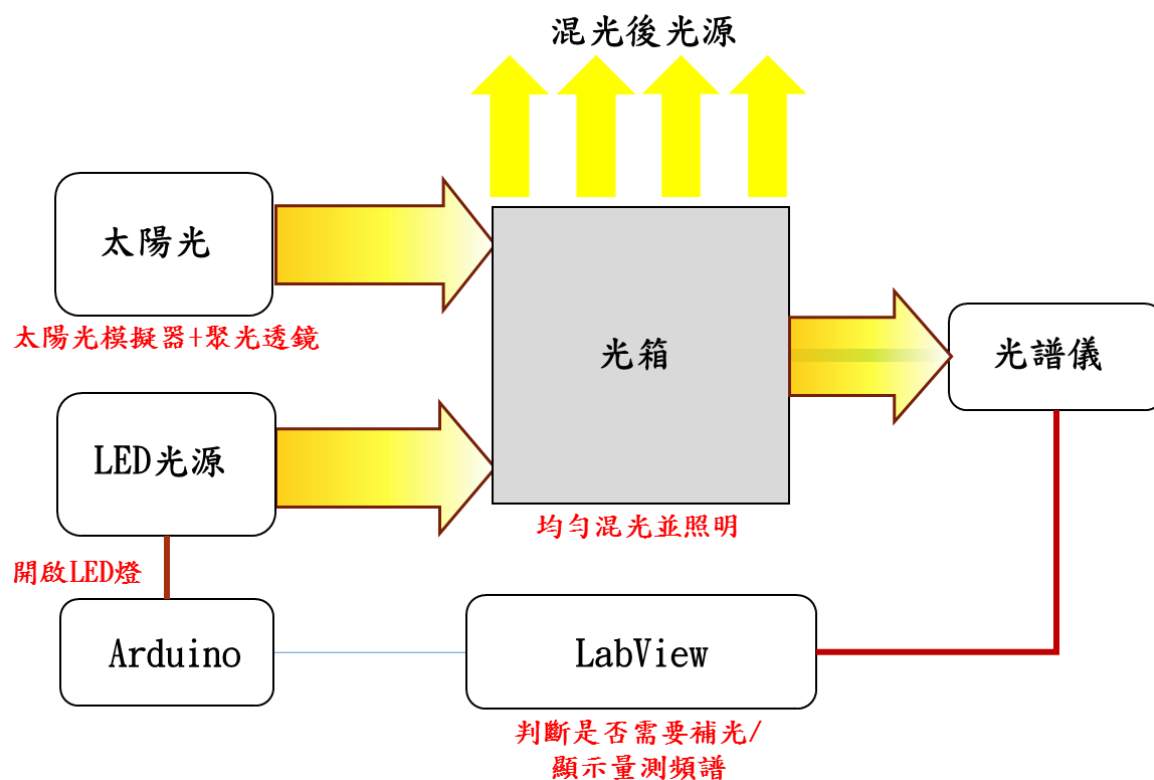
除 Arduino 外，本計畫亦使用 LabVIEW 作為介面控制。此因使用 LabVIEW 時，大部分的原始碼已完成，其功能可一目瞭然，且其具備資料擷取(DAQ)的功能，適合作為系統中各模組間的溝通平台。

在此，我們利用 LabVIEW 作為光譜儀與 Arduino 溝通的橋樑。光譜儀用以獲取入射光的頻譜分布，而 Arduino 可驅動並調制 RGBW LED 補償光源；不過兩者是各自獨立作業的。因此，我們利用 LabVIEW 讀取光譜儀測得的光譜分布，進行該光譜之分析，並計算出各 LED 所需負擔的補償量以及所需的電壓電流，再將結果輸出至 Arduino，使 Arduino 正確驅動 RGBW LED 補償光源。



圖四、LabVIEW 作為光譜儀與 Arduino 溝通之橋樑

整體補光與混光流程，簡述如後。測光模組之光譜儀測出即時光譜後，將資料傳遞至 LabVIEW 中預設之程式進行計算、分析，分析結果若需補光，則 LabVIEW 也將計算 RGBW LEDs 個別所需的補償量及其電性條件，並將該資訊傳遞於補光模組之 Arduino 介面。接著，Arduino 依據各 LED 電壓電流目標值驅動 RGBW LEDs。該些 LED 光源將由混光模組之 CPC、光纖等光耦合元件導入光箱，另一方面，取光模組輸出之太陽光源也經由光纖導入光箱，由光箱將二種光源混合並輸出為照明光。值得一提的是，使用真實太陽光作為實驗光源，將受限於天候因素而不利檢測各模組效能；因此，實驗上，採用太陽光模擬器所產生之類太陽光作為實驗光源，待校正各模組特性，並組立完成且驗證系統效能後，才進行戶外測試。



圖五、系統流程圖

(三)複合拋物面集光器(Compound Parabolic Concentrator, CPC)

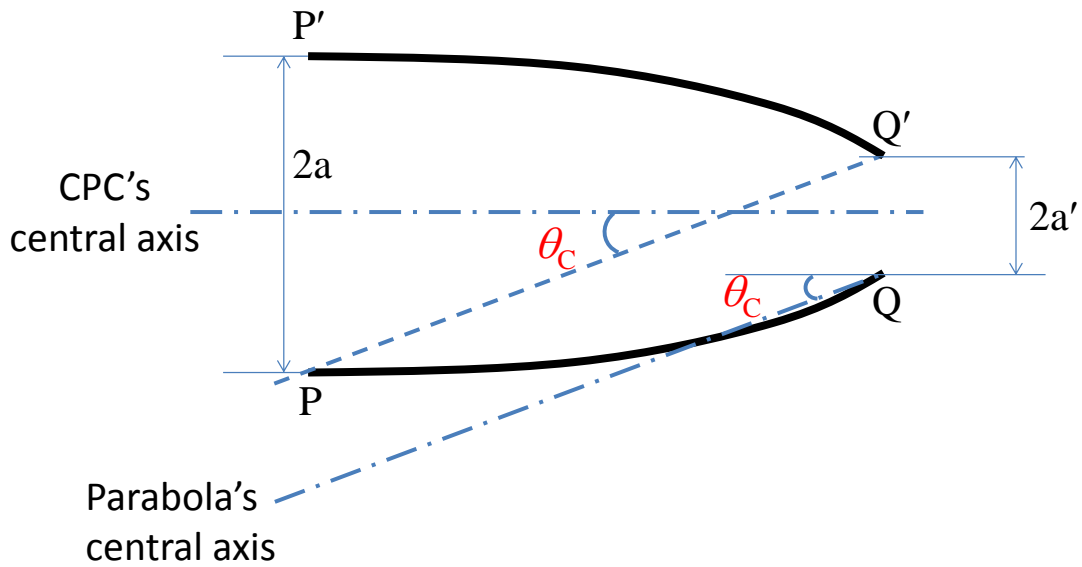
(1) CPC 原理與應用

本計畫使用複合拋物面集光器(CPC)作為補光模組中的收光元件。由於 RGBW LED 為四顆不同位置且發散的光源，一般光纖的接收角(acceptance angle)有限，因此無法將所有 LED 光都收入。為此，我們利用 CPC 作為耦合元件，因 CPC 藉由其拋物面特性，可將特定角度範圍內的入射光線，完全反射傳導至輸出端，故為高效率之收光與耦合元件。在本系統之補光模組中，利用 CPC 可將四顆 LED 光線有效地收集，而達到低損耗的收光效能。並且，CPC 之設計可依據出射端的光線發散角需求，調變其拋物面的曲面參數，使光線出射特性符合本計畫使用之光纖規格，達到高效率之光耦合。是以，我們選擇 CPC 之作為補光模組的收光兼耦合元件

根據邊緣光線原理，CPC 集光器係由兩片拋物面反射鏡所組成，如圖六所示。以橫切面來看，兩拋物面(如圖上兩拋物線)為對稱，且拋物面的中心軸與 CPC 中心軸夾角 θ_c 。假設 P'、P 為入射端點，Q'、Q 為出射端點，且 Q'、Q 分別為對方拋物面上之焦點，則 $\overline{P'Q'}$ 與 \overline{PQ} 將分別平行於兩拋物線之中心軸。CPC 入射孔徑與出射孔徑之直徑分別為 $2a$ 、 $2a'$ ，根據幾何原理，可推得其與拋物面焦距 f 之關係如下：

$$2a' = \frac{2f}{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta_c\right)} = \frac{2f}{1 + \sin \theta_c} \quad (1)$$

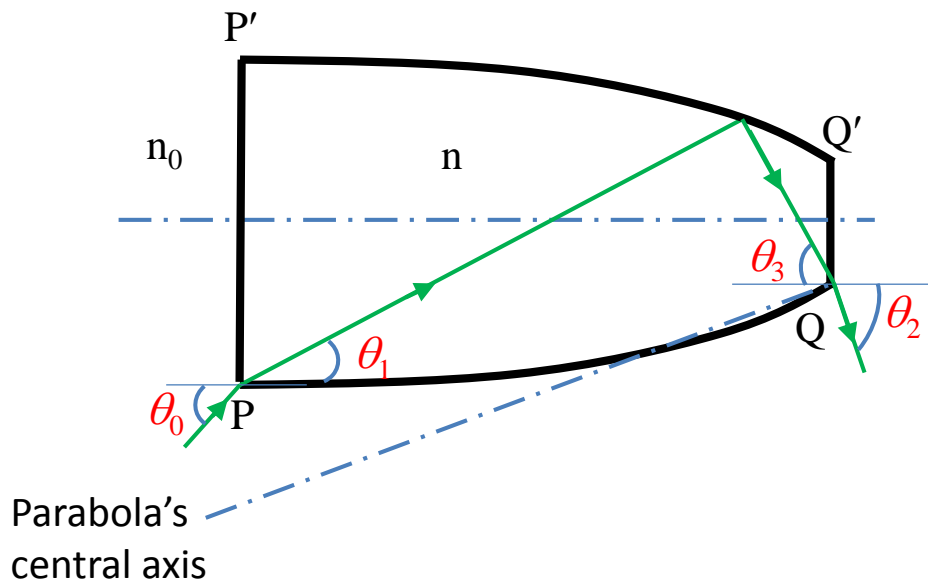
$$2a = \frac{2f}{\sin \theta_c (1 + \sin \theta_c)} \quad (2)$$



圖六、CPC 橫切面示意圖

假定入射光入射 CPC 時的角度為 θ_0 ，光線折射進入 CPC 之折射角為 θ_1 ，由 CPC 出射前，光線射至 Q'Q 端面的入射角為 θ_3 ，出射 CPC 的角度為 θ_2 ，如圖七所示。當 CPC 為實心元件時，可藉由已知的 CPC 材料與空氣之折射率，利用 Snell's law 推算出 θ_0 與 θ_1 及 θ_3 與 θ_2 的關係。再藉由光追跡原理(ray-tracing theory)，可依據出射角度需求推算出拋物面的焦距 f 。

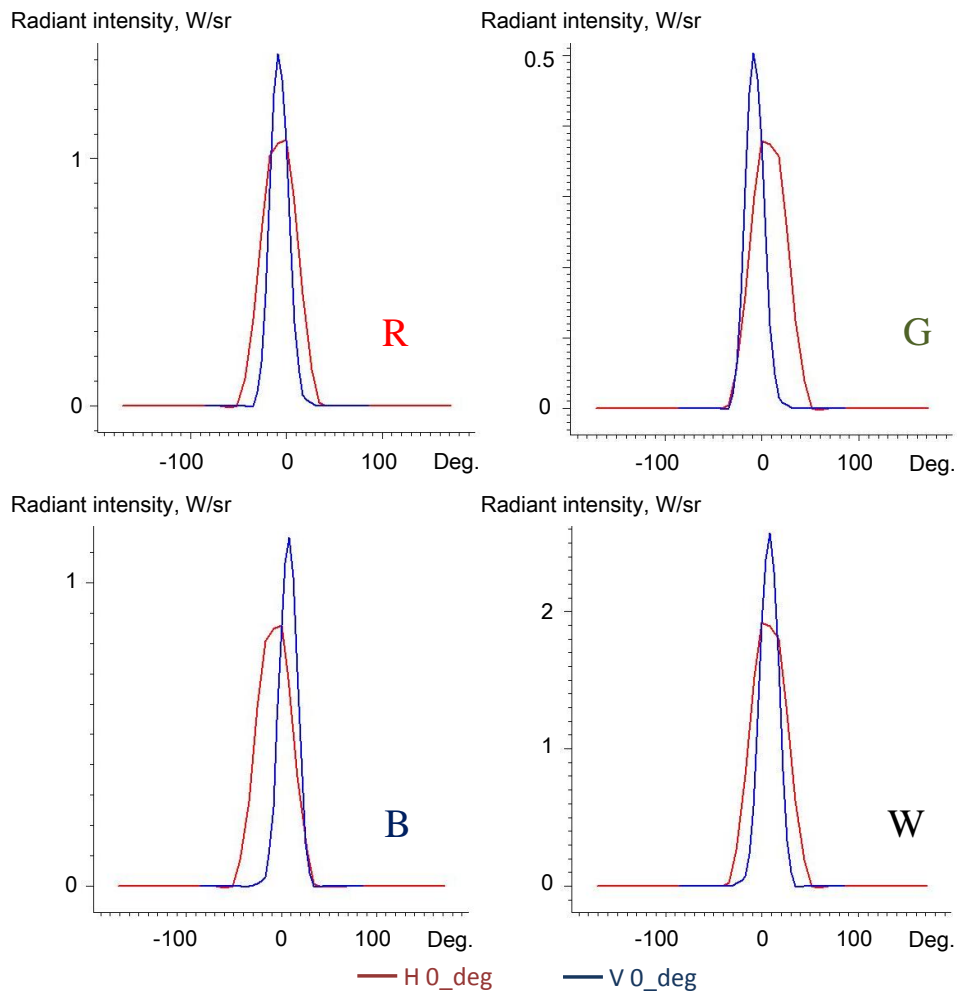
相較於傳統之集光器，CPC 不僅可將特定角度內之入射光完全收集，且具有較大的可接收角。但其缺點為縱向軸長較長、較占空間。CPC 內部除了可以是空氣外，也可為其他的介質，如玻璃或光學塑膠等，使可接收之入射光角度範圍增大。



圖七、CPC 橫切面與光線路徑示意圖

(2) CPC 參數設計

在實際製作樣品之前，我們採用光學模擬軟體 LightTools 設計模擬 CPC。由於本系統利用 CPC 收 RGBW 四顆炮彈型 LED 之發散光源，CPC 最大容忍角度須大於 LED 之出射角度。經由配光曲線儀量測四顆 LED 之光強度分布後，得知其出射角度皆小於 7.5° ，如下圖八所示。並且，CPC 入射端的孔徑要足以涵蓋四顆 LED 發光面之面積，量測結果約為 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 之方形。而出射 CPC 之光線，其角度必須配合光纖之數值孔徑(Numerical aperture, NA)。本系統使用之光纖的 NA 值為 0.55，換算出光纖之最大接收角為 33.36° 。至於 CPC 之出射端孔徑則須對應光纖之芯線(core)截面大小，在本系統中係直徑 3 mm 之圓面。依據上述條件所設計出的 CPC，以及本系統使用之光纖，其參數與規格分別如表一、二所列。



圖八、RGBW LED 之光強度分布

表一、CPC 參數

項目	參數
入射直徑(2a)	12.5mm
出射直徑(2a')	3mm
最大入射角	7.58°
最大出射角	33.36°
總長度	87.36mm
材料	PMMA

表二、光纖參數

項目	參數
孔徑大小(NA)	0.55
最大接收角	33.36°
Core 直徑	3mm
總長度	1mm

(四)光箱

(1) 光箱原理與應用

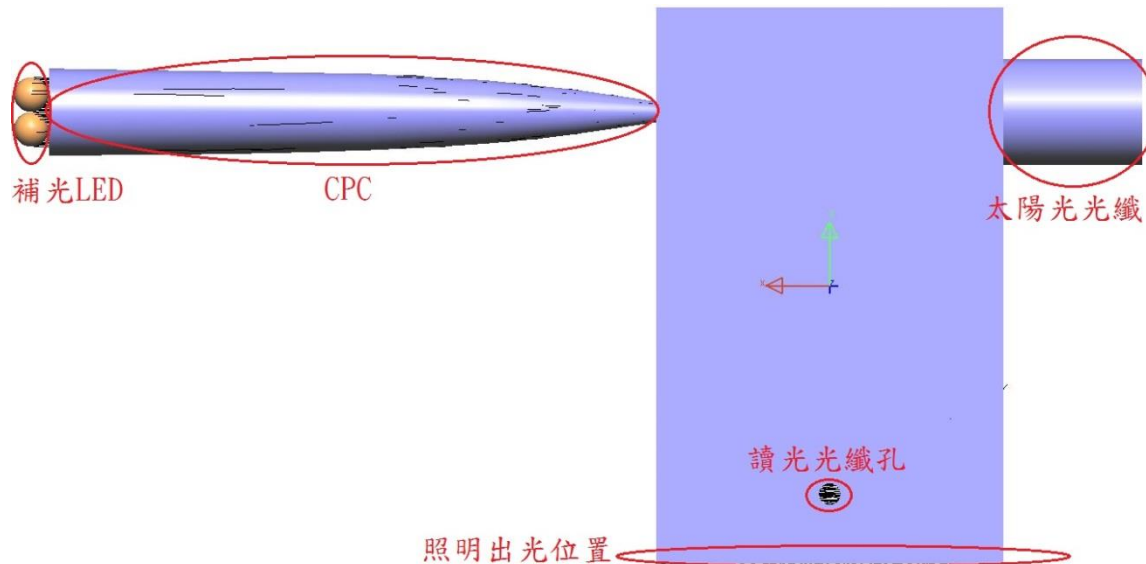
為了達成均勻混光效果，本系統的混光模組採用光箱搭配前述之 CPC 與光纖，使光線於光箱內多次反射後，可於光箱出口實現混光均勻之照明光。

此處所謂的「光箱」為任一形狀之腔體，內部表面則鍍上與積分球內部相同之高反射、高漫射之硫酸鋇材質。在此，所鍍之硫酸鋇的反射率高達 98.2%。硫酸鋇鍍層使光箱內部具有朗博漫射表面特性 (Lambertian surface)，可使所收集之光線在光箱內部均勻混合。光線在光箱內，經數次反射之後，將從光箱底部出射，因此，此架構可直接做照明使用。換言之，光箱混光不僅使太陽光與 RGBW LEDs 均勻混光，且光箱出口即可作照明之用。

本系統之混光模組的架構如圖九所示，其操作原理概述如下：

本設計之 CPC 除了可耦合 RGBW LEDs 以連接光纖外，亦可將 LED 補償光直接導入光箱混光。因此，實驗上，直接以 CPC 將 LED 補償光導入光箱之一入光口；光箱另一入光口，則由另一光纖將取光模組提供之太陽光導入。兩光源於光箱內均勻混光後，於光箱下方直接輸出，作為照明使用。雖此法因利用光線於光箱內表面之多次反射來混光，以致

效率無法太高，但由於不需再接其他系統來達成照明功效，可直接作為照明使用，因此系統成本可較低。



圖九、利用光箱混光照明之混光模組示意圖

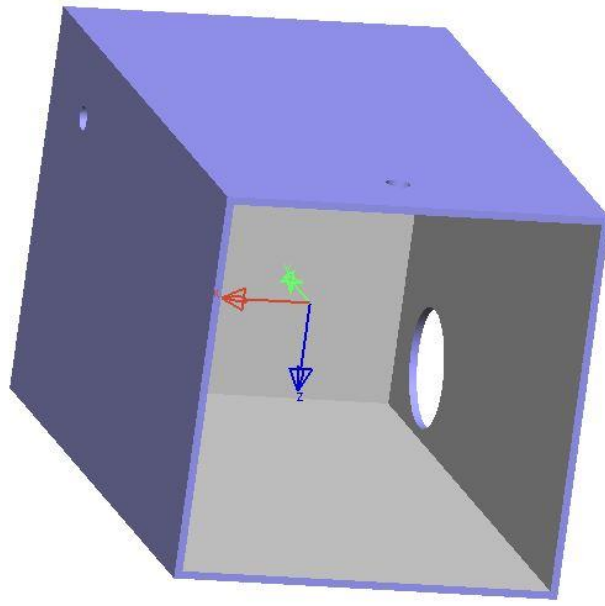
(2) 光箱參數設計

在光箱實際製作之前，我們使用 LightTools 進行設計與優化。首先，考慮光箱內部表面為反射率 98.2% 之朗博漫射表面(Lambertian surface)，並在光箱開口處置入光纖以及 CPC，如圖十所示。其光追跡結果如圖十一所示。藉由光學模擬，光箱之長、寬、高得以優化。模擬結果顯示，當光箱尺寸為 $50 \times 50 \times 80 \text{ mm}^3$ 時，有最佳的均勻度與效率，分別為

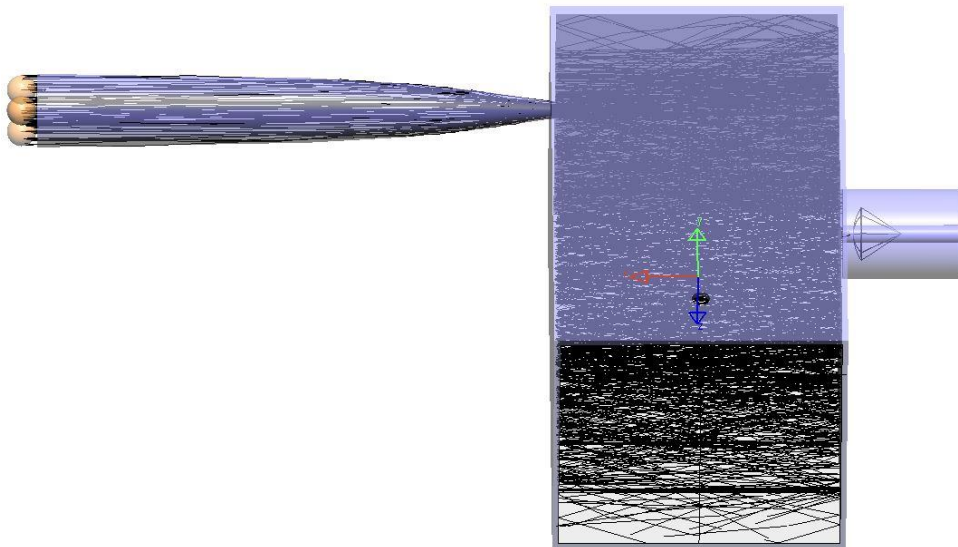
74.5% 與 65.5%；其中，均勻度之定義為 $\frac{2E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$ ，E 為照度，而效率

定義為 $\frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}}$ ，P 為光通量。光箱下方之出射光照度分布，則如圖十二及

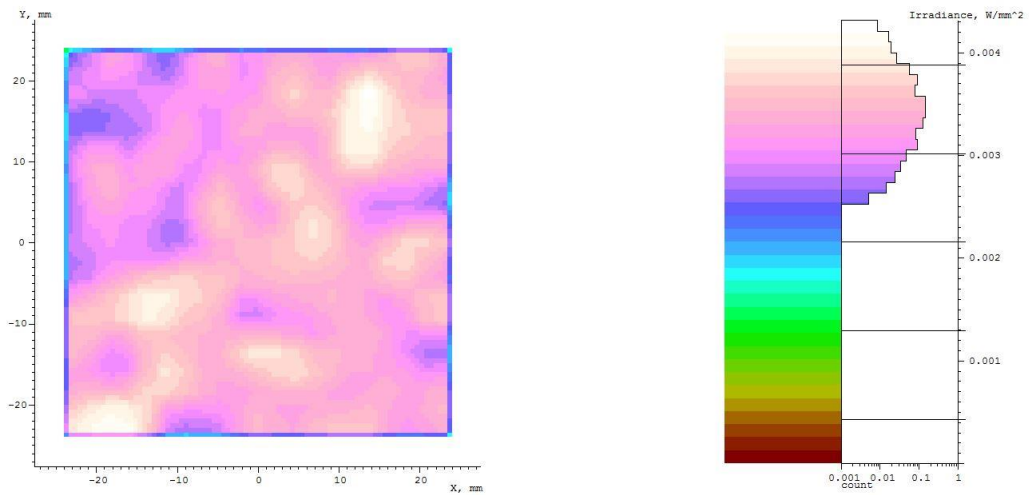
圖十三所示。



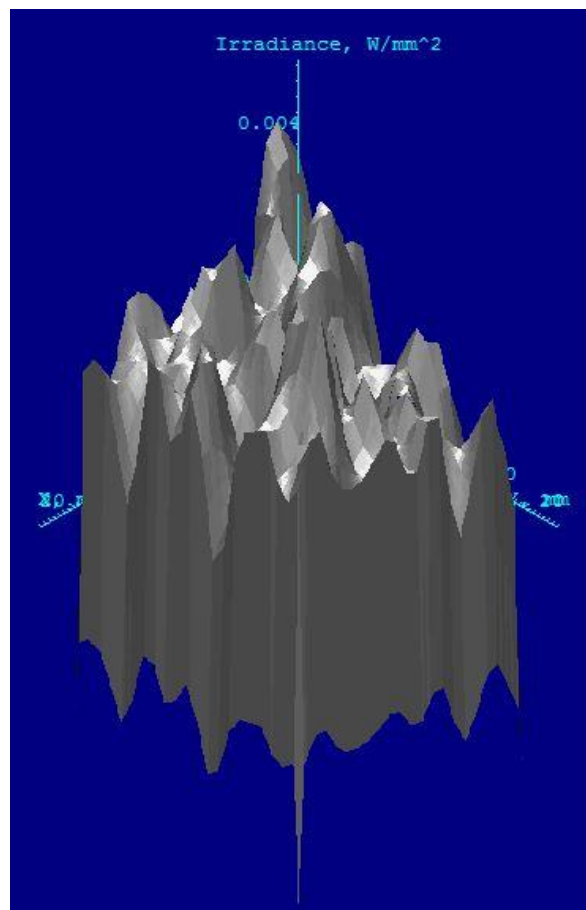
圖十、光箱內表面鍍上硫酸銀之示意圖



圖十一、CPC 導入之 LED 輔助光與光纖導入之太陽光於光箱內均勻混光



圖十二、光箱下方照明之均勻度分布二維圖



圖十三、光箱下方照明之均勻度分布三維圖

(五)發光二極體(LED)

此實驗一共使用四顆 LED，顏色分別是紅、綠、藍、白，皆為直徑 5mm 之砲彈型 LED，最大可承受電壓約 3~5 伏特。由於此種 LED 之發散角較小、體積小、價錢便宜，故適用於此實驗。

(六)太陽光模擬器

本實驗使用之太陽光模擬器以氙氣燈為光源，產生之光譜為 AM1.5G 的 A 級白色光，其有效照射面積是 50.8mm x 50.8mm，設定之輻照度為 100mW/cm²。

三、實驗架構

實驗上，結合上述設計之 CPC、Arduino、LabVIEW、光箱等元件，組立為太陽光與 LED 混光系統，其系統架構如圖十四所示。此系統共分為四大模組，各模組包含的元件及運作方式簡述如下：

(1)取光模組

包含奈米濾光元件、聚光元件。太陽光經奈米濾光元件後，濾除不必要之紅外波段，其餘光線則經由聚光元件聚焦至光纖，以光纖導光至其他模組，作為主光源。

(2)測光模組

包含光譜儀、LabVIEW 人機介面。光譜儀負責測量取光模組取出之光源光譜，並也監測混光模組混光後之光譜，其資料傳遞予 LabVIEW 人機介面進行分析、計算，並由 LabVIEW 輸出各 LED 所需之電壓電流值，以提供主光源適當補償光。

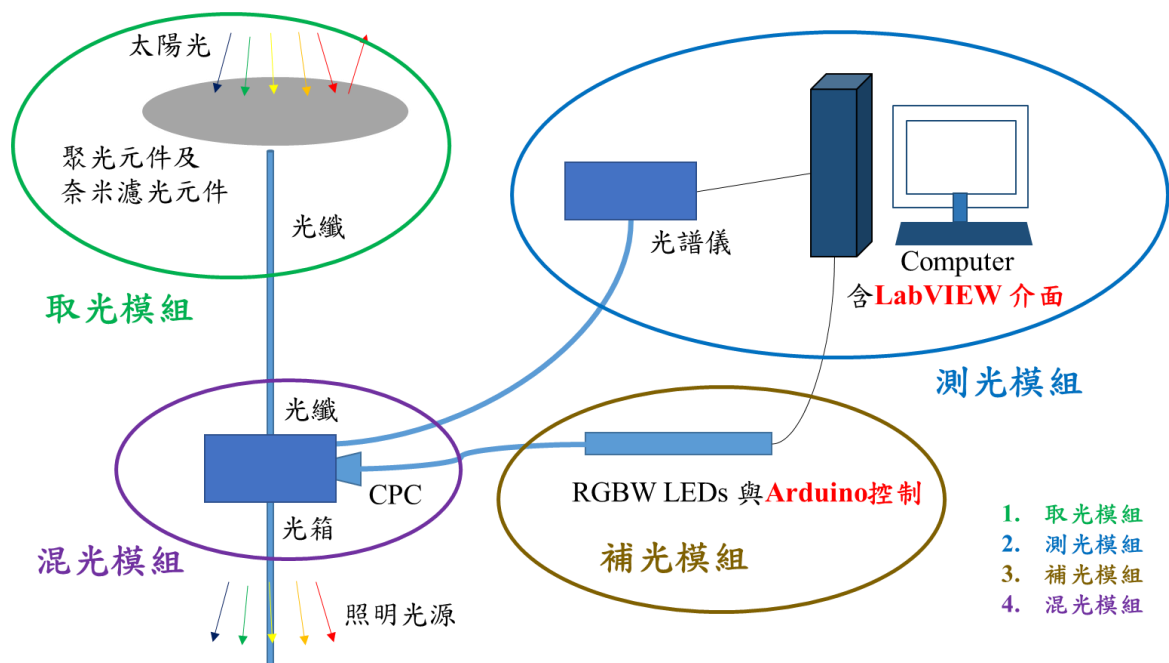
(3)補光模組

包含 Arduino 介面控制及 RGBW LEDs。來自 LabVIEW 的 LED 驅

動資訊，傳遞予 Arduino，由 Arduino 依該電流電壓資訊驅動各 LEDs，使 RGBW LEDs 所發出之補償光符合需求。

(4)混光模組

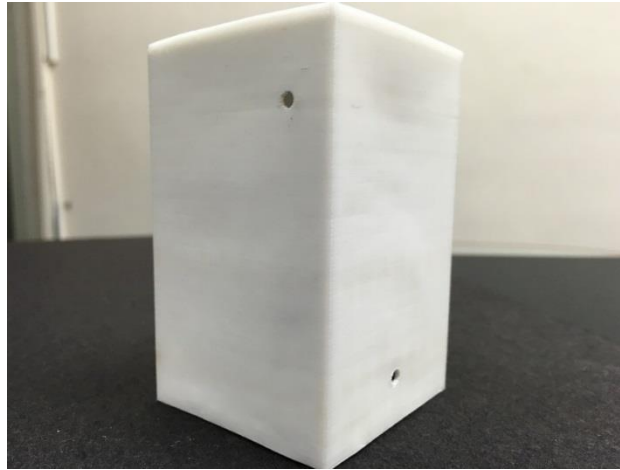
包含 CPC、光纖、光箱。取光模組輸出之主光源以光纖導入光箱，RGBW LEDs 補償光源則經 CPC (或 CPC 加光纖)進入光箱，兩者在光箱內均勻混光，最後由光箱出口端輸出，作為照明光源。



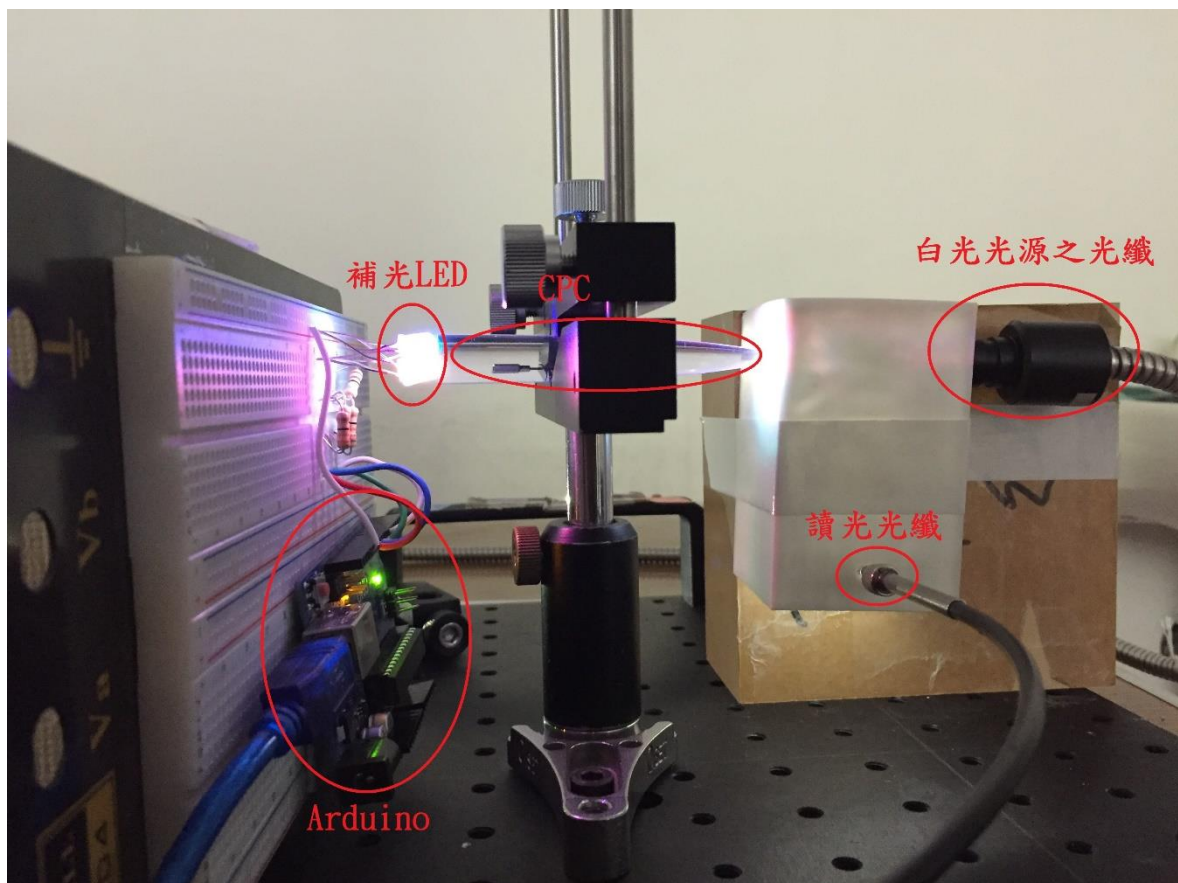
圖十四、實驗系統架構

本系統中，測光模組與補光模組屬自動控制模組。可即時量測太陽光濾出之主光源以及光箱混光後之光源，取得兩者光譜後，自動計算所需之光補償量，再驅動 RGBW LED 各色光源輸出所需之光量。重覆上述測光及補光之流程，可達優化之 LED 補償光。

根據前述設計模擬結果，我們製作 CPC 及光箱，並撰寫程式碼與連接電子電路以控制 LabVIEW 及 Arduino，實現各模組之組立，如圖十五及圖十六所示。



圖十五、光箱實品外觀圖

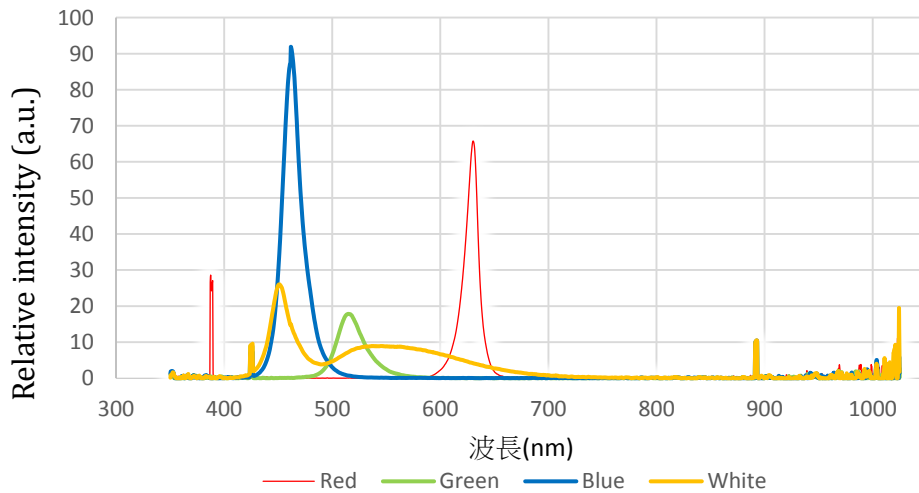


圖十六、補光與混光模組

各模組經基本測試後，連接組成系統。其中取光模組中的奈米濾光元件，係採用全像元件以繞射紅外光。目前全像濾光片的有效濾光面積因受限於雷射擴束系統，僅約2平方公分左右，故該濾光面積尚不足與

聚光透鏡整合；若與光纖整合，也因全像圖案係干涉曝光於玻璃基板上，玻璃基板的長寬(31.5 x 31.5 mm²)大於光纖口，組裝上有問題，因此奈米濾光元件暫採獨立開發之方式，待其技術更成熟後，再加入本太陽光混光系統。亦即：全像奈米濾光元件因受尺寸因素影響，尚未加入本系統。

此外，所使用之 RGBW LED 的光譜分布則如圖十七所示。



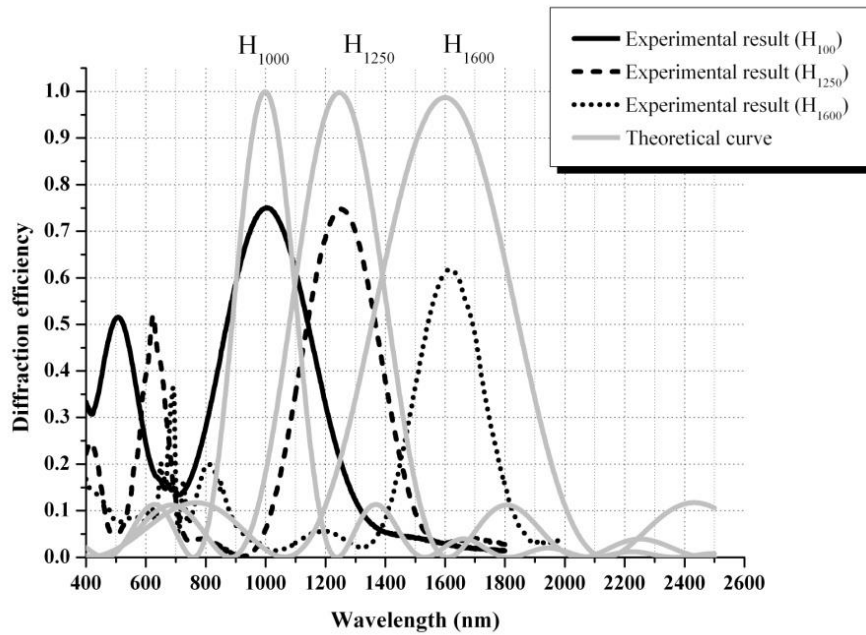
圖十七、RGBW LEDs 皆以 5V 驅動時之頻譜分布

參、主要發現與結論

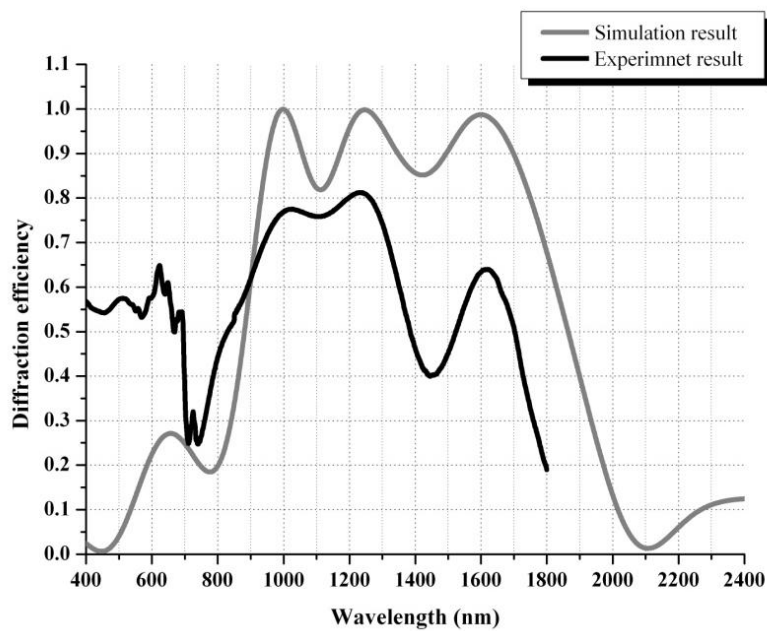
一、奈米全像濾光元件效率

基於全像片易於製作奈米光柵與複製的優勢且具有波長選擇之特性，故在此以「將可見光與紅外光在空間上分開」為目標，來進行濾波特性之設計；另外，考量太陽光能量具寬波段之特性，理想之繞射結果還需經由堆疊多張體積型全像光學元件來達成，故元件之製作採全像技術及堆疊方法，使其成為具波長篩選特性之奈米濾光元件。實際元件頻譜量測結果如圖十八，該圖顯示三張全像光學元件實驗與模擬之繞射效率分布，各為 75.3%、74.8%與 61.4%，實驗結果之繞射中心波長與模擬曲線吻合；圖十九為堆疊上述三張全像光學元件後之繞射效率頻譜與模

擬趨勢，結果顯示雖有部分的可見光能量損耗，但紅外光波段範圍(900 nm~1800 nm)已可達到 70%的平均繞射效率。此成果亦代表著，當混光技術加入奈米全像濾光元件，將有效地濾除對照明無益的紅外光波，留下有用之可見光波。



圖十八、全像濾光元件繞射效率頻譜—實際與模擬結果之比較



圖十九、堆疊全像濾光元件後之繞射效率頻譜—實際與模擬結果之比較

二、混光後之光源均勻度與效率

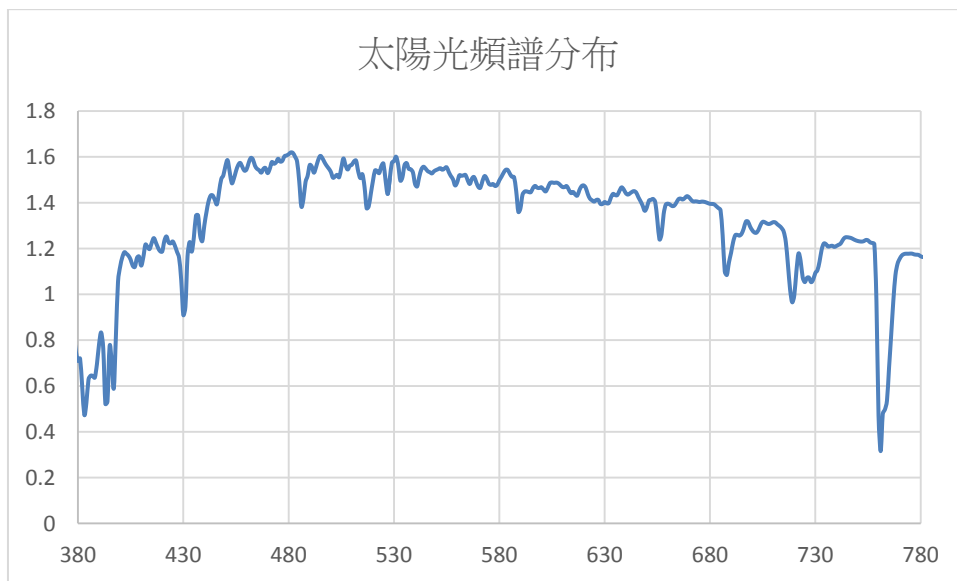
本系統之混光模組係利用內部表面鍍滿硫酸鋇之光箱，使太陽光（實驗時採用太陽能模擬器之輸出光）與 RGBW LEDs 之光在光箱內部均勻混合，再於光箱出口端輸出為照明光。光學模擬之結果顯示，該輸出照明光之照度均勻度為 74.5%，效率為 65.5%；在實驗時，量測輸出面上之九點照度後，並依照上述公式： $\text{均勻度} = \frac{2E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}$ 所計算出的均勻度為 78.4%，如圖二十所示，功率量測後並依照上述公式： $\text{效率} = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}}$ ，則計算出效率為 64.5%，CRI 為 88.5。上述結果顯示，由光箱混光之系統，其效率偏低，是首要須改進之處，未來將嘗試採 CPC 加上光纖之方式混合光源，以提升效率。此外，室內照明之均勻度標準為 80%，此實驗結果稍低於標準值，未來將優化混光光學系統，以提升均勻度。

900	920	850
910	1010	880
650	730	650

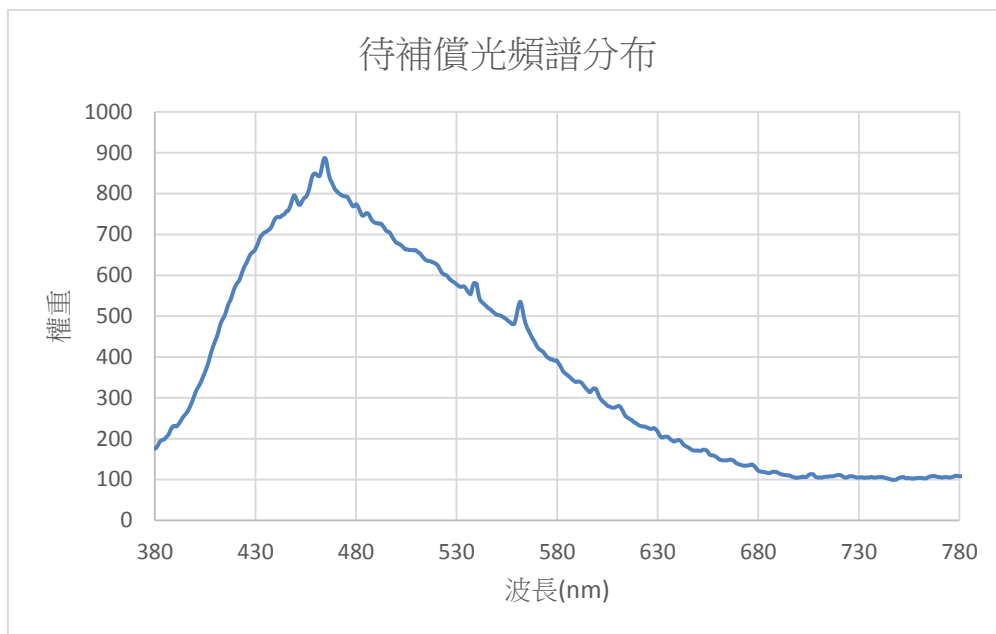
圖二十、位於光箱下方出口面之實際照射均勻度量測值(單位:lux)

三、光色補償

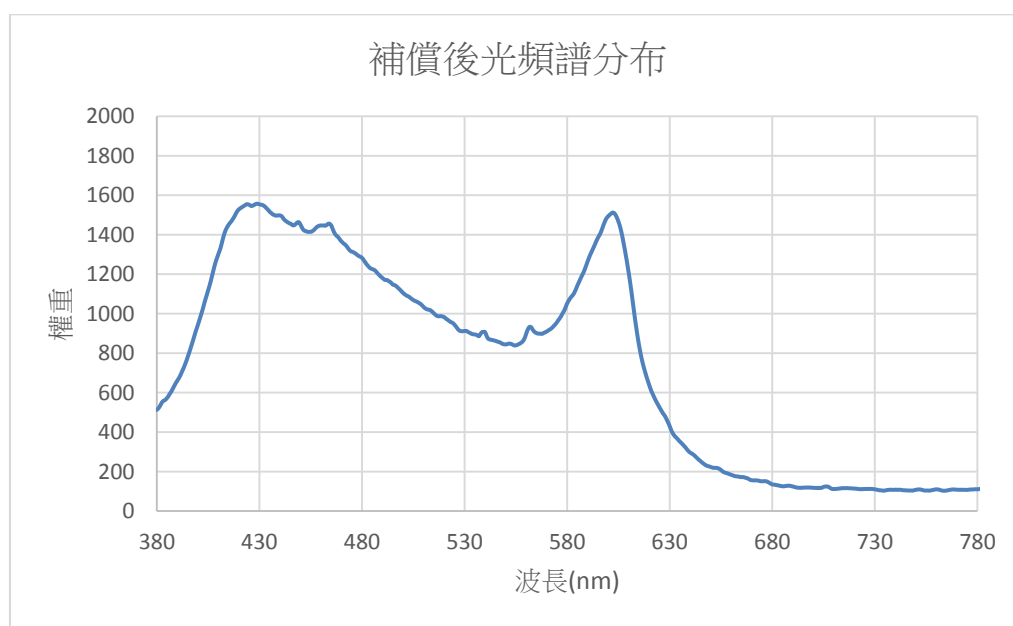
光色補償效果係以光譜量測來判斷，最終混光標的是太陽光之可見光頻譜，如圖二十一所示。但為使實驗易於在室內進行，在此使用手機之閃光白燈作為待補償光譜，再利用 RGBW LED 與之混光，補償前後之光譜如圖二十二及圖二十三所示。由補償後光譜可看出，在 490nm~590nm 與 610nm~780nm 間，因綠光與紅光 LED 之光功率雖已驅動至極限，但仍嫌不足，導致尚未補償成閃光白燈光譜；不過整體照明顏色仍屬室內照明之自然光色。未來將尋找更高功率及更適當光色的 LED，以呈現良好之可見光譜補償效果。



圖二十一、太陽光之可見光譜



圖二十二、待補償光頻譜分布



圖二十三、補償後光之頻譜分布

四、結論

近幾年來，利用太陽光來作室內照明之研究愈來愈多，但動態補

光方式卻不多。本研究利用 RGBW LEDs 作為主要之補償光源，透過 CPC 及光纖之收光導光，可直接將補償光導入光箱內而減少損失。且整個系統採用 Arduino 以及 LabVIEW，可達成自動測光及補光之功效。但由於目前 LED 光功率尚不足夠，待系統改善後，將可更利於室內照明以及植物箱等照明應用。

誌謝

本研究為行政院原子能委員會核能研究所編號1042001INER015之計畫，因核能研究所之支持，使研究得以進行，特此致上感謝。

肆、參考文獻

- [1] M. A. Duguay and R. M. Edgar, "Lighting with sunlight using sun tracking concentrators", APPLIED OPTICS, Vol. 16, No. 5,(1977)
- [2] L. M. Fraas, W. R. Pyle, and P. R. Ryason, "Concentrated and piped sunlight for indoor illumination" APPLIED OPTICS, Vol. 22, No. 4 , 15,(1983)
- [3] Chih-Hsuan Tsuei, Jui-Wen Pen, and Wen-Shing Sun, "Simulating the illuminance and the efficiency of the LED and fluorescent lights used in indoorlighting design", OPTICS EXPRESS, Vol. 16, No. 23,(2008)
- [4] I. Fryc, S. W. Brown and Y. Ohno, "Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source", SPIE, Vol. 5941 59411I (2005)
- [5] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, "FIBER OPTICS" (1991)
- [6] 崔智宣, "LED 光源暨 LED 與太陽光混合照明於室內照明之模擬與分析," 中央光電所博士論文(2011)
- [7] 羅美鈴, "可調式自然日光模擬光源之製作," 中央光電所碩士論文 (2004)
- [8] 林俊廷, "全像頻譜分光技術之太陽光電效率改善研究," 中央光電所碩士論文 (2015)