

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

太陽光奈米分光技術研發
Development of solar spectrum-dividing technology

計畫編號：1032001INER022

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：李朱育

聯絡電話：03-4267307

E-mail address：juyilee@ncu.edu.tw

核研所聯絡人員：李家銘

報告日期：103年12月17日

目錄

目錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	1
作者與所屬單位.....	1
壹、計畫緣起與目的.....	2
貳、研究方法與過程.....	3
一、全像光學元件特性與應用.....	3
(一)特性與應用.....	3
(二)感光材料類型.....	4
二、耦合波理論.....	5
(一)穿透式體積型全像片.....	5
(二)反射式體積型全像片.....	6
三、短波長拍攝長波長重建技術.....	7
四、全像元件之參數模擬.....	8
(一)拍攝架構參數建立與模擬.....	8
(二)多張單次曝光全像元件堆疊模擬.....	11
五、實驗架構.....	13
(一)全像元件拍攝架構.....	13
(二)全像元件重建架構.....	15
參、主要發現與結論.....	18
一、單次曝光全像分光元件.....	18
二、堆疊單次曝光全像分光元件.....	19
三、結論.....	21
肆、參考文獻.....	23

中文摘要

本計畫目標在設計一種能將太陽光譜中的可見光與紅外光波段在空間上分開的元件。該元件可應用於太陽能電池與太陽光照明系統。一般而言，紅外光波段的照射會降低矽晶太陽能電池的光電轉換效率與壽命；室內照明則需避免因紅外光波段導入室內所造成的溫度上升及人體危害等問題。鑑於此，本計畫採用全像照相技術，開發出一種可將紅外光波段從太陽光譜中分開之體積型全像元件。實驗結果顯示，已成功達到計畫預期之目標。

Abstract

The aim of this project is to design a spectrum-dividing device to separate infrared from the solar spectrum for the applications to photovoltaics and solar lighting. For the silicon solar cell, the low conversion efficiency and a short life-time are mainly caused by unnecessary thermal of infrared. The indoor temperature will be increased and may injure human body due to thermal of infrared in solar illumination system. In order to solve these problems, we proposed a method which can separate solar spectrum into infrared and visible parts by holographic technique. According to our experimental results, the objective of this project has been carried out.

作者與所屬單位

李朱育 韋安琪 林俊廷 洪珮芳

中央大學機械系，台灣，桃園縣中壢市中大路 300 號

壹、計畫緣起與目的

太陽光的光譜包含了紫外光、可見光與紅外光等波段，是一種取之不盡的乾淨能源。在石化燃料日漸匱乏的趨勢下，太陽能的應用則一項重要的能源選擇，於是太陽能電池與光照明系統成為近年致力發展的目標。然而，光譜中的紅外波段，會對光伏電池及照明系統造成不良的影響；以矽晶太陽能電池而言，若晶片表面長期受到光譜中的紅外光波段照射，不僅降低光電轉換效率，更會減少電池使用壽命[1]；太陽光照明系統方面，若紅外光波段被導入室內，容易造成室內空間中的溫度持續上升且可能會對人體皮膚造成危害[2]。

為了改善太陽能電池與太陽光照明系統因紅外光波段所造成的負面效應，過去曾有許多學者提出分光技術，如光學鍍膜[3]，雖然成功達到頻譜分光的效果，但製程設備昂貴且過程繁複；另一方面，全像術製作分光元件[4]，其擁有重量輕、體積小、製作過程簡單等特點，尤其運用在頻譜分光上有很好的繞射效率，為具發展潛力之太陽能分光元件。

本計畫提出以全像製作技術實現一種能將可見光與紅外光波段在空間上分開之分光元件。研究上，將先運用 G-solver 模擬軟體找出全像光柵最佳的製作參數，接著利用多片單次曝光全像片之堆疊技術[5]，來增加繞射波段的譜線寬度及光線入射時的角度容忍度，以適用於太陽能電池或太陽能照明等系統，且實現具有高繞射效率及大角度容忍度之分光元件。

貳、研究方法與過程

一、全像光學元件特性與應用

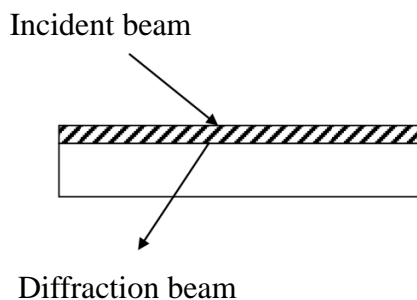
(一)特性與應用

1. 全像光學元件本質為布拉格繞射光柵(Bragg)[6]，因此其對波常變化較為靈敏。
2. 一般全像光學元件較常使用體積型相位光柵製作，因其具有高繞射效率和低能量損耗(吸收)等特性。體積型相位光柵即為體積型全像片(volume hologram)如圖 1 所示。由感光乳劑層和基板(塑膠或玻璃)所組成，其乳劑厚度通常介於數微米至數十微米之間。

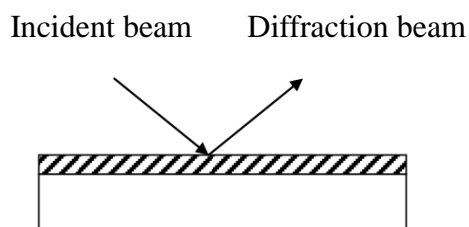


圖 1. 體積型全像片之組成

3. 依據體積型全像片繞射光之出射方向可分為穿透式和反射式。當入射光與繞射光在光柵兩側，即為穿透式(volume transmission hologram)(本研究所使用之類型)，如圖 2(a)；反之在光在同側即為反射式(volume reflection hologram)，如圖 2(b)。



(a) 穿透式體積型全像片



(b) 反射式體積型全像片

圖2. 體積型全像片之分類

4. 相較於傳統光學元件(conventional optical element), 全像光學元件可同時具有透鏡、分光、濾波之功能。若使用體積型全像片所製作之全像光學元件, 其具有高繞射效率、大光學孔徑、低成本和易於製作與複製之優點。
5. 利用耦合波理論之 K-向量圖(K-vector diagram)的幾何關係可設計出不同全像光學元件。體積型全像片的製作一般使用短波長拍攝長波長重建之技術。
6. 綜合上述特點, 全像光學元件之應用包含: 布拉格反射面鏡、光學窄頻濾波、平面顯示器、複合式多功能元件、偏極選擇元件、波長區多分工/解多工元件、光學相位延遲片、光學扇出元件(分光、聚焦)、光學擴束器等。

(二)感光材料類型

1. 鹵化銀(Silver halide sensitized gelatin ; SHSG)

為早期最普遍使用之全像攝影紀錄材料, 其材料具有高感光性、感光範圍廣及感光速率快等特點, 但繞射效率不高為較嚴重之缺點。

2. 重鉻酸明膠(Dichromated gelatin ; DCG)

為目前最理想的感光材料, 其理論的繞射效率可高達 100%, 且同時具有下列特性:

- 調制折射率約可達到 0.08。
- 低吸收及低訊噪比。
- 對於波長小於綠光的光較靈敏。

- 製作較困難，必須在一定的溫度、濕度下，精確控制厚度、硬度、含水量等參數。

3. 光聚合物(Photopolymer)

原為液態，但在曝光烘乾後會變為固化，其具有下列優缺點：

- 不必經過顯定影程序。
- 較佳的解析度(僅次於鹵化銀)。
- 液狀不易拍攝，且來源取得不易。

全像分光元件製作最重要的要求即為繞射效率，故本計畫選用重鉻酸明膠做為元件之製作材料。

二、耦合波理論

光柵之繞射現象必須以光的波動性理論來解釋。耦合波理論[6]為 H. Kogelnik 於 1969 年所提出，此理論以 Maxwell 波動方程式為出發，在幾個物理假設的條件下：

- 忽略光柵邊緣的繞射效率。
- 考慮入射光與一階繞射光之間能量幾乎是沒有變化的。
- 僅考慮入射光與一階繞射光耦合之結果。

即可獲得適用於穿透式和反射式之厚全像光柵的平面波繞射效率理論解，其為研製體積行全像片有效的分析工具。

(一) 穿透式體積型全像片

在鄰近布拉格條件下，穿透式體積型全像片的繞射效率可表示為[7]：

$$\eta_t = \frac{\sin^2\left(\sqrt{\xi^2 + \nu^2}\right)}{1 + \xi^2/\nu^2} \quad (1)$$

其中

$$\nu = \nu_s = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda_d (\cos \theta_{t1} \cos \theta_{t2})^{1/2}} \quad (\text{for s polarization}) \quad (2)$$

$$\nu = \nu_p = \nu_s \cos(\theta_{t2} - \theta_{t1}) \quad (\text{for p polarization}) \quad (3)$$

$$\xi = \frac{\Delta \theta \cdot K_R d \sin(\phi - \theta_{t1})}{2 \cos \theta_{t2}} = \frac{-\Delta \lambda_d \cdot K_R^2 d}{8 \pi n \cos \theta_{t2}} \quad (4)$$

若偏移量為零($\xi = 0$)，則方程式(1)可簡化為：

$$\eta_t = \sin^2 \nu \quad (5)$$

(二)反射式體積型全像片

在鄰近布拉格條件下，穿透式體積型全像片的繞射效率可表示為[8]：

$$\eta_r = \frac{1}{1 + \frac{1 - \xi^2 / \nu^2}{\sinh^2(\nu^2 - \xi^2)^{1/2}}} \quad (6)$$

$$\nu = \nu_s = \frac{i \pi \Delta n d}{\lambda_d (\cos \theta_{r1} \cos \theta_{r2})^{1/2}} \quad (\text{for s polarization}) \quad (7)$$

$$\nu = \nu_p = \nu_s \cos(\theta_{r2} - \theta_{r1}) \quad (\text{for p polarization}) \quad (8)$$

$$\xi = \frac{\Delta \theta \cdot K_R d \sin(\phi - \theta_{r1})}{2 \cos \theta_{r2}} = \frac{\Delta \lambda_d \cdot K_R^2 d}{8 \pi n \cos \theta_{r1}} \quad (9)$$

若偏移量為零($\xi = 0$)，則方程式(1)可簡化為：

$$\eta_r = \tanh^2 \nu \quad (10)$$

其中下標 s 和 p 分別表示 s 偏光與 p 偏光； ξ 為失調因子(detuning factor)， ν 為耦合係數(coupling coefficient)， $\theta_{t1}(\theta_{r1})$ 和 $\theta_{t2}(\theta_{r2})$ 分別代表穿透式(反射式)體積型全像片之重建光入射角度與繞射光繞射角度， K_R 為光柵向量模數， $\Delta \theta$ 為重建光入射角度偏移量，

ϕ 為光柵傾角， Δn 為總調制折射率， n 為乳劑材料在空氣下之折射率， d 為光柵厚度， $\Delta\lambda_d$ 為繞射光中心波長 λ_d 之偏移量。

三、短波長拍攝長波長重建技術

體積型全像片是以 Bragg 繞射理論為基礎，並在滿足 Bragg 條件下所產生之繞射現象。藉由此特點，我們可以利用耦合波理論之 K-向量圖的幾何關係估算全像光柵拍攝與重建之 Bragg 條件，亦表示我們可以使用不同於重建光之波長來曝光並進行全像光學元件的製作。此技術可易於全像片拍攝之幾何架構的建立以及解決感光材料在較波長不易感光之問題。

如圖 3 所示，為不考慮乳劑收縮和平均折射率的改變，使用短波長拍攝長波長重建之 K-向量的幾何關係。其中 K_{C1} 、 K_{C2} 為記錄全像光柵之參考光與物體光的傳導向量(propagation vector)，所記錄之光柵波向量為 K ，而 K_{r1} 、 K_{r2} 分別為重建光與繞射物體光之傳波向量。假設圖 3 中的重建光波長為 950nm 且為垂直入射，其所需之繞射角度為 40 度，當記錄選擇波長為 532nm 之綠光，利用 K-向量之幾何關係可計算得到兩道紀錄光 θ_{r1} 和 θ_{r2} 之拍攝角度分別為 7 度和 31 度。由此我們亦可瞭解，在固定角度下，使用不同波長製作全像光學元件，較短波長具有較密的光柵間距；對於固定的光柵向量以不同的波長重建，較長波長具有較大的繞射角。

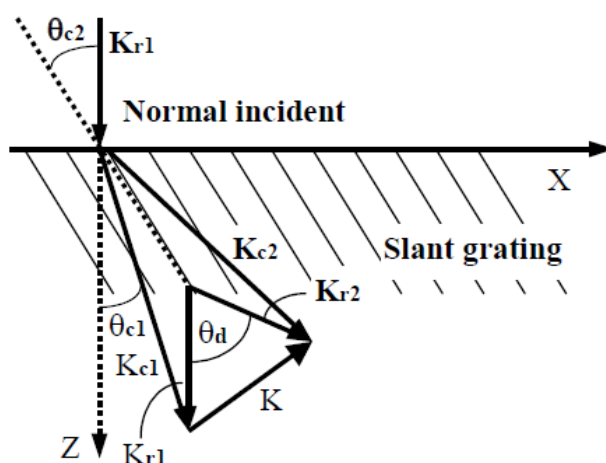


圖3. 短波長拍攝長波長重建之 K-向量幾何關係

四、全像元件之參數模擬

首先，利用模擬軟體進行參數之設計，藉由軟體可預先得知全像光柵於製作時可能會發生之問題並提前改善；接著使用光路架構進行全像光柵之拍攝，並於完成後，進行繞射效率之量測。

(一)拍攝架構參數建立與模擬

根據耦合波理論，各參數如感光乳劑厚度、光柵向量模數、調制折射率、重建光入射角度與繞射光繞射角度及繞射光中心波長偏移量等，皆會影響全像光學元件拍攝結果。

- 乳劑層厚度
- 繞射中心波長
- 重建光入射角度
- 繞射光繞射角度

1. 調制折射率

調制折射率變化是因為感光乳劑層在單位面積內所接受之曝光能量不同所控制，且此值無法經由計算須從多次實驗結果獲得，且值的變化會直接影響全像光學元件之繞射效率。依據公式

(1)和(6)可得知，繞射效率需考慮兩不同偏極光。如圖 4 所示，在參數設置上，設計繞射中心波長為 750nm、重建光角度為垂直入射、繞射光之繞射角度為 30 度，可明顯看出 S 偏光與 P 偏光具有不同的繞射效率曲線，由於本研究需同時考慮兩偏極光，故 0.022 為最佳之調制折射率選擇。

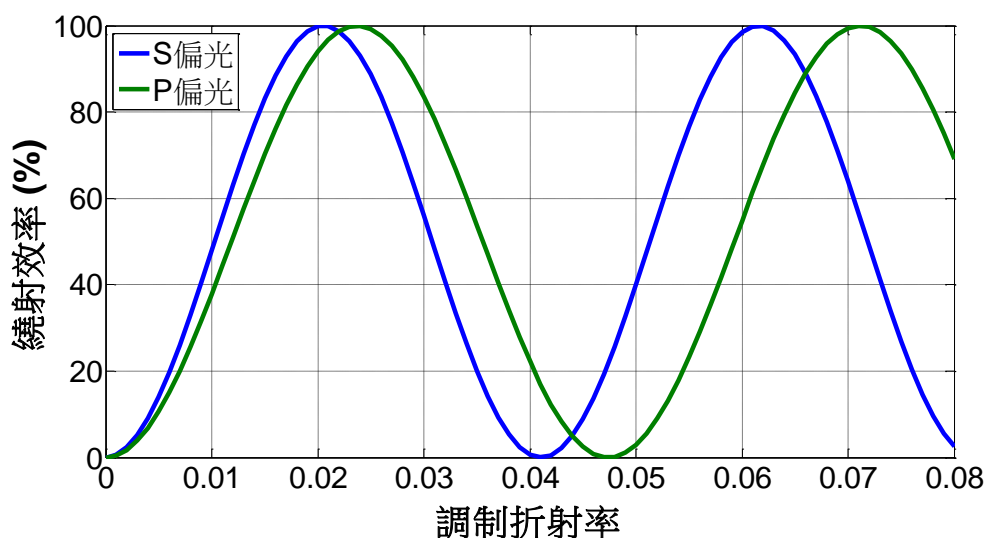


圖4. S 偏光與 P 偏光之繞射效率對調製折射率作圖

2. 光學架構與光路

K -向量圖中的光柵向量模數 K_R 之決定是基於紀錄於乳劑層上的光柵週期，而光柵週期的變化則是依據兩道紀錄光與全像片法線之夾角，其中角度變化可調制全像元件的繞射中心波長、頻寬等結果。在相同參數條件下(繞射中心波長為 750nm、重建光角度為垂直入射、繞射光之繞射角度為 30 度)，選擇 0.022 做為此全像元件之調制折射率，其繞射效率曲線如圖 5，其繞射效率達 98.7%。利用模擬軟體即可預先設計多種不同參數下之全像分光元件，其結果可做為未來製作全像元件參考，且有助於計畫之進行。

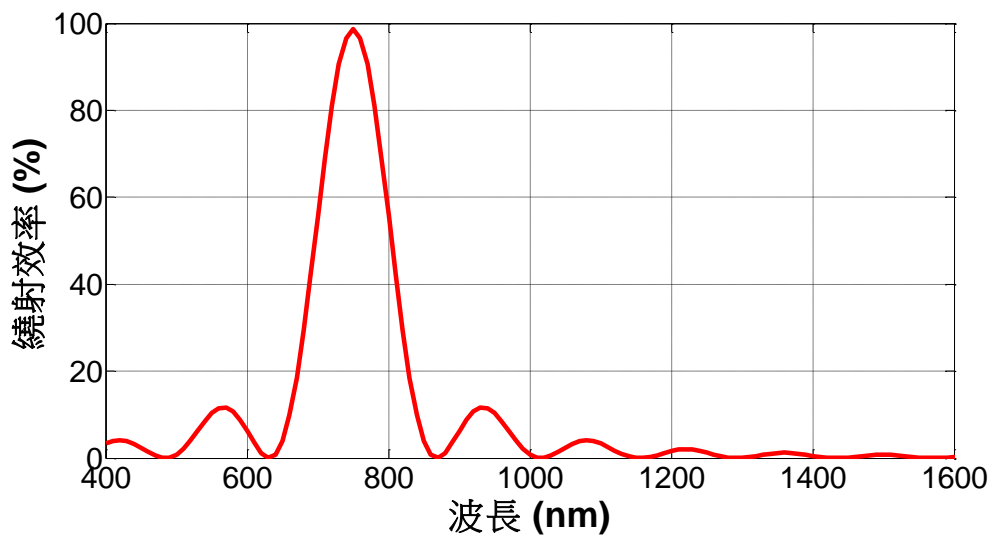


圖5. 模擬繞射中心波長為 750nm 之全像分光元件

3. 角度容忍度

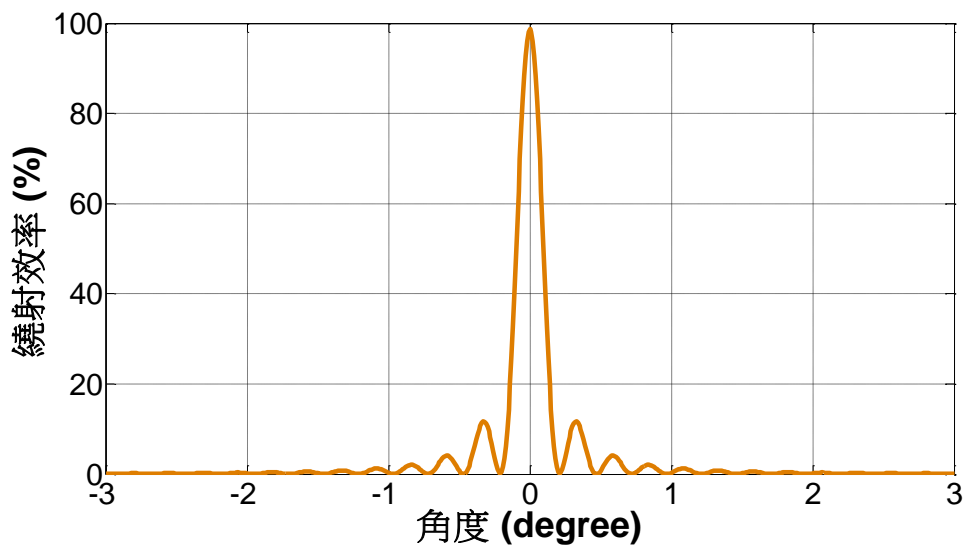


圖6. 全像光學元件對於重建光入射之角度容忍度變化

考慮在太陽能系統中，太陽光會依照四季、晝夜的不同，其日照的角度也會有所改變，而全像光學元件對於角度變化較為靈敏(Bragg 條件)，故在設計上須將全像片重建光入射之角度容忍度加入考量。圖 6 表示出在相同條件下之全像光柵(繞射中心波長為

750nm、重建光角度為垂直入射、繞射光之繞射角度為 30 度)，其對於重建光入射角度可接受範圍僅不到正負 1 度，由此可見，角度容忍度也是本研究重要課題之一。

(二)多張單次曝光全像元件堆疊模擬

為了設計一種擁有將可見光與紅外光分開能力之全像光學元件，本計畫預計利用堆疊技術[8]進行製作。堆疊即是利用多張單次曝光且繞射效率佳的全像分光元件層層堆疊，其示意圖如圖 7(a)~(b)，當寬波段之太陽光入射單層全像分光元件，如圖 7(a)，波長為 λ_1 的光會被繞射出，其餘波長光線直進；若堆疊兩層如圖 7(b)，波長 λ_1 及 λ_2 的光則同時會被繞開，其餘波長光線繼續直進；以此類推，若堆疊 N 層之全像分光元件如圖 7(c)，就會有 N 個不同波長的光同時被繞射開來。根據各組全像分光元件穿透與繞射之關係，即可得出堆疊多片單次曝光全像分光元件之繞射效率公式：

$$\eta_{t,stacked} = a_1 + a_2 + a_3 + \dots \quad (11)$$

其中 $a_1 = \eta_{t,1}$ 、 $a_2 = (1 - a_1) \cdot \eta_{t,2}$ 、 $a_3 = (1 - a_2) \cdot \eta_{t,3}$ 、 \dots 以此類推。

依據太陽能光譜在海平面上分布情形(圖 8)，我們利用耦合波理論公式設計並模擬三組不同繞射中心波長之光柵(G_1 、 G_2 、 G_3)如圖 9(a)，其繞射中心波長分別為 750nm、1000nm 及 1250nm，圖 9(b)則是利用公式(11)計算結果所繪製出的三組全像光柵堆疊後之繞射頻譜。

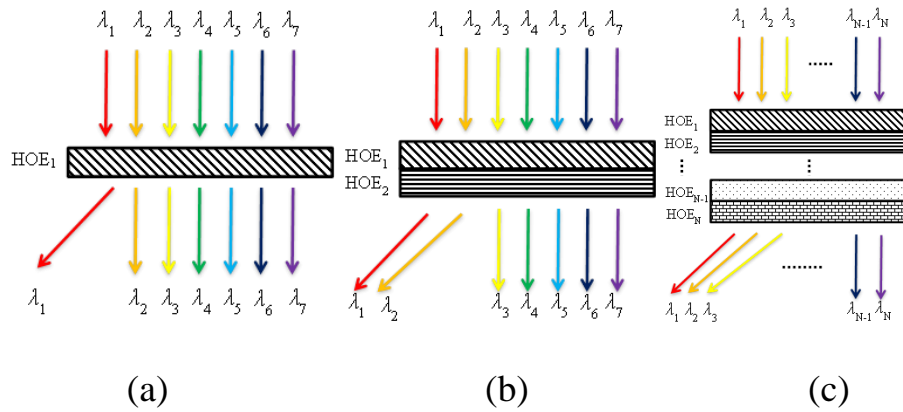


圖7. 不同繞射中心波長之全像分光元件堆疊示意圖

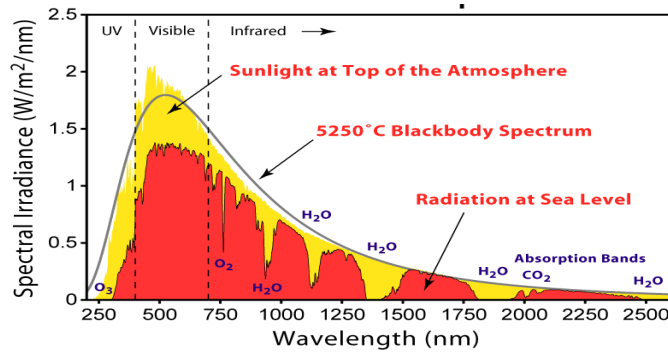


圖8. 太陽光譜分布[取自

<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E5%85%89>]

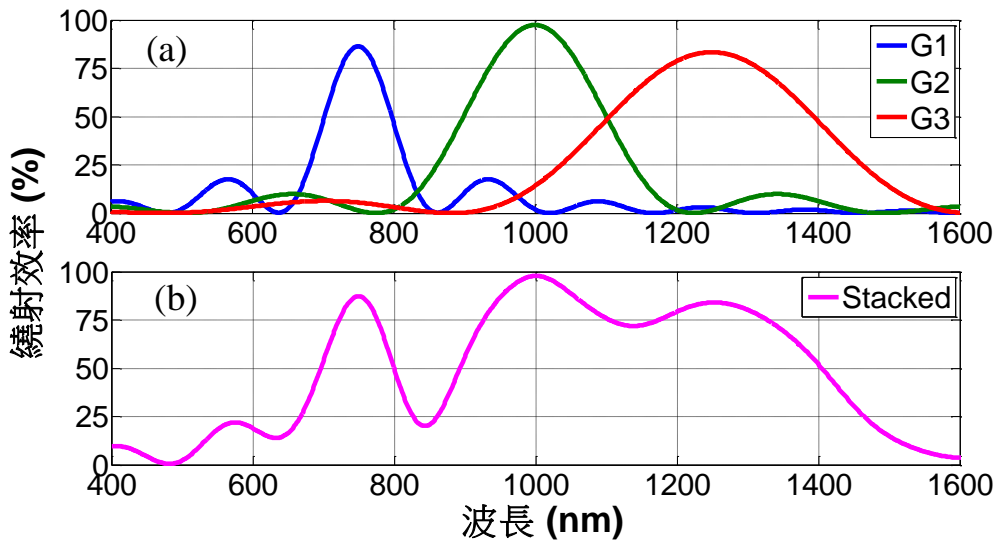


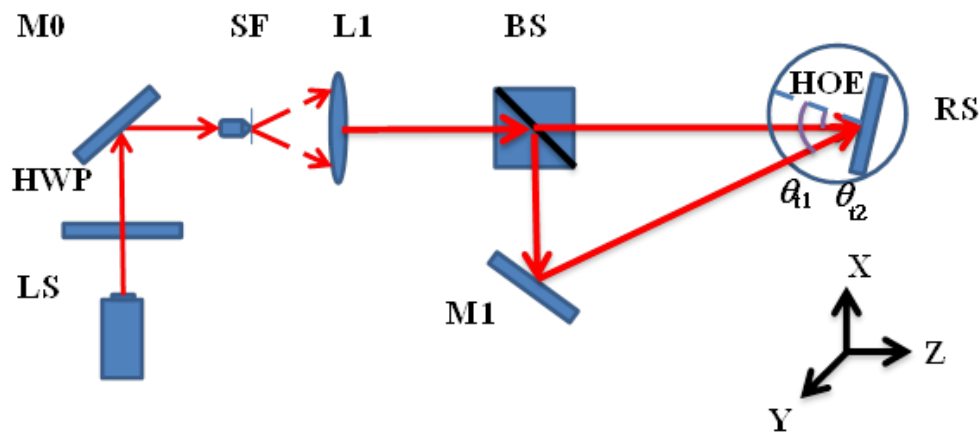
圖9. (a)三組不同繞射中心波長全像光柵之繞射頻譜模擬結果 (b) 三張全像光柵堆疊之繞射頻譜分布模擬結果

五、實驗架構

(一)全像元件拍攝架構

1. 拍攝架構

圖 10(a)為穿透式體積型全像片拍攝架構示意圖，圖 10(b)為實際全像元件拍攝之系統架構、圖 10(c)為全像片架及控制拍攝角度之精密旋轉平台。本計畫選用功率為 100mw 波長為 532nm 之 DPSS 作為雷射光源 LS，一開始先通過二分之一波片 HWP 以確保偏振態的一致，經由反射鏡 M0，使光入射至空間濾波器 SF 並濾掉高頻雜訊，形成發散光，接著放置透鏡 L1 於焦平面上，使光轉為平行擴束光，並由分光鏡 BS 將平行擴束光分成兩道紀錄光(物光與參考光)，其中分開後的兩道光，一道直進(參考光)，另一道光(物光)藉由反射鏡 M1 反射，並於最後確保兩道光已準確重疊於放置全像片的位置上(HOE)，其中，旋轉平台 RS 的放置是為了能控制兩道紀錄光入射至全像片之角度(θ_{t1} 、 θ_{t2})，進而達到控制全像分光元件之繞射中心波長。



(a)

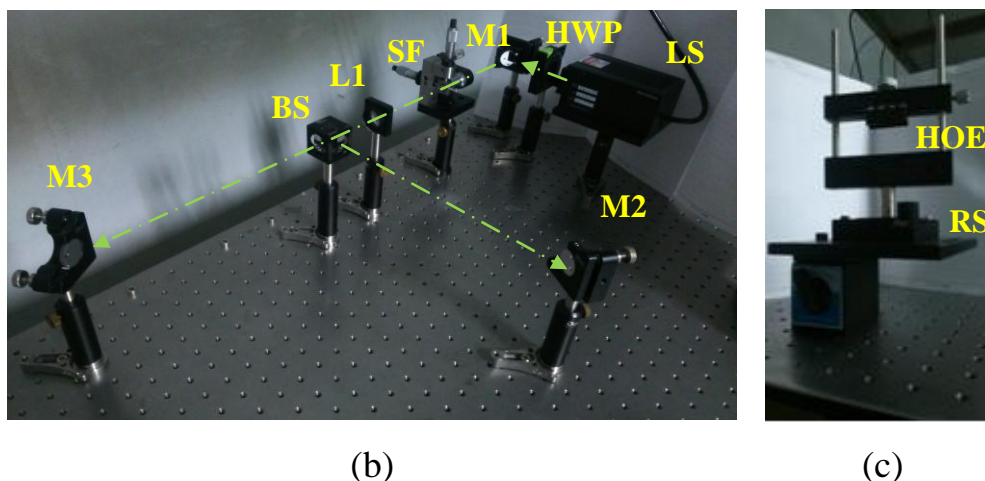


圖10. (a)穿透式體積型全像片拍攝架構示意圖(b)全像片拍攝架構
(c)全像片架及精密旋轉平台

2. 全像材料選用與顯定影流程

本計畫所使用的全像片型號為 PFG-04(Slavich)，其感光乳劑材料為重鉻酸明膠(DCG)，厚度也較接近體積型全像片之要求，其相關規格如下表 1：

表1: 全像元件材料相關規格

型號	PFG-04
感光乳劑材料	重鉻酸明膠
是用雷射波段	457nm、488nm、514.5nm
乳劑膜厚	16~17 μ m
玻璃基材厚度	約 2mm
繞射效率(MAX)	>70%
保存期限	12 個月

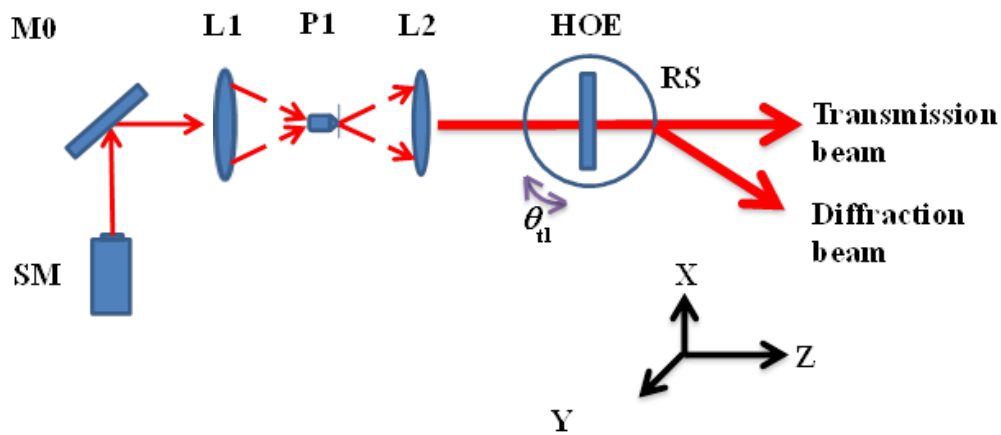
另外，重鉻酸明膠，也有其自己一套全像片的顯定影流程。在沖洗全像片時，需在暗房且無塵的環境下進行，防止外界光源對全像片造成二次曝光與外界雜質造成全像片之破壞，其中，藥劑調配的精準和沖洗手法的優劣皆會影響全像元件之繞射效率，依據其沖洗流程，下表 2：

表2: 全像元件之顯定影流程

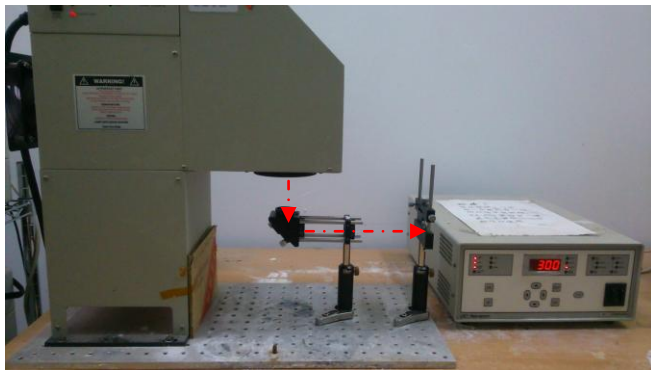
顯定影流程	時間
熱硬化(烘箱 100°C)	約 1 小時
冷卻至室溫	約 10 分鐘
浸泡(流動的去離子水)	約 3 分鐘
浸泡(50%異丙醇)	約 3 分鐘
浸泡(75%異丙醇)	約 3 分鐘
浸泡(100%異丙醇)	約 3 分鐘
乾燥(烘箱 100°C)	約 1 小時
光學膠貼合	

(二)全像元件重建架構

圖 11(a)及(b)分別顯示重架構示意圖與實際架構圖，是利用太陽光模擬器 SM 做為重建光源，藉由雙透鏡系統(L1、L2、P1)將發散光源轉為準直平行光，並將光源入射全像元件 HOE 即可觀察穿透與繞射現象，精密選轉平台 RS(THORLAB 型號 PRM1-Z7)可控制入射全像元件之重建光角度，達到元件對於入射光之角度容忍度的探討，另外，我們使用頻譜分析儀(JASCO-V-670)如圖 11(c)來進行全像片重建後的繞射波段與繞射效率的頻譜量測。



(a)



(b)



(c)

圖11. (a)利用太陽光模擬器進行全像元件重建之示意圖 (b)全像片重建架構 (c)頻譜分析儀(JASCO, V-670)

依據耦合波理論，當不考慮全像片之吸收值時，藉由公式(12)即可推得全像片的繞射頻譜分布情形，其中 $\text{spectrum}(\text{HOE})$ 與 $\text{spectrum}(0)$ 分別代表全像元件上有紀錄光柵之穿透值與未紀錄光柵之穿透值，如圖 12 所示。經由兩次穿透值的量測，即可無視玻璃基板所造成的穿透、反射等現象，僅單純探討光線穿透全像片乳劑層的頻譜分布情形，其結果即可驗證可見光與紅外光波段在空間上是否能經由全像光學元件達到分開。

$$DE\% \equiv \frac{\text{spectrum (0)} - \text{spectrum (HOE)}}{\text{spectrum (0)}} \quad (12)$$

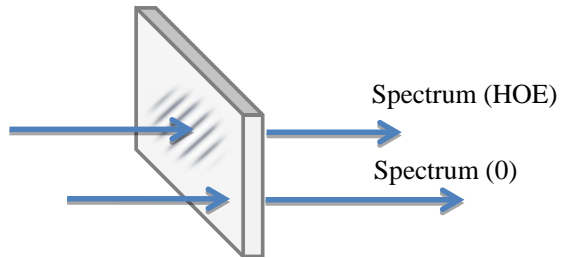
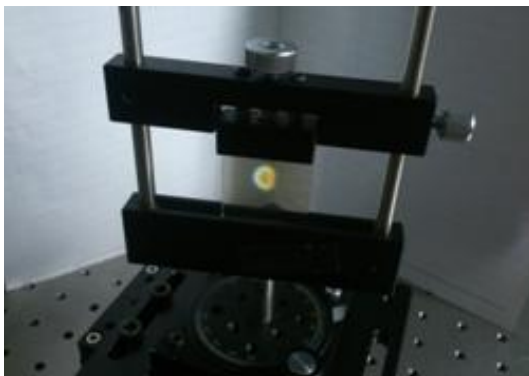


圖12. 全像元件有無紀錄光柵位置之穿透值量測示意圖

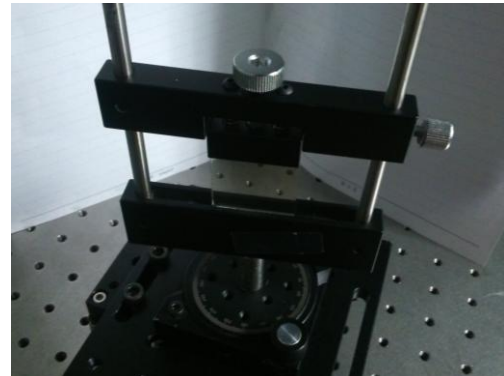
參、主要發現與結論

一、單次曝光全像分光元件

我們設計並製作了三張繞射繞射不同波段之全像光柵(G1、G2、G3)，其繞射中心波長分別為 750nm、1000nm 及 1250nm，圖 13(a)及(b)分別代表實作樣品(中心彩虹即為光柵紀錄處)及空白全像片，其各別三張全像分光元件之繞射頻譜分布如圖 14，其各自繞射效率分別為 65.8%, 80.4% 和 73.4%。



(a)



(b)

圖13. (a)全像光柵樣品(b)空白全像樣品

(b)

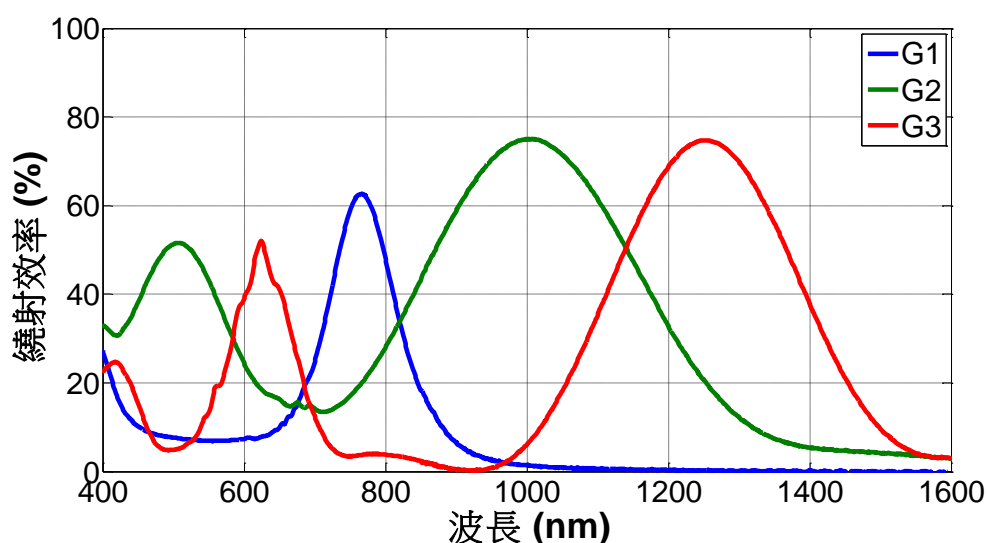


圖 14. 實驗拍攝三組不同繞射中心波長全像光柵之繞射頻譜

根據圖 14 之實驗結果可以進行下列幾點論述：

- 繞射效率分別為 65.8%, 80.4% 和 73.4%。其繞射效率有所差異是因為人為誤差所造成的(曝光時間的控制)。
- 繞射中心波長於倍頻處附近有二次諧波產生(375nm、500nm、625nm)，是因調制折射率或乳劑層材料厚度不足所造成的。多次實驗結果顯示，雖然可減少二次諧波的效率，但繞射中心波長之繞射效率連帶也會跟著降低[9]。
- 靠近 620~670nm 附近有非連續性頻譜分布是因為重鉻酸明膠在此波長範圍內會產生共振吸收[10]。

二、堆疊單次曝光全像分光元件

(1)重建光垂直入射

要達到寬波段的繞射頻譜，其入射全像光柵的順序需為繞射長波長(G3)至繞射短波長(G2、G1)。實驗堆疊結果如圖 15，其中紫線為實際光柵堆疊量測之結果，橘線為實際光柵藉由耦合波理

論及堆疊繞射效率運算之結果，可看出兩繞射譜線分佈趨勢接近，其主要差別在於人為誤差所造成的，且可見光波段雖仍部分被繞射出，但可明顯看出在紅外光波段(700nm~1600)之趨勢和模擬非常類似。

(2)重建光產生偏移

圖 16(a)為堆疊全像元件對於重建光入射角度容忍度之結果，藍線及紅線分別代表重建光為 $\pm 1^\circ$ 入射時之頻譜分布情形，可看出頻譜產生右移和左移之現象。我們量測不同重建光入射角度且僅考慮 1100nm 和 1300 nm 間之繞射效率平均值，描繪出此元件對於重建光入射之角度容忍度，如圖 16(b)所示，該結果顯示:角度容忍度約範圍為 $-4^\circ \sim +6^\circ$ 。

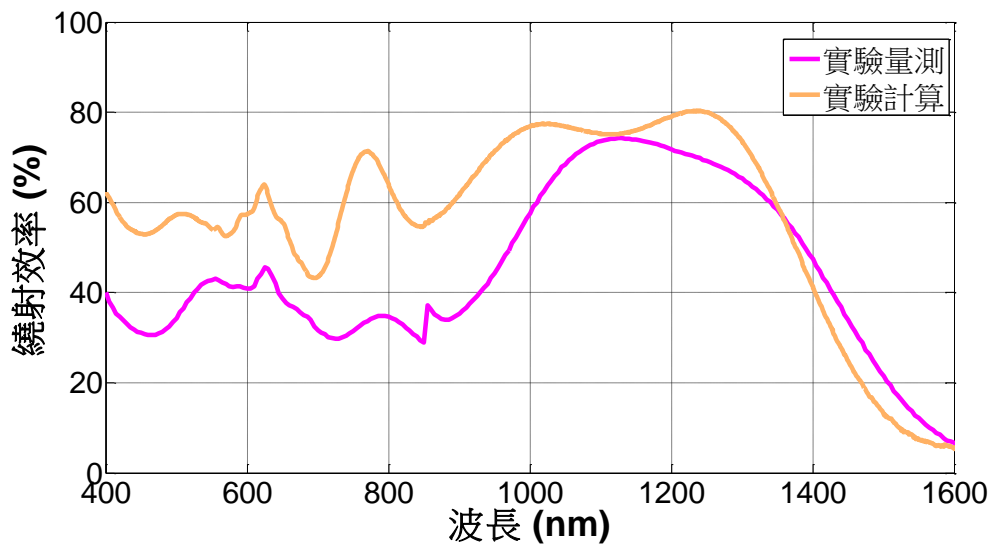
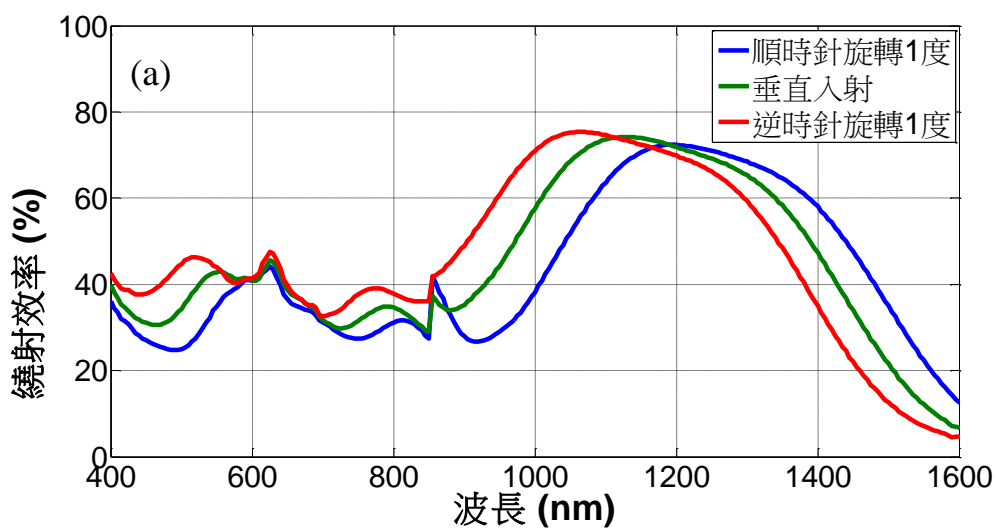
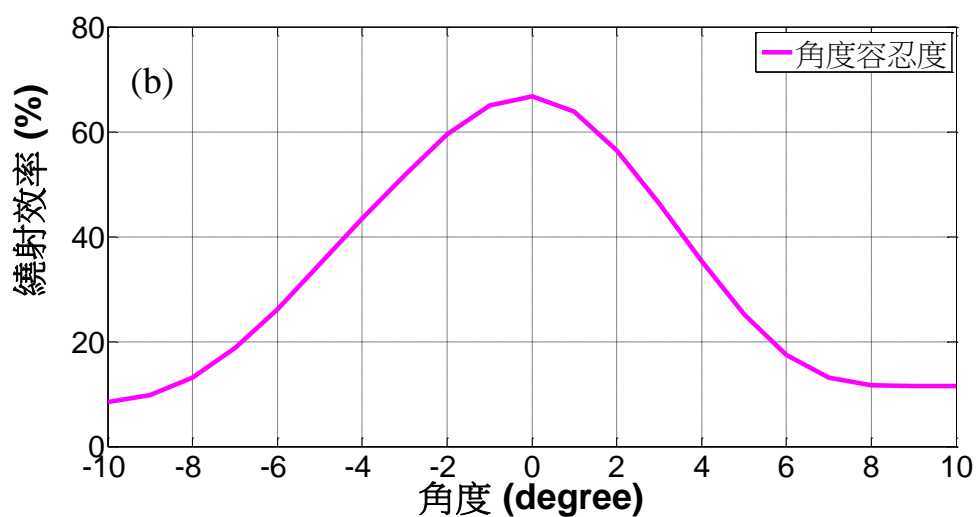


圖15. 全像光柵堆疊之結果(紫線為實驗結果，橘線為計算結果)



(a)



(b)

圖16. (a)當重建光角度產生偏移射之的總繞射效率分布 (b)全像分
光元件堆疊之角度容忍度

三、結論

目前較普遍使用之矽晶太陽能電池，其材料會因太陽光紅外波段之照射而產生熱效應，使電池的性能及壽命降低；太陽能室內照明則會因為紅外波段引入造成室內溫度上升。為了解決上述

紅外波段造成的問題，本計畫依據太陽光頻譜特性，利用全像片設計出一種擁有頻譜分光且大角度容忍度之元件，以將太陽光頻譜之紅外波段分離。實驗時，設計並製作三組不同繞射中心波長之光柵，並將其堆疊。量測結果顯示，其繞射頻譜擁有寬譜線之特性且繞射效率達 70%，角度容忍度範圍為約 $\pm 4^\circ$ 。由此可預見，當太陽光入射全像分光元件時，其直進光線內的紅外光波段僅存不多，已成功達到預期之目標。

誌謝

本研究為行政院原子能委員會核能研究所編號 1032001INR022 之計畫，因核能研究所之支持，使研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

肆、參考文獻

- [1] Z. Xingli, and S. Zhaowei “Effects of vacancy structural defects on the thermal conductivity of silicon thin films” Journal of Semiconductors, Vol. 32, No. 5(053002), pp, 1-4.
- [2] C. A. Balaras, “The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods”, Energy and Buildings, Vol. 24, pp. 1-10, 1996.
- [3] C. Heine, R. H. Morf, and M. T. Gale, “Coated submicron gratings for broadband antireflection in solar energy applications”, Journal of Modern Optics., Vol. 43, No. 7, pp. 1371-1377, 1996.
- [4] R. K. Kostuk, “Analysis and Design of Holographic Solar Concentrators”, Proc. of SPIE, Vol. 7043, no.70430I, pp.1-8, 2008.
- [5] H.D. Tholl, R. Kubiza, and C.G. Stojanoff, “Stacked volume holograms as light directing elements”, SPIE, Vol. 2255, pp. 486-496, 1994.
- [6] H. Kogelnik, “Coupled Wave Theory for Thick Hologram Grating”, Devoted to the Scientific and Engineering Aspect of Electrical Communication, Vol. 48, no.9, pp. 2909-2947, 1969.
- [7] 陳敬恆，「使用全像空間偏離偏極器之多埠光學循環器」，國立交通大學，博士論文，民國 93 年。
- [8] H.D. Tholl, R. Kubiza, and C.G. Stojanoff, “Stacked volume holograms as light directing elements”, SPIE, Vol. 2255, pp. 486-496, 1994.
- [9] S. K. Case, and R. Alferness, “Index Modulation and Spatial Harmonic Generation in Dichromated Gelatin Films”, Applied Physics, Vol. 10, pp. 41-51, 1976.
- [10] L.K. SU, S.T. HSUE, and S.Y. FENG, “Infinite Resolving Power of Holographic Spectroscopy”, Physics Letters, Vol. 53A, No. 2, pp. 177-179, 1975