

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

分光太陽影像追蹤技術研發

**Development of solar spectral splitting technology by nano-grating
structures**

計畫編號：1022001INER021

受委託機關(構)：國立交通大學

計畫主持人：余沛慈副教授

聯絡電話：035-712121 ext.56357

E-mail address：yup@faculty.nctu.edu.tw

核研所聯絡人員：黃宏承

報告日期： 102 年 12 月 5 日

目錄

目錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
一、計畫緣起.....	3
二、計畫目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	4
一、光柵分光.....	4
二、多層膜分光.....	12
參、主要發現與結論.....	16
一、特定光譜分光.....	17
二、結論.....	22
肆、參考文獻.....	24

中文摘要

使用太陽影像追蹤為高精度、高維護的先進追蹤技術應用於高聚光太陽光發電系統，太陽光為全光譜區，容易受雲或大氣微粒影響影像攫取的清晰度，而影像的清晰度決定追蹤的精度。為提高影像的清晰度，需將光加以分光以攫取特定光，提高太陽影像清晰度。分光大致可分為傳統光學稜鏡及光柵分光兩類。稜鏡型分光鏡的優點是透光好，光譜明亮，尤其是藍光區範圍大，所以分辨率好；缺點是紅光區範圍小，分辨較不易，且價格較高。光柵型分光鏡的優點是光譜區均勻，缺點是透光性差，需用強光照射，且會產生多組繞射光譜區，在分辨上較為複雜。故在此計畫中我們利用模擬軟體進行光柵結構上的優化與改善，分析當模擬的光柵結構參數改變時對繞射光譜的影響與變化，我們進一步研究了光柵的週期、高度、寬度、形狀等變因對結構參數的依賴關係。為了因應特殊波段分光的需求，我們結合濾光片與光柵搭配使用，設計濾光片的帶通波長範圍，可成功依照不同的需求而分別得出不同區段的繞射頻譜。後續將研究特定光譜區影像模式，對於因雲或大氣微粒造成太陽影像失焦，進行實際追蹤基準(benchmark)研究。其所取得太陽影像，可使用智慧影像訊號處理推估等技術，定位出太陽中心位置，進行高精度太陽追蹤，並增強太陽光追蹤器穩定，而提昇聚光型高效率 III-V 族發電系統效率，故需研發分光太陽影像追蹤技術。

中文關鍵字：光譜分光、光柵、濾光片、太陽光追蹤器

Abstract

An advanced sun tracking system detects the motion of the sun with high resolutions and precision, which is an essential part for highly concentrated solar systems. However the cloud shadow or particles in the atmosphere can easily block the incident light, and hence affect the sharpness and clarity of the captured sun image, leading to a lowered resolution of the tracking system. In order to enhance the image quality and increase resolution, we utilize the infrared components of the solar radiation, as CCD has a relatively high sensitivity in this spectral range. Conventional spectrum splitting techniques are generally realized via optical prisms and nano-gratings. The advantages of prisms include high resolution and transmittance for a broad spectrum, particularly in the short wavelength range. However, it is more costly than the grating and the resolution in the long wavelength range is not as adequate. The greatest advantage of nano-gratings is the uniformly distributed spectral range of the split spectra. However, the low transmittance is a disadvantage and hence requires high irradiance illumination. Moreover, the optical diffraction also produces high order components in the desired spectral regime, which also complicates the detection process. In this project, we will employ two spectrum splitting techniques to separate the visible and near infrared wavelength components of solar radiation in order to better resolve the sun image for CCD camera. It is found that optical filters based on dielectric thin-film coating are most efficient for broadband spectrum splitting, while nano-grating is effective in separating the desired spectral components with a smaller bandwidth for specific applications. We further investigate the dependence of the split spectra on the structural parameters of nano-gratings, including pitch, height, width, shape, etc. Combining our results with the digital image processing techniques, it is possible to realize an advanced sun tracking system with high precision for high-efficiency concentrated photovoltaic applications.

Key words: Spectrum splitting, Grating, Optical filter, Sun tracking system

壹、計畫緣起與目的

一、計畫緣起

使用太陽影像追蹤為高精度、高維護的先進追蹤技術應用於高聚光太陽光發電系統，太陽光為全光譜區，容易受雲或大氣微粒影響影像攫取的清晰度，而影像的清晰度決定追蹤的精度。為提高影像的清晰度，需將光加以分光以攫取特定光，提高太陽影像清晰度。

二、計畫目的

- (一) 太陽能發電系統多為固定安裝，該方式雖然控制、安裝簡便，但是由於大部分時間太陽光無法直射，造成利用率較低。若藉由太陽影像追蹤技術對太陽光進行追蹤，使太陽光始終垂直照射在接收面，則接收到的太陽輻射將大幅增加，從而達到提高發電效率、降低成本的目的。
- (二) 太陽的方位隨著對觀測位置和對觀測時間的不同而不同。因此，欲追蹤太陽位置就必須先對太陽進行定位。進行定位一般是使用 CCD 攝影機作為量測設備，CCD 對於紅外光波段有較高的敏感度，運由光柵分光的技術使紅外光譜應用於 CCD 感測，藉此提高影像追蹤的精確度。
- (三) 我們計畫使用光柵來對光頻譜加以分光。因繞射式光柵光學元件，具有對波長變化靈敏度高、高繞射效率和低吸收的特性，可同時有聚焦、濾波、空間分光的功能。因此我們選用傳統光柵作為我們未來設計上的基礎，並藉由 RSoft 模擬找出能精確繞射出所需波段的光柵結構。若能藉由光柵分光的特性使設計之波段分開，便能利用此空間特性同時提高太陽能電池使用效率以及光追蹤器的精準度。

貳、研究方法與過程

一、光柵分光

(一) 光柵繞射

所謂繞射，為光波在傳播過成當中經過障礙物邊緣、孔隙或是介質差異產生模態演化的展衍現象。1985 年 Thomas K. Gaylord 等人提出了對於光柵結構一連串的繞射理論推導分析以及應用層面的可能性，例如像是雷射光束的偏折、導引、調制、耦合、濾波以及波前重建等應用。

(二) 繞射效率的計算

首先，要先使用 state-variables 方法來求解第 n 層的嚴格耦合波方程式；其次，電磁波的邊界條件(切電場與切磁場連續)必須滿足於每一個界面，包含反射區與第一層平板光柵，一直到第 N 層平板光柵與穿透區的界面；最後，將列舉的邊界條件方程式用矩陣方式可解出反射與穿透振幅(R_i 與 T_i)，由此方法即可獲得繞射效率。定義第 n 個平板光柵的 state variables

$$S_{1,i,n}(z) = S_{i,n}(z)$$

$$S_{2,i,n}(z) = dS_{i,n}(z)/dz$$

代入無窮組二次微分方程式可以獲得兩個無窮組一次微分方程式

$$\frac{S_{1,i,n}(z)}{dz} = S_{2,i,n}(z)$$

$$\frac{S_{2,i,n}(z)}{dz} = -k^2(\epsilon_{III} - \epsilon_I) \sum_{h=1}^{\infty} \tilde{\epsilon}_{h,n} S_{1,i-h,n}(z) - K^2 i(m-i) S_{1,i,n}(z) \\ - k^2(\epsilon_{III} - \epsilon_I) \sum_{h=1}^{\infty} \tilde{\epsilon}_{h,n}^* S_{1,i+h,n}(z) + j2(k_{2,n}^2 - k_1^2 \sin^2 \theta') S_{2,i,n}(z)$$

如果用矩陣的型式替代，可得到

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \tilde{S}_{1,p,n} \\ \vdots \\ \tilde{S}_{2,p,n} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{p,q,n} & b_{p,q,n} \\ c_{p,q,n} & d_{p,q,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \tilde{S}_{1,p,n} \\ \vdots \\ \tilde{S}_{2,p,n} \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\tilde{S}_{l,p,n} \equiv \tilde{S}_{l,i,n} \text{ (for } l=1,2), \dot{S} = dS/dz \text{。}$$

上面矩陣的解答為

$$\tilde{S}_{p',n}(z) = \sum_{q'}^{2s} C_{q',n} \omega_{p',q',n} \exp(\lambda_{q',n} z)$$

$\tilde{S}_{l,p,n}$ (for $l=1,2$) 被 $\tilde{S}_{p',n}$ 重新取代, $p' = p + (l-1)s$ 。

接著利用馬克斯威爾方程式與切電場切磁場必須在界面連續的條件

$$H_x = (-j/\omega\mu) E_y / \partial z$$

反射區與光柵區第一層界面的電場磁場形式可表達成

$$\delta_{i0} + R_i = \sum_{q'=1}^{2s} C_{q',1} \omega_{p',q',1}$$

$$j(k_{1i} \cdot \hat{z})(R_i - \delta_{i0}) = \sum_{q'=1}^{2s} C_{q',1} \omega_{p',q',1} [\lambda_{q',1} - j(\sigma_{i,1} \cdot \hat{z})]$$

光柵區第 n 層與第 $n+1$ 層界面的電場磁場形式可表達成

$$\sum_{q'=1}^{2s} C_{q',n} \omega_{p',q',n} \exp\{[\lambda_{q',n} - j(\sigma_{i,n} \cdot \hat{z})]nd/N\}$$

$$= \sum_{q'=1}^{2s} C_{q',n+1} \omega_{p',q',n+1} \exp\{[\lambda_{q',n+1} - j(\sigma_{i,n+1} \cdot \hat{z})]nd/N\}$$

$$\sum_{q'=1}^{2s} C_{q',n} \omega_{p',q',n} [\lambda_{q',n} - j(\sigma_{i,n} \cdot \hat{z})] \times \exp\{[\lambda_{q',n} - j(\sigma_{i,n} \cdot \hat{z})]nd/N\}$$

$$= \sum_{q'=1}^{2s} C_{q',n+1} \omega_{p',q',n+1} [\lambda_{q',n+1} - j(\sigma_{i,n+1} \cdot \hat{z})] \times \exp\{[\lambda_{q',n+1} - j(\sigma_{i,n+1} \cdot \hat{z})]nd/N\}$$

光柵區與穿透區界面的電場磁場形式可表達成

$$\sum_{q'=1}^{2s} C_{q',N} \omega_{p',q',N} \exp\{[\lambda_{q',N} - j(\sigma_{i,N} \cdot \hat{z})]d\} = T_i$$

$$\sum_{q'=1}^{2s} C_{q',N} \omega_{p',q',N} [\lambda_{q',N} - j(\sigma_{i,N} \cdot \hat{z})]$$

$$\times \exp\{[\lambda_{q',N} - j(\sigma_{i,N} \cdot \hat{z})]d\} = -j(k_{3i} \cdot \hat{z})T_i$$

上面六個總共代表了 $2(n+1)s$ 個方程式，未知數的部份為分別 s 個的 R_i 與 T_i ，然後每一層都會有 $2s$ 個常數項 $C_{q',N}$ ，所以也是 $2(n+1)s$ 個未知數，就可以去求解未知數的部份。

最後，獲得了 R_i 與 T_i ，繞射效率也就可以算出來，在反射區的繞射效率為

$$DE_{1i} = \text{Re}[(k_{1i} \cdot \hat{z}) / (k_{10} \cdot \hat{z})] R_i R_i^*$$

穿透區的繞射效率為

$$DE_{3i} = \text{Re}[(k_{3i} \cdot \hat{z}) / (k_{10} \cdot \hat{z})] T_i T_i^*$$

藉由上面的公式，便能將任意形狀的週期性結構，計算任意階數的繞射效率。

(三)光柵模擬

1.文獻模型參數重建

(1)運用 RSoft 光學模擬

運用 RSoft 光學模擬軟體來計算任意波長的繞射效率，只要事先決定好參數的設定，例如光柵週期、高度、光柵與空氣寬度比(FF)、繞射階數等，就可以得到對應這些參數的繞射效率。

(2)文獻參數重建

根據文獻描述，當光線入射角度剛好在第一個布拉格角度，也就是 30 度的時候，會有一階最大繞射效率。光柵週期定為 $0.8\mu\text{m}$ ，因為會跟繞射波段為接近的等級，深寬比為 $0.25/0.8$ ，高度為 $1.5\mu\text{m}$ ，如圖 1(a)所示。而其對應的繞射效率如圖 1(b)所示，可看到在負一

階的位置可見光波段被完整的繞射出來。

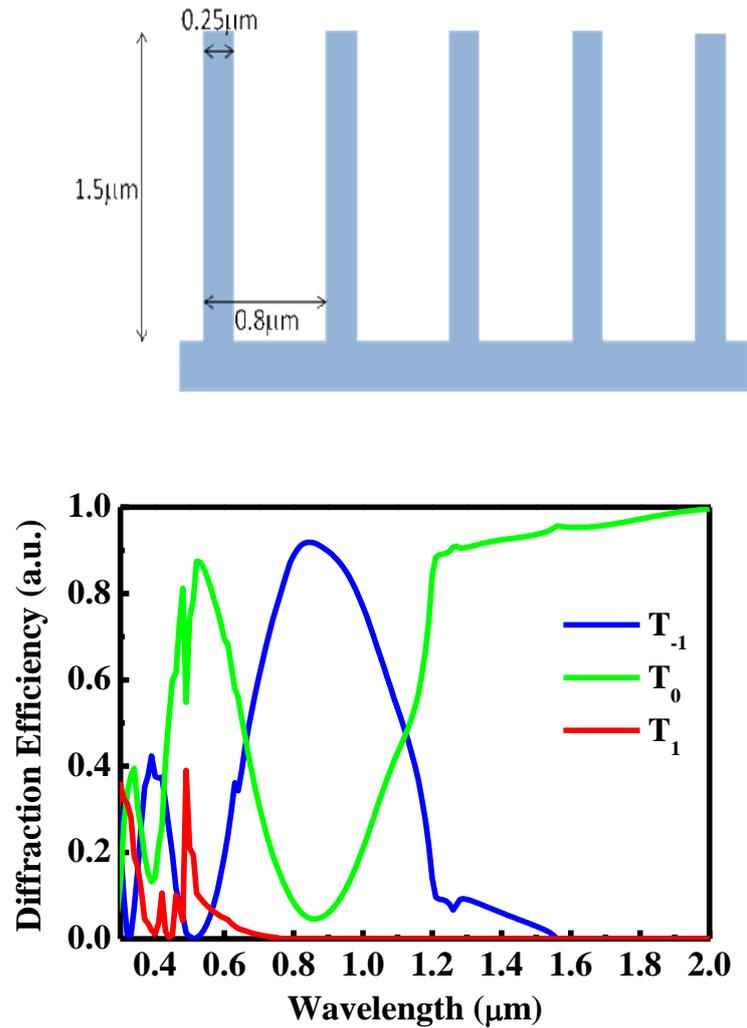


圖 1. (a)光柵結構深寬比為 0.25/0.8，高度為 1.5 μm (b)繞射效率

2. 參數變化分析

(1) 參數分析

(a) 高度變化

我們固定光柵的週期為 $0.8\mu\text{m}$ 和寬度 $0.25\mu\text{m}$ 等參數，只改變高度觀察負一階穿透光頻譜變化。由圖 2 可看到當高度從 $0.5\mu\text{m}$ 變到 $2.0\mu\text{m}$ ，光頻譜有紅移的趨勢，而主穿透光峰值會逐漸往 $0.8\mu\text{m}$ 收斂。

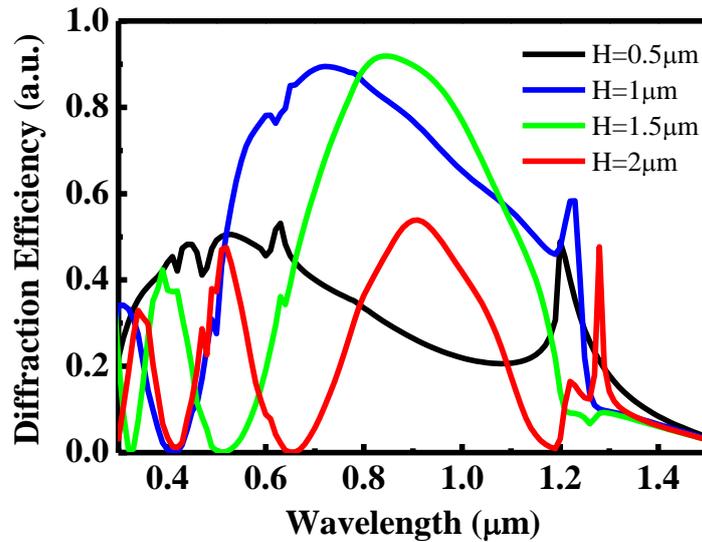


圖 2. 不同高度變化下波長對應之繞射效率

(b) 周期變化

我們固定光柵的高度為 $1.5\mu\text{m}$ 和寬度 $0.25\mu\text{m}$ 等參數，只改變周期觀察負一階穿透光頻譜變化。由圖 3(a)可看到週期對繞射波段的關係，與文獻中提到的論點符合，也就是說光柵的週期大小與繞射波段有關。值得注意的是當週期為 $1.0\mu\text{m}$ 時，若能再利用濾光片濾掉 $0.5\mu\text{m}$ 以上的光，我們將可得到短波長藍紫光頻譜。而當週期為 $0.4\mu\text{m}$ 時，可得到繞射出黃到紫光頻譜(即缺少紅光波段)。如圖 3(b)所示，若改為觀察零階穿透光頻譜變化。當週期為 $0.8\mu\text{m}$ 時，除了紅光以外，可見光波段可以被很完整的保留下來，且在綠光部分保有很高的穿透率。而當週期為 $0.6\mu\text{m}$ 時，其效果更明顯，紅光部分已剩不多，若搭配濾光片將 $0.5\mu\text{m}$ 以上的光濾掉，更可得到藍綠色波段的頻譜。

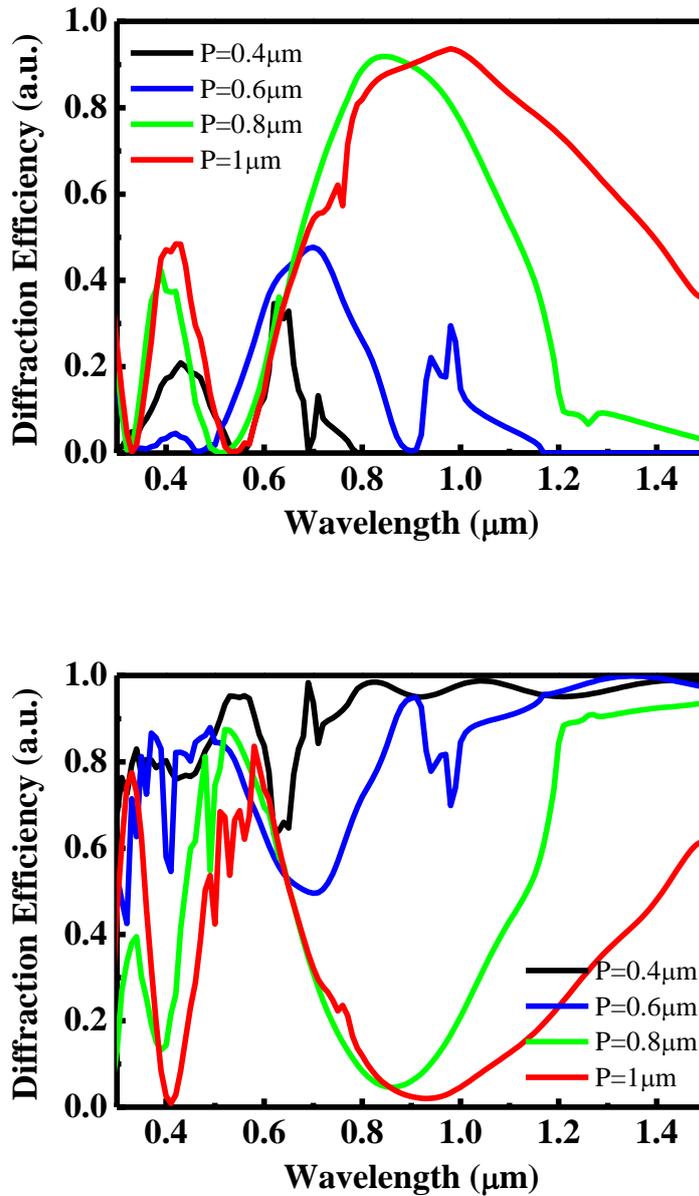


圖 3. (a)不同周期變化下波長對應之負一階繞射效率 (b)不同周期變化下波長對應之零階繞射效率

另外，我們發現當光柵材料維持 SiO₂ 但形狀改為三角錐狀，結構的週期為 0.5 μm ，高度為 1.5 μm ，直徑為 0.25 μm 時，光線經過光柵以後的-2 階繞射光可以得到純粹之近紫外光的分光結果，由圖

4 所示，在-2 階的繞射光中，皆不存在大於 0.5 μm 的光線，0.37 μm ~0.5 μm 的繞射效率低於 10%，而對於小於 0.37 μm 光線的繞射效率迅速攀升，因此由此可得較高比例之 UV 光的繞射光線。

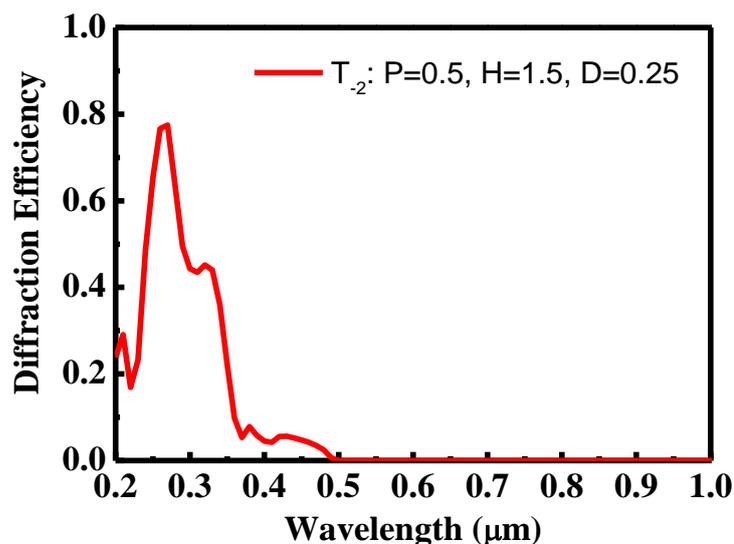


圖 4. $P=0.5\mu\text{m}$ ， $H=1.5\mu\text{m}$ ， $D=0.25\mu\text{m}$ 的-2 階繞射光線頻譜

(c) 直徑變化

如果我們將光柵的高度固定為 1.5 μm ，而週期固定在 0.8 μm ，去觀察當柱狀型光柵的直徑改變時在-1 階的繞射效率對波長的變化情形。由圖 5 可發現，相較於改變高度與週期兩個參數，我們改變直徑時對於頻譜的中心波長位置較不敏感。但隨著直徑的上升，在短波長的次峰值會朝向長波長的主峰值靠攏，且繞射效率有逐漸下降的趨勢。當直徑為 0.625 μm 時即可發現，繞射效率值降到 $D=0.25\mu\text{m}$ 的一半左右，這應該是由於直徑上升但週期不變，所以

光柵間的空隙逐漸被填滿而導致整體結構越來越接近完整的平面所致，而漸漸喪失繞射的現象與效果。

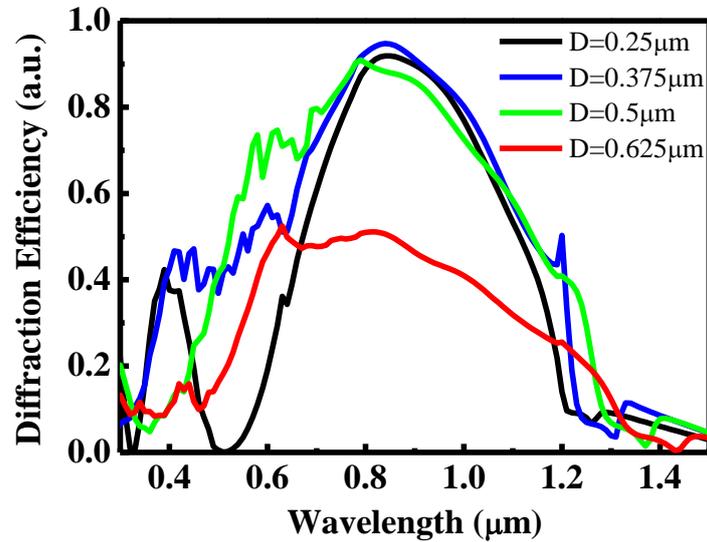


圖 5. 不同直徑變化下波長對應之負一階繞射效率

另外值得一提的是，我們發現當光柵結構高度為 1.5μm、週期為 0.8μm 而直徑為 0.625μm 時，如圖 6 的紅色曲線所示，可以發現此結構對於藍光 450nm 的波段在-2 階的繞射光線中有特別強的繞射效果，高達 70%，針對希望分離藍光波段的系統非常有幫助。

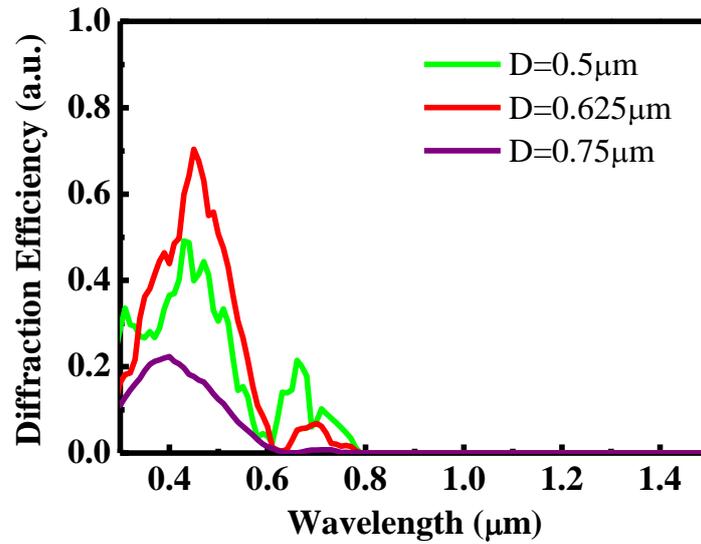


圖 6. 不同直徑變化下波長對應之負二階繞射效率

二、 多層膜分光

(一) 薄膜光學

光學薄膜是指在光學元件上或獨立基板上鍍上一層或多層之介電質膜或金屬膜或介電質膜與金屬膜組成之膜堆來改變光波傳遞的特性。包括光的透射、反射、吸收、散射、偏振、相位變化，進而設計及製造各種單層及多層之光學薄膜來達到科學與工程上的應用。

(二) 截止濾光片 (bandpass filter)

1. 特性

截止濾光片是指在某個波段不透光而相鄰的另一波段穿透率突然變得很高的一種光學元件，可分為長波通濾光片和短波通濾光片兩種。一般可依靠材料吸收或者由多層膜干涉來達到這樣的效果。

2. 基本結構

濾波器本身一般由對稱的膜堆組成，膜堆的基本單元是一層中心波長四分之一厚度的薄膜，由數種材料相互堆疊而成。一般表示如 $\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^S$ 或 $\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^S$ ，其中H表示材料折射率大於基板的薄膜，而膜厚為四分之一中心波長；反之，L表示材料折射率小於基板的薄膜，膜厚同樣為四分之一中心波長。將其展開 $\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^S = \frac{H}{2}LHLHLH\cdots\cdots L\frac{H}{2}$ ；而 $\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^S = \frac{L}{2}HLHLHL\cdots\cdots H\frac{L}{2}$ 。當S越大，也就是對稱膜堆的組數越多時，可以得到越陡直的濾波邊界。

3. 模擬設計

我們以對稱膜堆設計多層膜結構如下， $\frac{L}{2}$ 為八分之一波長膜厚；H、L、J、M為四分之一波長不同折射率材料之膜厚。

$$S \left| \frac{L}{2} \ 0.642(LJ2HL)^8 \ 0.57(LMHML)^8 \ 1.125\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right) \ \left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right)^5 \ 1.1\left(\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right) \right|$$

$$n_S = 1.5 \quad n_L = 1.38 \quad n_J = 1.781 \quad n_M = 1.9 \quad n_H = 2.3 \quad \lambda_0 =$$

860nm

利用 RSoft 光學模擬軟體繪製多層膜結構，並代入單一折射率定值而不考慮光波長與消散系數之影響，其建膜結構折射率剖面圖如圖 7 所示，並藉由嚴格耦合波分析法計算膜堆光學特性，可得截止濾光片於可見光區域高穿透之光學特性，如圖 8(a)所示，可以發現波長從 0.3um~0.7um 的範圍中可見光波段的反射率可以達到近乎 3% 以下的超低反射率，而對於紅外光波長的範圍的反射率卻有接近 100%，如圖 8(b)所示，用此截止濾波器即可輕易達到將可見光波段從太陽光頻譜中濾出的效果。

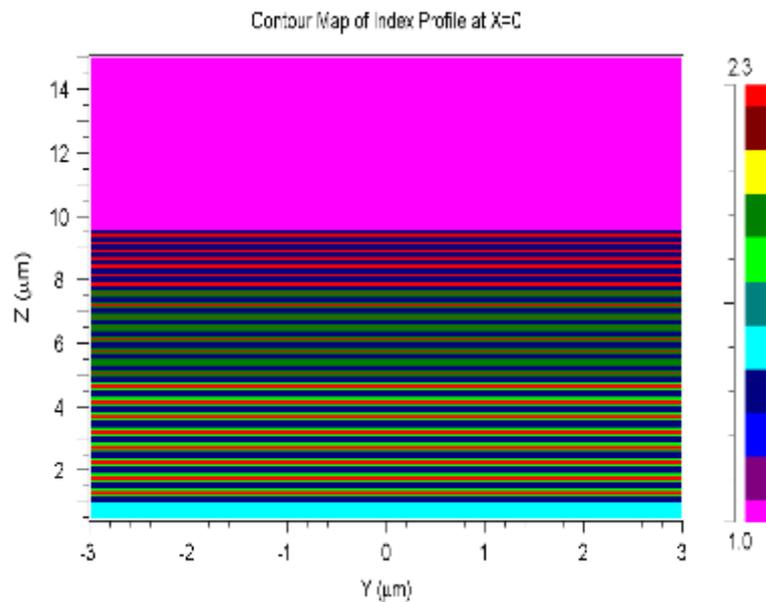


圖 7. 多層膜折射率剖面圖

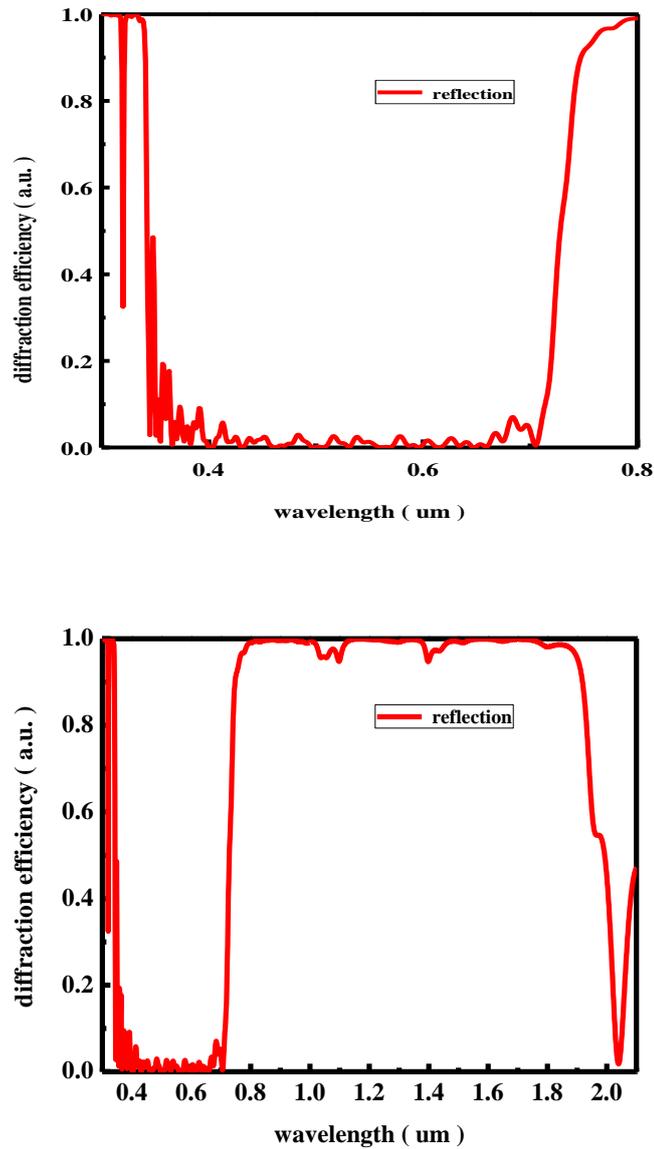


圖 8. (a)RCWA 模擬材料折射率固定之反射光譜，波長範圍從 0.3um~0.8um (b) 將模擬波長範圍放大的結果，波長範圍從 0.3um~2.1um

因真實材料的折射率包含實部折射率與虛部折射率，虛部折射率即一般所認知的消散係數，與材料的吸收效果有關，因此若帶入真實材料折射率並考慮消散係數，模擬結果如圖 9 所示，高穿透區域因各波長折射率差異而有部份衰減。利用截止濾光片的設計我們可以把特定波段保留下來而剩下的部分則會被多層膜結構反

射掉，因此適當的利用截止濾光片和光柵的搭配，我們可以試著得到特定的窄光頻譜。

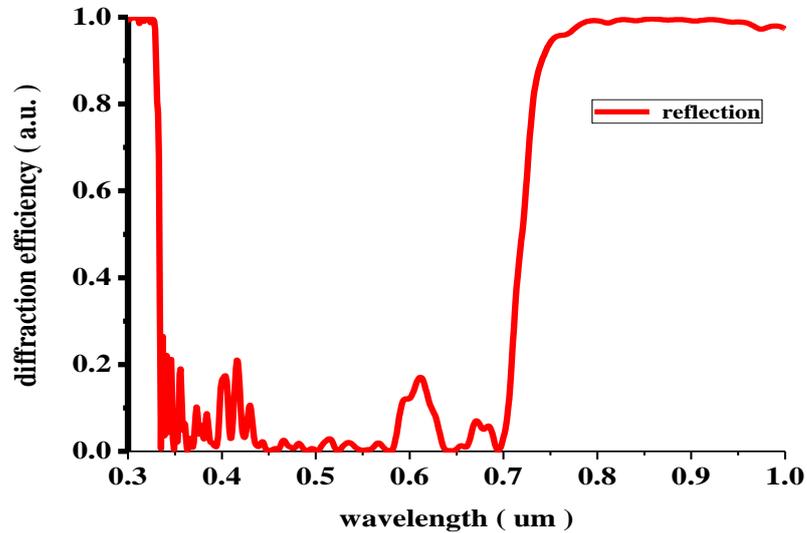


圖 9. RCWA 模擬真實材料折射率之反射光譜

參、主要發現與結論

我們可以藉由改變光柵的材料與形狀，由模擬軟體快速的得到不同之繞射光譜。當光柵的材料改變，因為材料折射率的不同，所以繞射出來的結果也會相對應的不一樣。我們利用光柵繞射來取得主要光波段的分光效果，再結合多層膜濾光片來清除不必要之雜訊，例如從先前所得到的濾波器反射率的頻譜，經過計算以後可以得到相對應的穿透頻譜，如圖 10 所示。因此適當的利用截止濾光片和光柵的搭配，我們可以試著得到特定的窄光頻譜，架構如圖 11 所示。

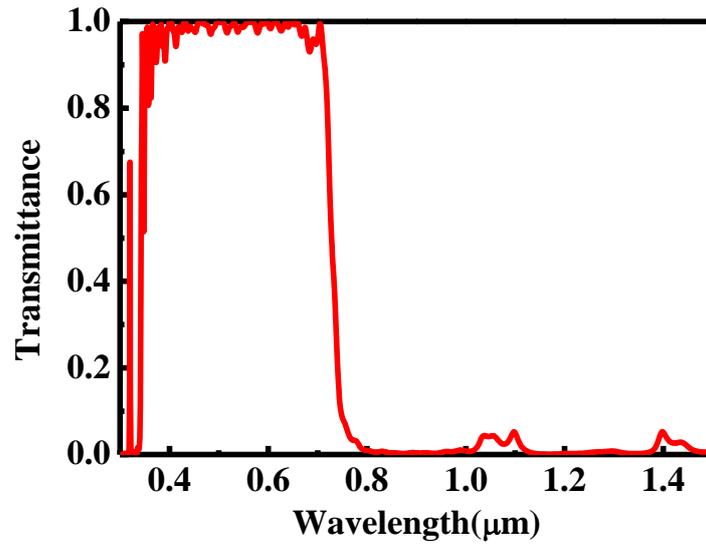


圖 10. 具有可見光穿透效果的濾波器之穿透頻譜

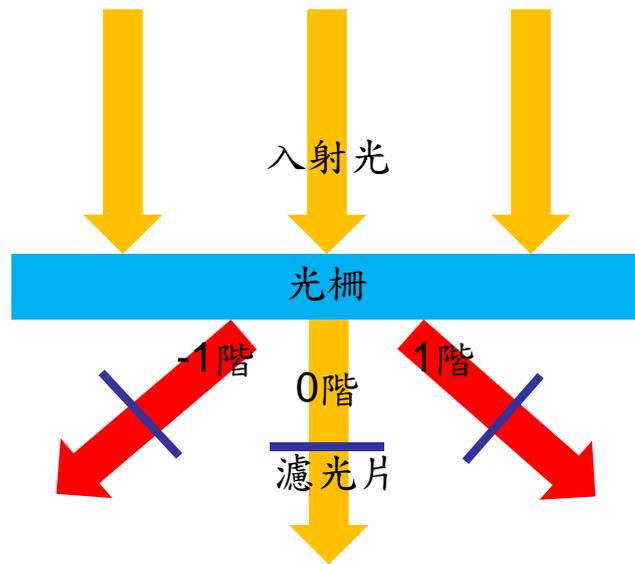


圖 11. 光柵分光搭配濾波片示意圖

一、特定光譜分光

(一) 萃取 0.38um~0.45um 頻譜

利用二氧化矽做為光柵材料，當光柵結構為三角錐狀時，光柵周期為 0.7um、高度 1.5um、直徑 0.25um，經光柵繞射可得零階穿透光譜在 0.38um~0.45um 與 1um~1.5um 光波段有高透射率，如圖

12(a)所示。再搭配上圖 10 可見光帶通濾光片來濾除長波段的光波長，即可得到短波長藍紫光頻譜(0.38um~0.45um)，如圖 12(b)所示。

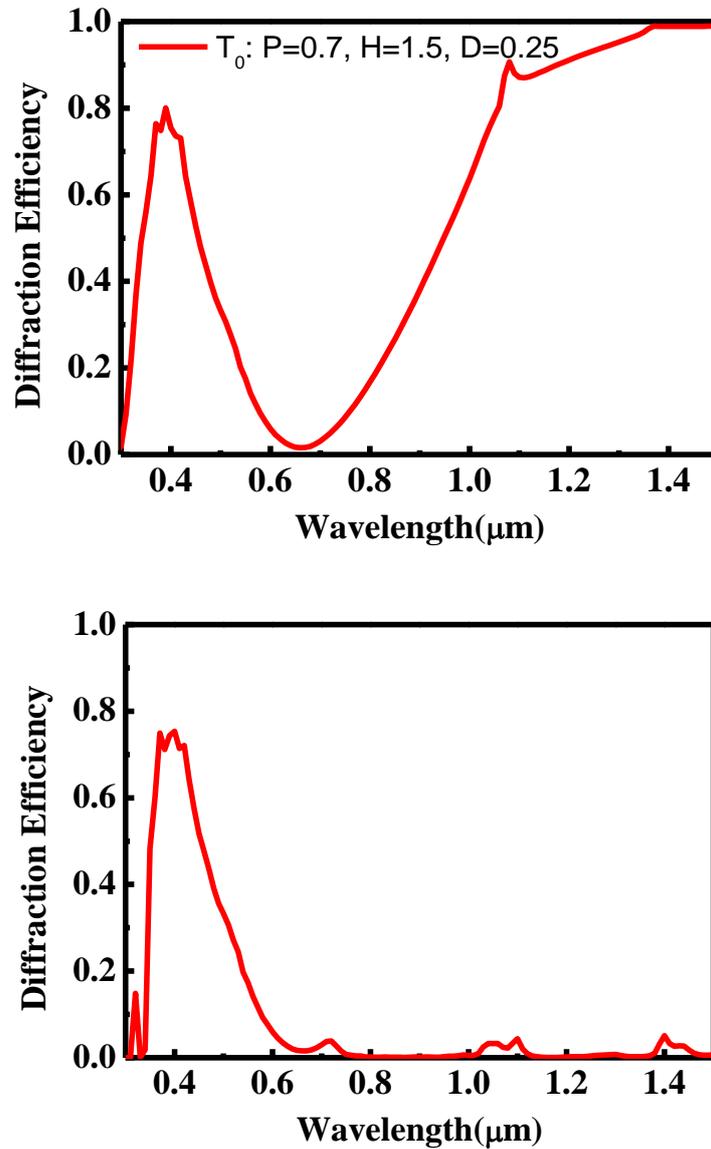


圖 12. (a)結構參數 $P=0.7, H=1.5, D=0.25\mu\text{m}$ 下 0 階的繞射光譜 (b)光柵加濾波器後的穿透頻譜

(二) 萃取 0.44um~0.55um 頻譜

如果我們將光柵的形狀改為蛋型，並利用二氧化矽做為光柵材料，

將光柵周期設定為 $0.9\mu\text{m}$ 、高度為 $1.5\mu\text{m}$ 、直徑為 $0.25\mu\text{m}$ ，經光柵繞射後的零階穿透光譜在 $0.44\mu\text{m}\sim 0.55\mu\text{m}$ 有一個很高的峰值，另外在紅外光波段(波長大於 $1.3\mu\text{m}$)也有很高的穿透率，如圖 13(a) 所示。在搭配上前述所設計出來的可見光帶通濾波器(圖 10)來濾除長波段的光線，即可保留完整的短波長藍綠色光頻譜如圖 13(b) 所示。

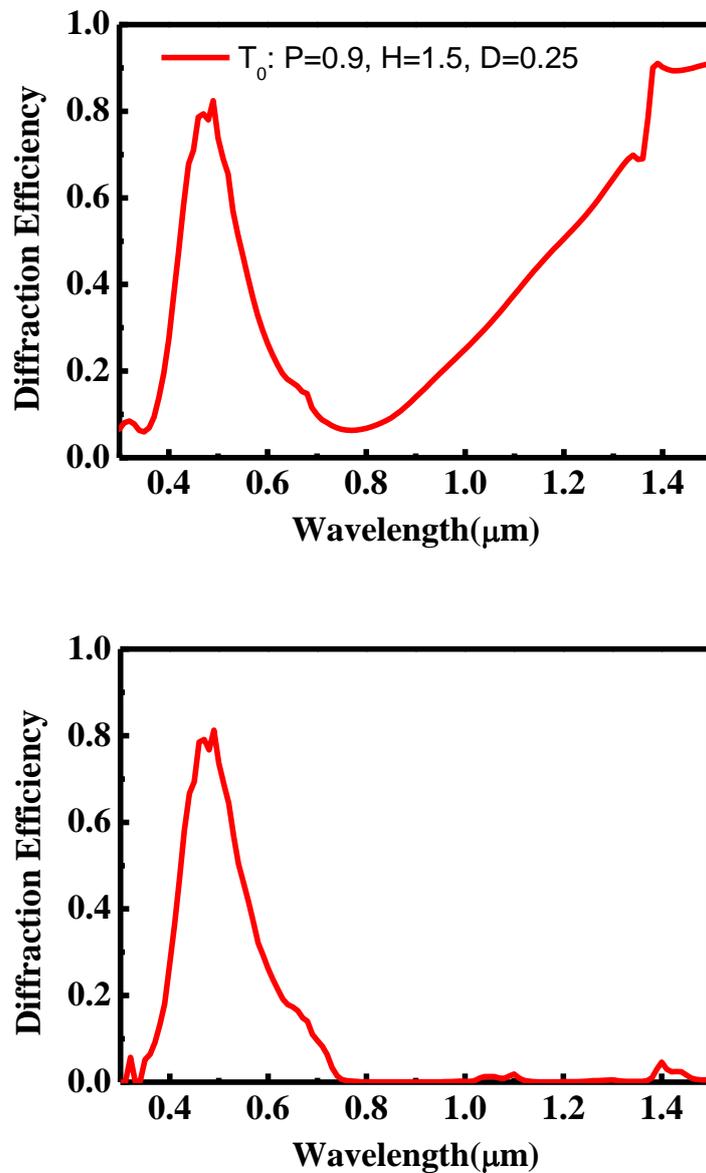
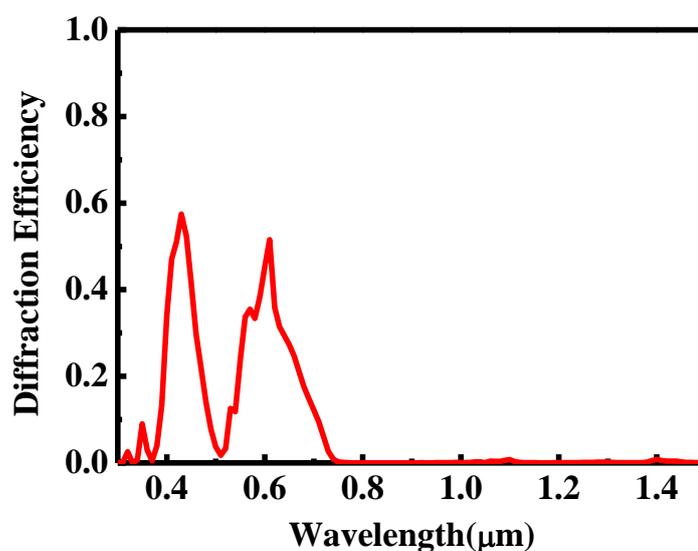


圖 13. (a)結構參數 $P=0.9, H=1.5, D=0.25\mu\text{m}$ 下 0 階的繞射光譜 (b)光柵加濾波器後的穿透頻譜

(三) 分離”綠光”與”藍光和紅光”頻譜

進一步我們將光柵的材料改為氮化矽(SiNx)，而光柵的形狀設定在三角錐狀，將光柵周期設定為 0.7 μm 、高度為 1.5 μm 、直徑為 0.25 μm ，經此光柵繞射後可發現一個有趣的現象，在搭配上可見光帶通濾波器後-1 階的繞射光線保留了除了綠光以外的所有可見光，如圖 14(a)所示，而在通過濾波器後的-2 階繞射光線則只有綠光存在其中，如圖 14(b)。由此材料製作而成的三角錐狀光柵只要參數控制得宜則可將”綠光”與”藍光和紅光”有效的分離，並可妥善利用可見光中的每一個波長光線。



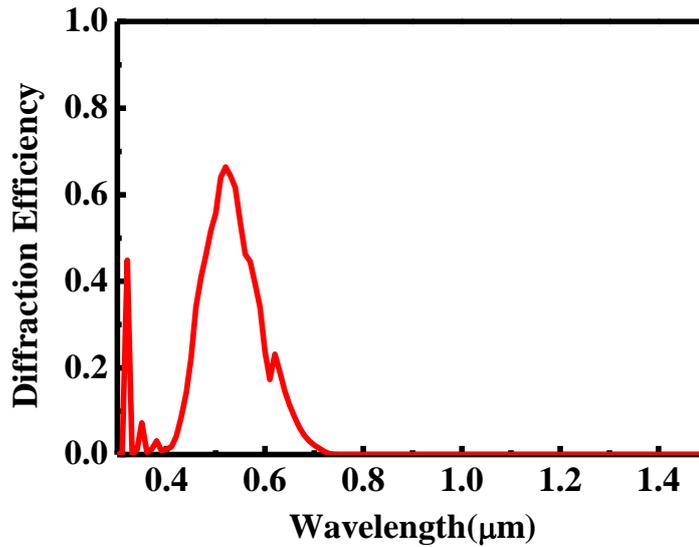


圖 14. (a)光柵之-1階繞射光再經過濾波器後所得之頻譜 (b) 光柵之-2階繞射光再經過濾波器後所得之頻譜

(四) 萃取 0.6um~0.68um 頻譜

最後，我們為了分離出紅光頻譜，使用了材料為氮化矽(SiN_x)的光柵，而光柵型狀為柱狀結構，光柵參數為：週期=0.8um、高度=1.41um、直徑為 0.25um，在-1階繞射光下可得到一個頻譜偏長波段的繞射光譜，如圖 15(a)所示。同樣的在加上可見光帶通濾波器後，可得圖 15(b)之頻譜，此方法可成功分離波長大於 0.6um 的可見光，並且具有大於 70%以上的繞射效率。

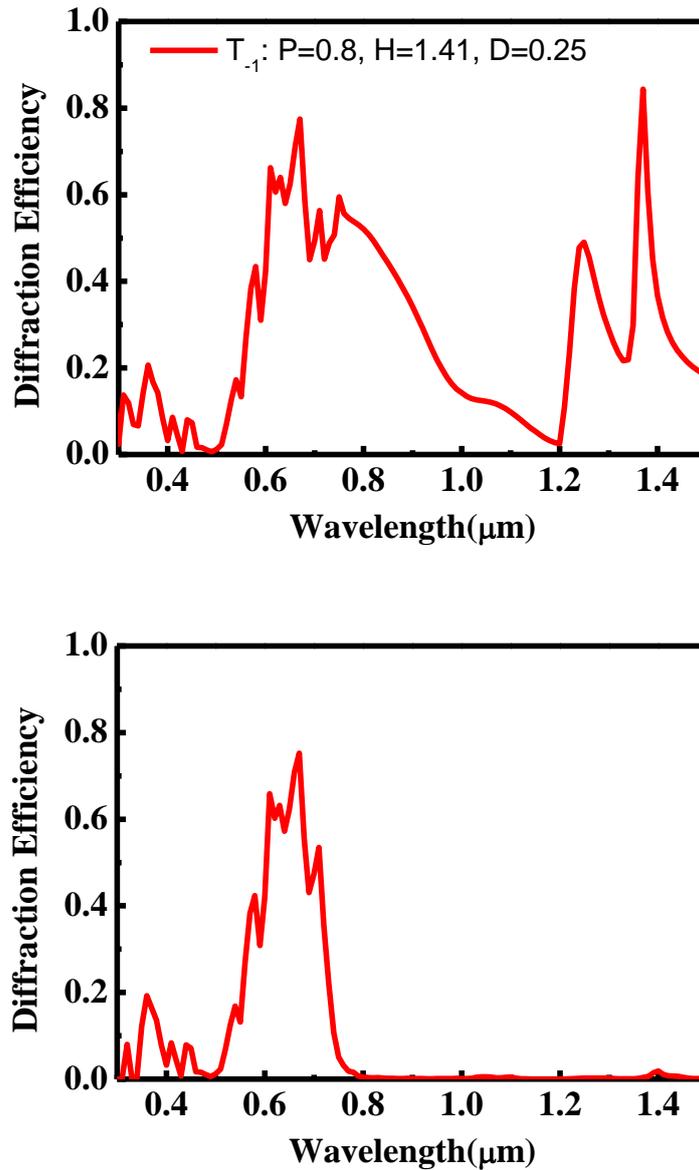


圖 15. (a)結構參數 $P=0.8$, $H=1.41$, $D=0.25\mu\text{m}$ 下-1 階的繞射光譜 (b)光柵加濾波器後的穿透頻譜

二、 結論

使用光柵來對光頻譜加以分光，因繞射式光柵光學元件，具有對波長變化靈敏度高、高繞射效率和低吸收的特性，可同時有聚焦、濾波、空間分光的功能。因此我們選用傳統光柵作為我們設計上的基礎，並藉由 RSoft 的模擬找出能精確繞射出所需波段的光柵

結構。最重要的是利用光柵分光可以使穿透的光波段因繞射而產生角度上的變化，與單純利用濾光片來遮擋穿透光波段相比其具有更高的使用率，而不會浪費光能，且可達到同時多波段分光。在我們的設計中，濾波片只用來做波段優化的修正，因已是繞射後的部分分光，所以縱使利用濾波片遮光也只是少部分的損失。唯一要注意的是利用濾光片濾光必須在正向入射時才会有最大的效果，角度的變化將導致濾光波段的偏移。

肆、參考文獻

1. 劉庭瑋, “太陽光譜分光器之設計,” 中央大學光機電工程研究所碩士論文
2. 刘华, 卢振武, 朱瑞, 张洪鑫, “聚光光伏系统的发展及未来趋势,” 中国光学与应用光学, Vol. 1, No. 1, 2008.
3. A.G. Imenes and D.R. Mills, “Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review,” *Solar Energy Materials & Solar Cells* 84 (2004) 19–69
4. Sinae Kim, Fuminori Takahashi, Shunsuke Kasashima, Porponth. Sichanugrist T. Kobayashi, T. Nakada and M. Konagai, “Development of Thin-Film Solar Cells Using Solar Spectrum Splitting Technique,” *The 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2012.
5. Deming Zhang, Michael Gordon, Juan M. Russo, Shelby Vorndran, Matthew Escarra, Harry Atwater and Raymond K. Kostuk, “Reflection hologram solar spectrum-splitting filters,” *SPIE 8468, High and Low Concentrator Systems for Solar Electric Applications VII*, 846807 (October 10, 2012); doi:10.1117/12.929187
6. Yuan Zhao, Ming-Yu Sheng, Wei-Xi Zhou, Yan Shen, E. T. Hu, J. B. Chen, Ming Xu, Yu-Xiang Zheng, Young-Pak Lee, David W. Lynch and Liang-Yao Chen, “Study of spectrum-splitting solar photovoltaic system,” *SPIE 8065, SPIE Eco-Photonics 2011: Sustainable Design, Manufacturing, and Engineering Workforce Education for a Green Future*, 806507 (April 19, 2011); doi:10.1117/12.882907
7. Allen Barnett, Douglas Kirkpatrick, Christiana Honsberg, Duncan Moore, Mark Wanlass, Keith Emery, Richard Schwartz, Dave Carlson, Stuart Bowden, Dan Aiken, Allen Gray, Sarah Kurtz, Larry Kazmerski, Tom Moriarty, Myles Steiner, Jeffery Gray, Tom Davenport, Roger Buelow, Laszlo Takacs, Narkis Shatz, John Bortz, Omkar Jani, Keith

Goossen, Fouad Kiamilev, Alan Doolittle, Ian Ferguson, Blair Unger, Greg Schmidt, Eric Christensen, David Salzman, “MILESTONES TOWARD 50% EFFICIENT SOLAR CELL MODULES,” the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference Milan, Italy, 3 September 2007.

8. Xiaoting Wang and Allen Barnett, “ONE LATERAL SPECTRUM SPLITTING CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC ARCHITECTURE: MEASUREMENTS OF CURRENT ASSEMBLIES AND ANALYSIS OF PATHWAYS TO 40% EFFICIENT MODULES,” Photovoltaic Specialists, IEEE Conference - PVSC , pp. 002745-002750, 2010.
9. Xiaoting Wang, Nick Waite, Paola Murcia, Keith Emery, Myles Steiner, Fouad Kiamilev, Keith Goossen, Christiana Honsberg and Allen Barnett, “Lateral spectrum splitting concentrator photovoltaics: direct measurement of component and submodule efficiency,” Progress in Photovoltaics: Research and Applications Volume 20, Issue 2, pages 149–165, March 2012.