

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽光奈米均光照明技術研發
Nano technology for solar light-homogenizing

計畫編號：1052001INER011

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

協同主持人：李朱育

研究期程：中華民國 105 年 1 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 肆拾柒萬元

核研所聯絡人員：黃宏承

報告日期：105 年 12 月 05 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	4
一、系統架構.....	4
二、關鍵元件開發.....	13
(一) 奈米濾光元件.....	4
(二) 均光元件.....	8
參、主要發現與結論.....	11
一、奈米濾光元件之設計與驗證.....	11
二、均光光箱之設計與驗證.....	13
(一) 均光元件設計.....	13
(二) 均光光箱量測.....	17
三、結論.....	21
肆、參考文獻.....	22

中文摘要

因應全球暖化和能源危機對再生能源的需求，太陽能成為節能技術的發展重點。而隨著照明科技的演進，照明消耗能源佔人類活動總耗能之比例亦明顯提升。因此，如何將太陽光譜中的可見光波段應用於照明亦成為熱門研究議題。然而，當太陽光應用於照明時，光源易受天氣、季節、...等影響而擾動，因而需要輔助光，以使光源之照度及顏色穩定。且為便利控制光特性，常以易於電控的固態照明光源(如 LED)作為輔助光源。此法雖可提供足夠的照度與光色，但對於照明而言，柔和均勻的光線分布亦是不可或缺，是以發展均光技術係太陽光照明系統之重要研究課題。

由於照明所需之太陽光譜為可見光波段，故本研究先以奈米濾光元件將太陽光譜中的可見光取出。再以發光二極體(LED)光源作為補償光。並設計混光、均光元件，組成一均光模組，此模組可使補償光與太陽可見光以適當配比混合，以實現均勻度良好之舒適輸出光。本研究之均光模組已達成均勻度 85% 且光效 83%。

Abstract

Because of the global warming and energy crises, solar technology draws highly attention. Also, along with the development of lighting technology, the energy consumption of lighting takes an increasing share in the total energy consumption of human activities. Thus, how to use the visible band of sunlight for lighting becomes a hot research topic. When sunlight is applied to lighting, the light source is often fluctuated due to the environmental issues such as climate, season, etc. To solve the problem, the LED light can be an auxiliary light source to compensate the unstable sunlight. Although such a method can provide enough illuminance and colors, the uniformity of light source shall be also considered for the lighting technology. Thus, the uniform-lighting technology is an essential research when developing the solar lighting system.

In the proposed system, a nano-filter was used first to select the visible sunlight. Then the LED light, as an auxiliary source, along with the light-mixing and homogenizing optics formed a light-homogenizing module. Such a module achieved the uniformity of 85% and luminous efficiency of 83% experimentally.

壹、計畫緣起與目的

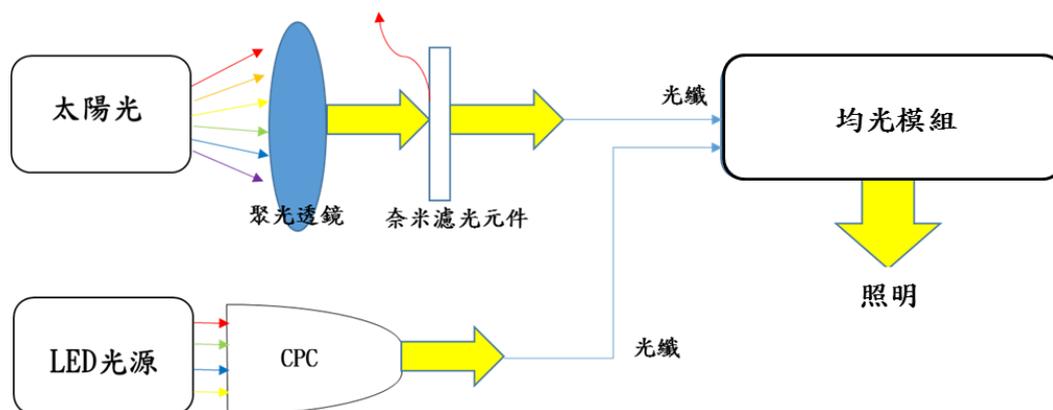
太陽光為寬頻譜光源，其光譜涵蓋紫外光、可見光以及紅外光，其中可見光更可直接用於照明。良好的太陽光照明除了提供寬頻光源外，光特性也須穩定；而藉由混合固態照明與太陽光的可見光，可補償太陽光因氣候、雲層等所致之變異。此外，光源的均勻柔和、無眩光或暗區更是照明光源的必要條件，故均光技術成為太陽光照明系統研發的必要研究。

太陽光照明系統須具有輕巧、低成本、易使用等特性才能產業化。近年研究太陽光照明的文獻雖多[1-3]，但卻少有商品化的成品，其原因在於光源的均勻度、效能與成本等無法兼顧。在解決均勻度問題方面，可參考其他領域的均光技術。例如，應用在投影機之透鏡陣列[4]、數位相機閃光燈之菲涅爾透鏡[5]以及顯示器背光模組的擴散片[6]。為使太陽光照明系統在考量成本之前提下，能兼顧均勻度與效能，本研究以均光光學元件搭配前期計畫之太陽光奈米混光模組，不僅濾出適用於照明的太陽可見光，並使固態照明之 LED 光源進行自動配比補償，更可均勻輸出光的照度，以實現太陽光奈米均光系統，達到高效能且柔和均勻之太陽光照明。

貳、研究方法與過程

一、系統架構

本計畫之太陽奈米均光系統具有以下功能:濾光、補光、混光、均光，系統架構如圖一所示。於濾光模組中，設計奈米濾光元件，以濾除太陽光中的紅外光波，留下可見光。同時，取部分之太陽可見光進行光譜解析與監測，當太陽光之可見光譜不足時，所設計之補光模組可計算出 LED 光所需的出光比例，並使之通過複合拋物面集光器(Compound Parabolic Concentrator, CPC)，以便與太陽可見光會集於混光、均光元件組成之均光模組，使出光照度均勻化，並能避免黑點、眩光等所造成之視覺不舒適。



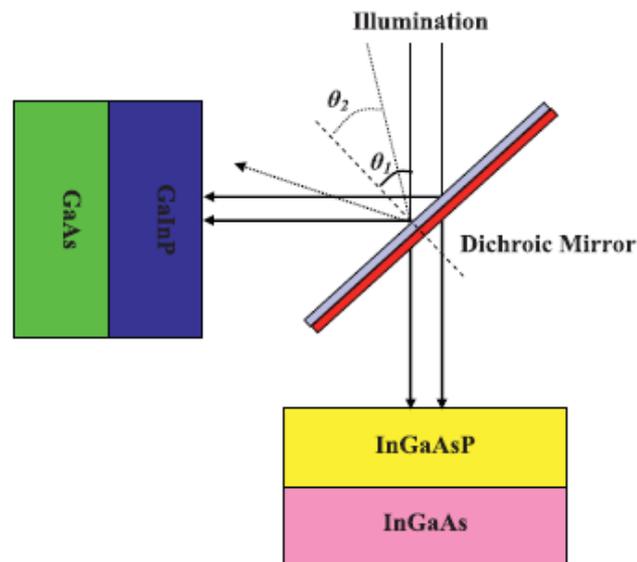
圖一、太陽光奈米均光系統架構圖

二、關鍵元件開發

(一) 奈米濾光元件

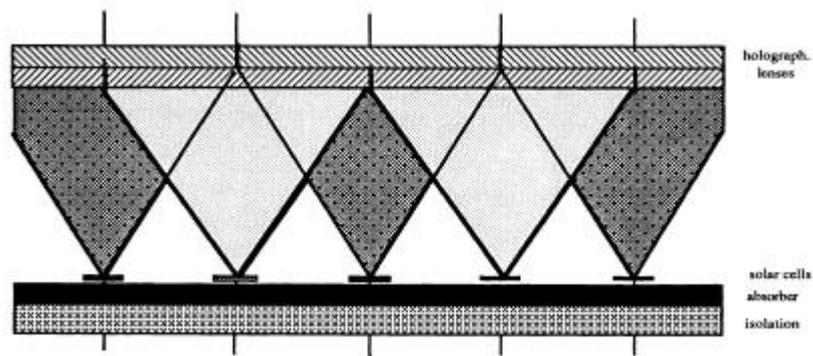
為將太陽光譜中的紅外光波與可見光分離，文獻中已有數種作法。例如: Xiong 等人曾使用分色鏡(dichroic mirror)，將光波分離，並以 GaInP/GaAs 和 InGaAsP/InGaAs 作為接受器，

分別吸收可見光與紅外光，其架構如圖二所示 [7]。實驗測得於 400nm - 660nm 波段之效率為 97%，而於 660nm - 873nm 為 97%，於 873nm - 1180nm 為 15%，於 1180nm - 1700nm 為 4%。然而因該分色鏡在 450nm-500nm 波段有吸收效應，並在 873nm-1180nm 會反射，導致實際效率約為 29%。



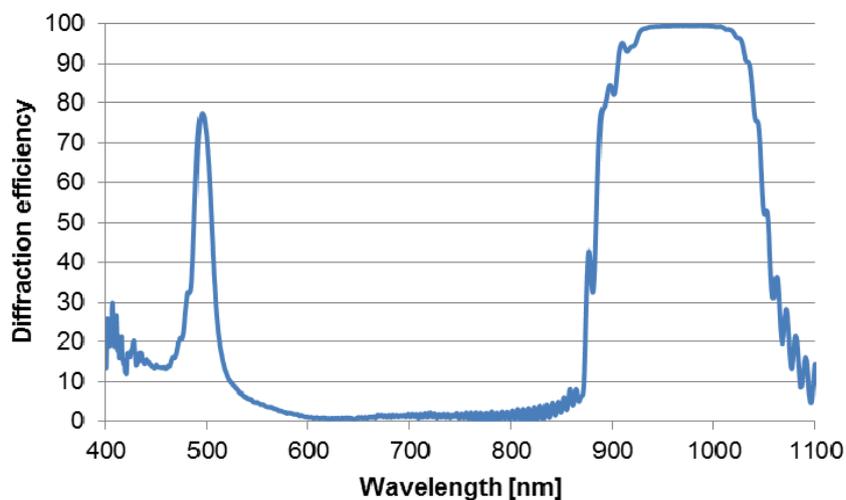
圖二、Xiong 等人設計之分光架構[7]

又如 Frohlich 等人提出之分光式的全像集光系統，其係應用全像分光元件於太陽光集光系統，如圖三所示[8]。傳統的太陽光集光系統，是使太陽光經集光元件後，照射於太陽能電池；然而因太陽能電池材料有其特定能階，故僅特定波段有最大轉換效率，以致無法運用太陽光中其他波段之能量。而利用全像元件之集光與分光功能，可將不同波段之太陽光會聚在不同位置，以便與不同之太陽能電池組合。其計算結果顯示，該系統之轉換效率可高達 50%。



圖三、Frohlich 等人設計之全像分光系統[8]

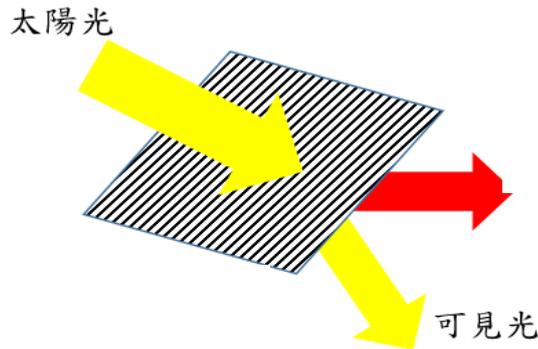
除了上述穿透式全像分光系統外，Zhang 等人亦提出反射式全像系統設計。藉由該團隊所設計之反射式全像元件，可將太陽光的可見光波段反射，而紅外波段繞射，其分光效能良好，繞射效率頻譜如圖四之所示[9]。



圖四、反射式全像分光系統之繞射效率頻譜[9]

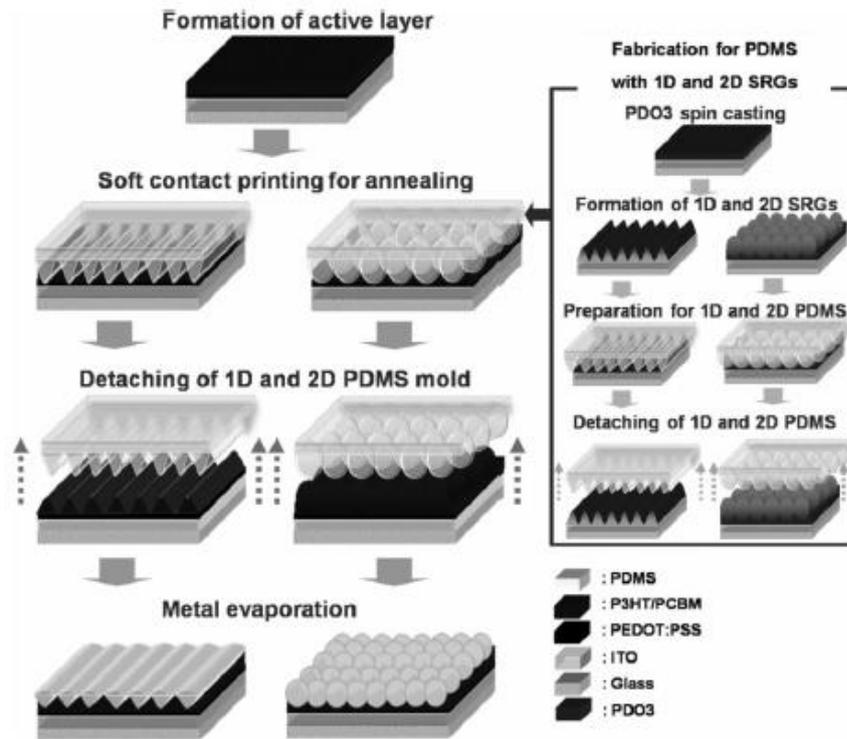
上述全像分光方法雖有良好分光效能，以致可達到良好濾除紅外光之效益，但全像元件的耐候性不佳，使得其應用於戶外時，效能易衰退。因此，在規劃本研究之奈米濾光元件時，全像分光之概念雖可參考，尚需尋找耐候材料。為此，本系統

中的奈米濾光元件，係考慮具有分光功能之光柵元件，但不使用全像材料，而是使用高分子耐候材料製作成繞射光柵，以達成如圖五之分光功能[10]。



圖五、高分子繞射光柵作為奈米濾光元件示意圖[10]

製作高分子光柵的方法，多半使用軟微影技術(soft lithography)之奈米壓印。該技術已被大量運用在微機電系統(MEMS)、先進積體電路與光學元件當中。於太陽能系統應用方面，則如 Seok-In Na 等人之研究[11]。該團隊運用壓印技術於聚二甲基矽氧烷(PDMS)基材上，製作光柵結構，該結構用於太陽能電池表面之 Surface Relief Gratings，可增加入射光能量以提高太陽能電池吸收之光能。該 Surface Relief Gratings 之製作流程如圖六所示。而其實驗結果顯示，太陽能電池之短路電流提高 10.5 mA/cm^2 ，開路電壓提高 0.62 V 。此法製作高分子光柵雖成功地增益太陽能電池效能，但製程繁瑣複雜，因此在本研究中，改採其他製程較簡化之法。



圖六、以奈米壓印技術製作增益太陽能電池效率之表面光柵[11]

綜上所述，在奈米濾光元件之設計上，本研究係參考 Frohlich 團隊的穿透式分光概念；且為了避免元件因戶外使用而效能衰退，故選改用高分子光柵作為分光元件。而在高分子光柵製程上，則思考奈米壓印技術以外之製程較簡之法。

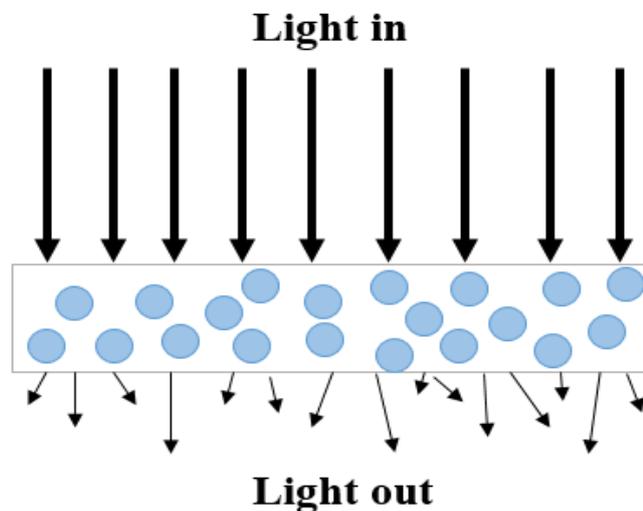
(二) 均光元件

本研究另一關鍵元件為均光元件。以團隊既有之太陽能奈米混光技術為基礎，設計均光元件以與混光模組整合。

具有均光功能的各式光學元件中，擴散片(Diffuser)是常見且技術成熟之產品；市面上之擴散片，主要應用於顯示器背光模組及 LED 固態照明光源。在背光模組之應用中，擴散片主要的功能是使導光板的導光圖案設計得以模糊化[6]；而在 LED

固態照明方面，擴散片的功能則是削弱高亮度 LED 帶來的眩光問題[12]。換言之，無論是應用於顯示或照明，擴散片皆是用以使出射光更加均勻[6, 12-13]。

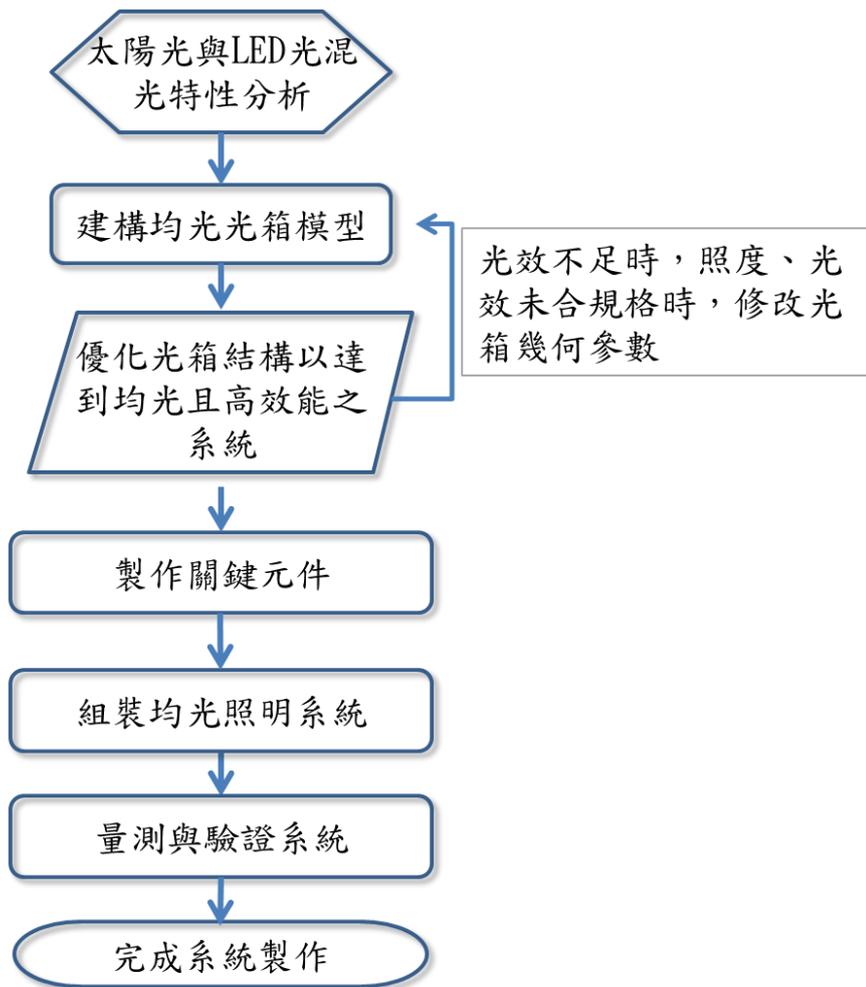
擴散片的原理如圖七所示。常見的製作方式是在擴散片基材(substrate)上塗布特殊化學材料，該材料通常是含微小顆粒的擴散劑與樹脂之結合。當光線通過擴散片時，會受擴散顆粒影響而非定向地折射、反射，造成光線漫射式擴散效果。



圖七、擴散片原理示意圖

本計畫原先規劃使用擴散片做為均光元件，然因所取得之擴散片，廠商並無相關的光學特性資料，可供模擬分析；若委託測試，則費用達萬元以上。因此在成本及效益考量下，暫緩使用擴散片，改尋其他解決方案。由於本計畫在混光元件設計上，係採用內部鍍有高反射率硫酸鋇之光箱，而硫酸鋇的漫反射特性，使得此光箱亦有均光效能；且光箱幾何形狀仍有優化空間，因此，均光光箱亦是一達到高均勻度、高效率照明的方案。

均光光箱及太陽光均光照明系統之研究流程如圖八所示。首先，分析太陽光與補償之 LED 光於光箱內混合時的光源特性，並考慮內部鍍有高反射率硫酸鋇之光箱(反射率 $R = 98\%$)，再以光學模擬優化光箱幾何結構，使光源得以最佳效率混合，藉由設計光箱幾何參數，更可最佳化出光口的照度均勻度。均光光箱之關鍵參數設計完成後，將選擇適當製程以製作元件。最後，組裝所製作的關鍵元件及其他零組件，以完成系統並驗證太陽能奈米均光系統效能。

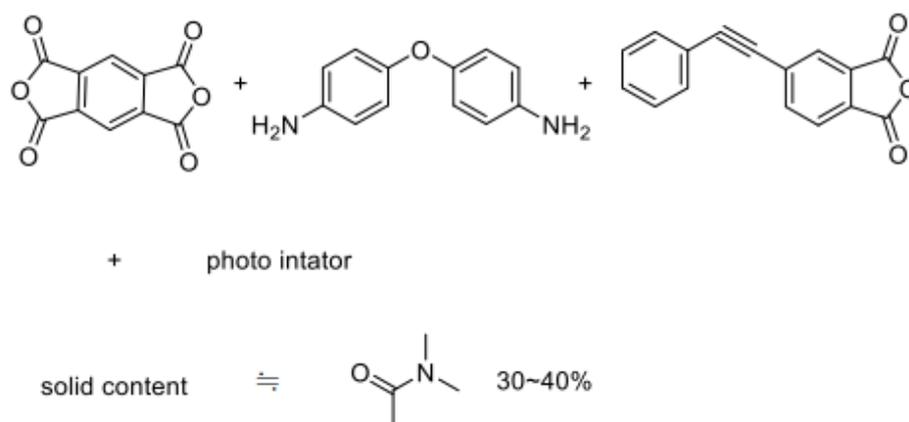


圖八、均光光箱及太陽光均光照明系統之研發流程圖

參、主要發現與結論

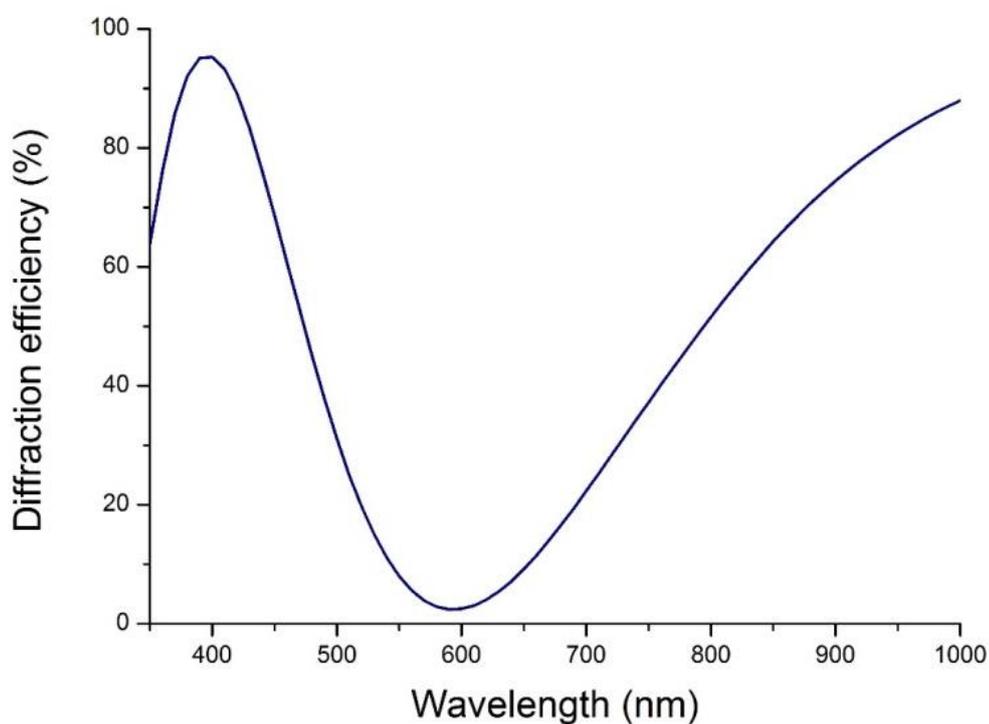
一、奈米濾光元件之設計與驗證

本研究使用高分子材料聚亞醯胺(Polyimide, PI)作為光柵材料，此材料主體結構中導入感光基後，可使材料具光阻特性，而可藉由黃光微影之曝光並顯影製程，製作成光柵結構，如圖九所示。本研究使用之感光性聚亞醯胺係由交通大學材料系黃奕嘉博士製作並提供。



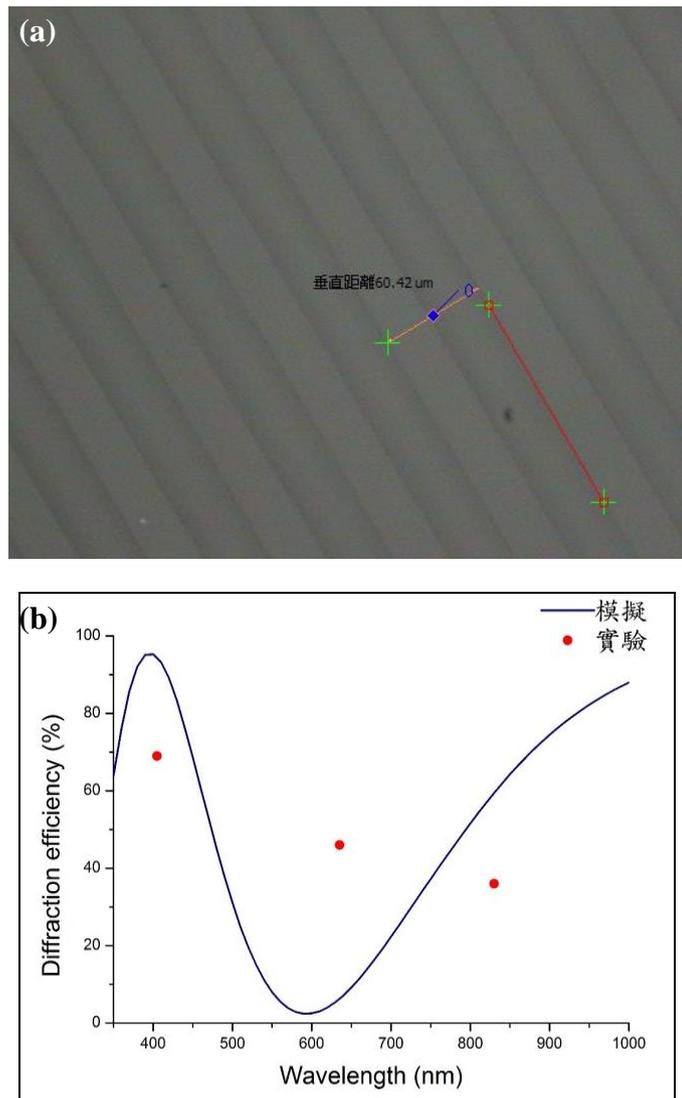
圖九、感光性聚亞醯胺化學式

為配合實驗設備，光柵設計參數如後：光柵週期 $60\ \mu\text{m}$ 、厚度為 $1.1\ \mu\text{m}$ 。模擬計算該光柵的繞射效率頻譜，如圖十所示。由該圖可看出，此光柵使得波長小於 $480\ \text{nm}$ 及大於 $780\ \text{nm}$ 之光線繞射效率為 50% 以上，當材料吸收率極低時，可推得 $480\ \text{nm}\sim 780\ \text{nm}$ 之可見光大多以直進方向穿透。



圖十、高分子繞射光柵之繞射效率模擬

聚亞醯胺實作樣品如圖十一(a)所示，而量測結果則如圖十一(b)。該結果與模擬值有些差距。探究其因，在模擬方面有部分參數並未符合實際情況，例如折射率實際為波長的函數，然模擬時是採用波長 350 nm ~1000 nm 的平均折射率；而製程參數亦未達最佳化，以致光柵實際表面輪廓與理想輪廓有誤差。由於以黃光微影技術製作奈米光柵有賴機台設備，未來若經費許可，將使用先進設備製作，以達到目標之光柵精度。



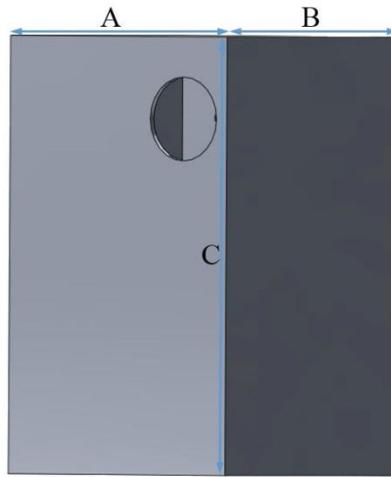
圖十一、(a)聚亞醯胺實作樣品，(b)量測結果。

二、均光光箱之設計與驗證

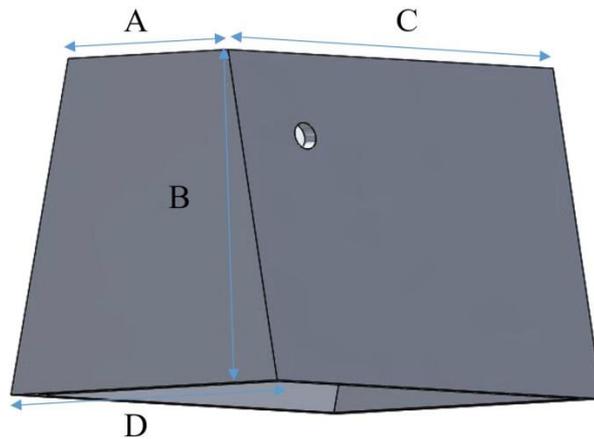
(一) 均光元件設計

前期太陽光奈米混光照明系統之光箱為 5 cm x 5 cm x 8 cm (長 x 寬 x 高) 的長方體光箱，如圖十二所示。其效率(定義為輸出光之功率與輸入光之功率的比值)與均勻度(定義為最小照度與平均照度的比值)分別為 72.6% 以及 79.4%。另一可設計與優化之光箱，為一梯形體，其幾何參數 A, B, C, D 之尺寸

分別為 7 cm, 8 cm, 5 cm, 5 cm，其外觀如圖十三所示；而效率與均勻度之模擬值分別為 69.2% 與 81.8%。

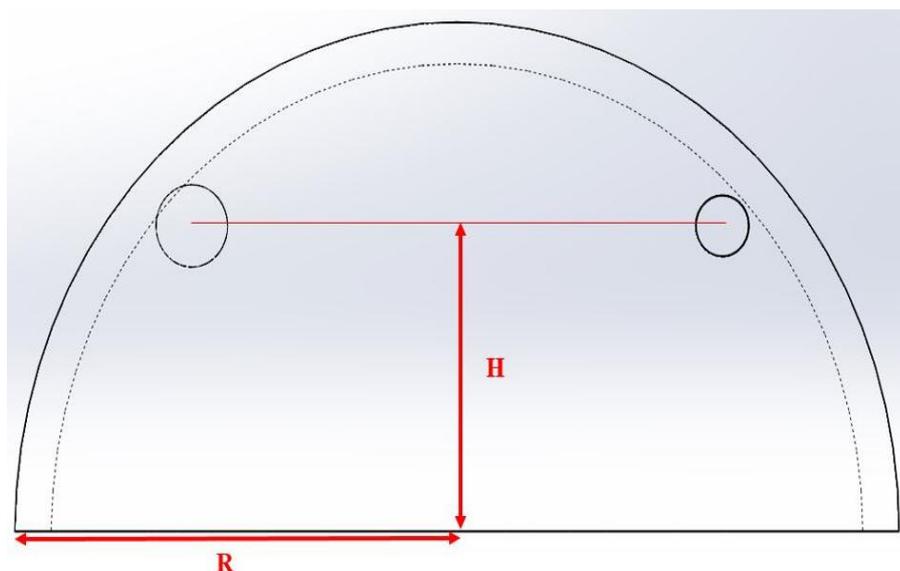


圖十二、長方體光箱



圖十三、梯形體光箱

然而，梯形體光箱成功將均勻度提升之同時，效率也下降了，故再嘗試其他光箱幾何。期間曾嘗試使用半球體光箱，其光箱半徑設為 R ，而光箱內之兩光纖輸入孔分別用於引入太陽光及 LED 光，該些輸入孔的高度則設為 H ，參圖十四所示。但模擬結果顯示，均勻度並無法達標，如表一所示。



圖十四、半球體光箱

表一、半球體光箱優化歷程列表

R (cm)	H(cm)	效率	均勻度
6.0	3	90.2%	43.4%
8.0	3	91.9%	37.7%
10	3	92.3%	29.8%
10	4	92.1%	39.1%
10	5	91.7%	49.4%

又另一種可行之幾何結構，為圓柱體光箱。設定其可變參數為光箱直徑 D 與高度 H ，如圖十五所示。優化結果如表二所示。由於圓柱體光箱較無稜角，故其均勻度可比梯形體光箱之均勻度更高；而由表二可看出，最大均勻度係為 $D = 10.4 \text{ cm}$ 且 $H = 10 \text{ cm}$ 時之 87.8% ，效率則是在 $D = 10.4 \text{ cm}$ 且 $H = 8 \text{ cm}$ 時達最大值 85.7% 。考量未來加入均光元件時，均勻度雖可望上升，但效率將會下降，故在此選用效率較高，且均勻度也已超過 80% 之光箱，亦即： $D = 10.4 \text{ cm}$ 且 $H = 8 \text{ cm}$ 之圓柱體光

箱。其效率與均勻度之模擬值分別為 85.7% 以及 82.9%。

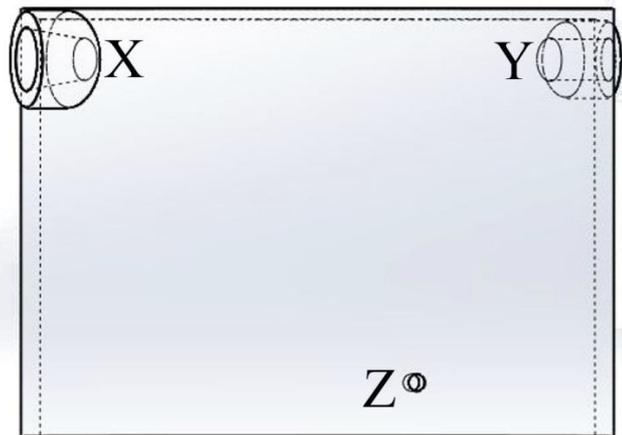


圖十五、圓柱體光箱

表二、圓柱體光箱優化歷程列表

R (cm)	H(cm)	效率	均勻度
9.2	8	80.4%	81.1%
9.8	8	80.1%	87.6%
10.4	8	85.7%	82.9%
11	8	84.2%	80.8%
10.4	9	82.1%	87.3%
10.4	10	80.8%	87.8%

為使輸入光源準確依照模擬設計之角度進入光箱，吾人於在光箱上設計孔套以穩定各光源之入射角度，如圖十六所示。設計完成後，以聚甲基丙烯酸甲酯（Poly(methyl methacrylate)，PMMA）製作光箱樣品，並於其內表面均勻噴塗高反射性質之硫酸鋇，其反射率約為 98%，期能達到均勻混光之效果。製作完成後之光箱成品如圖十七所示。



圖十六、光箱上之孔套示意圖



圖十七、光箱之成品

(二) 均光光箱量測

圓柱體光箱設計並製作完成後，將之取代原長方體光箱進行實驗。本研究以 iPhone 白光 LED 作為待補償光源，利用 RGBW LED 補償光源與之混光，再藉由均光光箱使輸出光具有良好均勻度。

1. 照明效率量測

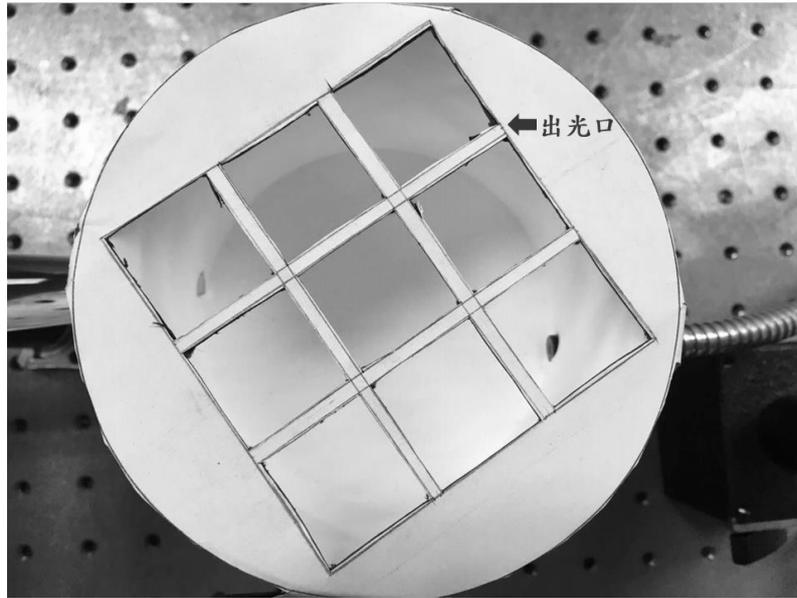
照明效率之量測流程如後：首先驅動系統之自動化補光模組，得到 RGBW LEDs 中各 LED 所需之電壓，再將各 LED 放入積分球內，以所測得之電壓驅動，測得各 LED 的光通量。然而其他元件體積過大(如 iPhone 白光 LED、光箱、CPC)，無法進入積分球量測光通量；在此則使用照度計於發光面(或出光面)量測照度，再將該照度值乘以發光面(或出光面)之面積，以得到光通量。當各發光面(或出光面)之光通量皆得到後，依據效率公式之定義：

$$Efficiency = \frac{P_{output}}{P_{input}} \quad (1)$$

可求得效率；而經量測與計算後，得出效率為 83.3%。

2. 照明均勻度量測

照明均勻度之量測則是先將出光口圓面分割成 9 塊網格，如圖十八所示[14]。



圖十八、出光面計算照明均勻度之網格示意圖[14]

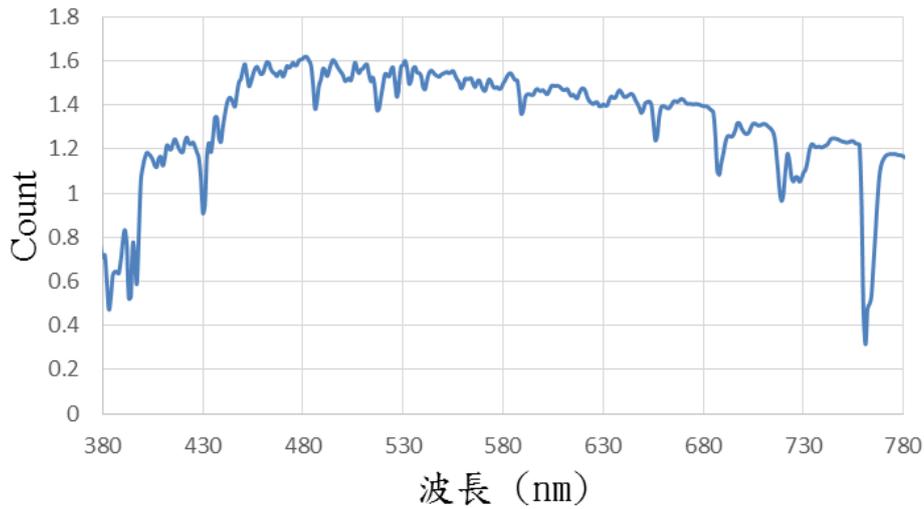
接著使用照度計量測各網格之照度，取得各網格之照度後，依據照度均勻度之定義：

$$U = \frac{2E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (2)$$

可求得均勻度；經量測與計算後，得出均勻度為 85.9%。

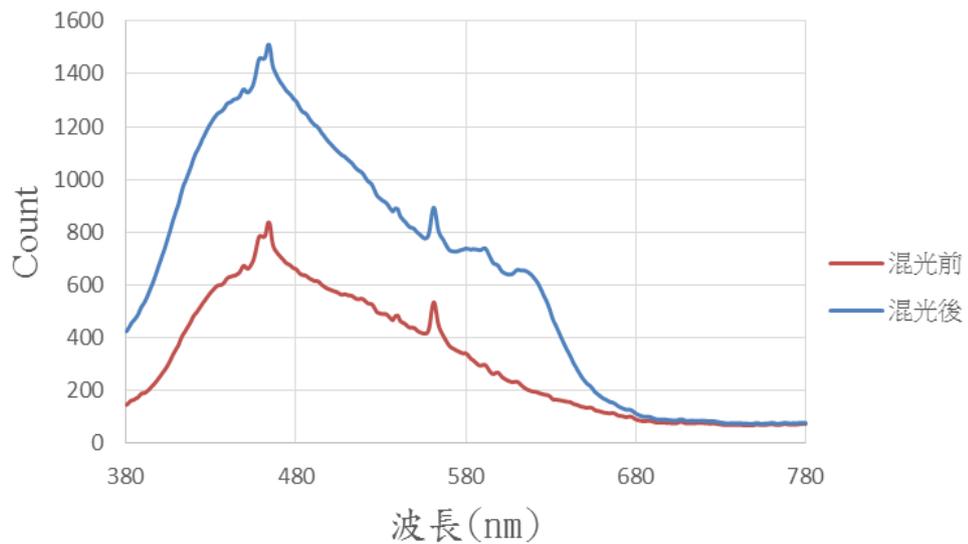
3. 頻譜分布量測

頻譜分布之補償方式是利用 LabVIEW 判別各波長之頻譜分布之不足處，再利用 Arduino UNO 供給電壓使補償光源 RGBW LED，依各色光之需求驅動各 LED，使混合後光譜分布趨近設定之目標：太陽光之頻譜分布，如圖十九所示。



圖十九、太陽光之頻譜分布

當待補償光源入射光箱後，量測混光後之輸出光譜，如圖二十所示。由該圖可知，混光前之頻譜分布與目標頻譜有所差距；而在與 RGBW LED 補償光源混光後，其頻譜分布仍與目標頻譜有明顯差距。其原因在於：本研究所使用之 Red LED 波長之頻譜分布大約為 600nm~650nm，故 650nm 以上之頻譜較難補償。



圖二十、iPhone 白光 LED 補償前後之頻譜分布

三、結論

本計畫之奈米太陽光均光系統具有:濾光、補光、混光、均光之功能。濾光元件方面:本研究使用聚亞醯胺繞射光柵，其模擬結果顯示，該元件可使 480 nm~780 nm 可見光波段直進穿透，小於 480 nm 及大於 780 nm 的波段繞射，然製程參數尚有改善空間。均光模組方面，則已完成均光光箱與系統之整合，實驗結果顯示:此均光系統之出光效率為 83.3%，照度均勻度為 85.9%；達成均勻度大於 80%之計畫目標。

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. 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," 中央大學光電所博士論文(2011)
4. 洪維毅, "採用非對稱式面積分割型均光系統與 LED 光源之 DLP 投影機," 中央大學光電所碩士論文 (2012)
5. 許朝昇, "數位相機閃光燈透鏡之照度均勻化的結構設計," 中央大學機械所碩士論文 (2010)
6. 簡依玲, "液晶顯示器中的背光模組", 奈米通訊, 22 卷, 24-26 頁
7. K. Xiong, S. Lu, J. Dong, T. Zhou, D. Jiang, R. Wang, and H. Yang, "Light-splitting photovoltaic system utilizing two dual-junction solar cells," Sol. Energy, vol. 84, no. 12, pp. 1975–1978, 2010.
8. K. Froehlich, U. Wagemann, J. Schulat, and C. G. Stojanoff, "Fabrication and test of a holographic concentrator for two color PV-operation," Proc. SPIE. 2255, pp. 812–821.
9. D. Zhang, M. Gordon, J. M. Russo, S. Vorndran, M. Escarra, H. Atwater, and R. K. Kostuk, "Reflection hologram solar spectrum-splitting filters," Proc. SPIE. 8468, pp. 846807-1~846807-10. (2012)
10. 洪佩芳, "高分子光柵應用於太陽光分光元件," 中央大學光機電碩士班碩士論文 (2016)
11. S. I. Na, S. S. Kim, J. Jo, S. H. Oh, J. Kim, and D. Y. Kim, "Efficient polymer solar cells with surface relief gratings fabricated by simple

- soft lithography,” Adv. Funct. Mater., vol. 18, no. 24, pp. 3956–3963, 2008
12. “擴散板的用途與功能”, 旗峰光聚公司技術資料, <http://www.jifengtw.com/>
 13. C.-C. Sun, W.-T. Chien, I. Moreno, C.-T. Hsieh, M.-C. Lin, S.-L. Hsiao, and X.-H. Lee “Calculating model of light transmission efficiency of diffusers attached to a lighting cavity,” Opt. Express, Vol.18, pp. 6137-6148 (2010)
 14. 羅士傑, “太陽光與固態照明自動化混光技術研究,” 中央大學光機電碩士班碩士論文 (2016)