

國立交通大學

理學院應用科技學程

碩士論文

多向式正弦光柵光控制薄膜

Multi-Directional Sinusoidal Grating As Light Control Film

研究生：陳信安

指導教授：黃乙白 教授

中華民國九十八年九月

多向式正弦光柵光控制薄膜

Multi-Directional Sinusoidal Grating As Light Control Film

研究生：陳信安

Student : Sin-An Chen

指導教授：黃乙白

Advisor : Yi-Pai Huang

國立交通大學

理學院應用科技學程

碩士論文

A Thesis

Submitted to Degree Program of Applied Science and Technology

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Degree Program of Applied Science and Technology

September 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年九月

多向式正弦光柵光控制薄膜

學生：陳信安

指導教授：黃乙白教授

國立交通大學應用科技學程碩士班

摘 要



本論文探討應用多向式正弦光柵於增強反射式液晶顯示器之亮度，正弦光柵的形成，是因為使用光阻紀錄雷射相互干涉時所產生的駐波條紋，干涉光譜的強度呈現正弦變化。若改變雷射光源干涉時所夾的角度，干涉條紋的間隔會跟著改變，由此可以得到不同的光柵頻率，另外透過旋轉承載基板的 ϕ 角，可以變化光柵的排列方向，透過妥善運用此二項變化參數，可以控制反射光到想要的方向。

Multi-Directional Sinusoidal Grating As Light Control Film

Student : Sin-An Chen

Advisors : Dr.Yi-Pai Huang

**Department of Degree Program of Applied Science and Technology
National Chiao Tung University**



This thesis is a study of multi-directional sinusoidal grating for the reflective liquid crystal display (R-LCD) brightness enhancement. The sinusoidal grating is fabricated by recording laser interference pattern on photoresist resin. The interference pattern is a sinusoidal type function. If we change the subtended angle of interfered laser intensity, the grating pitch are also changed. If we rotate the angle of substrate then we can change the orientation of grating. By properly mixing the grating pitch and orientation, we can control the reflected ambient light to desired direction.

誌 謝

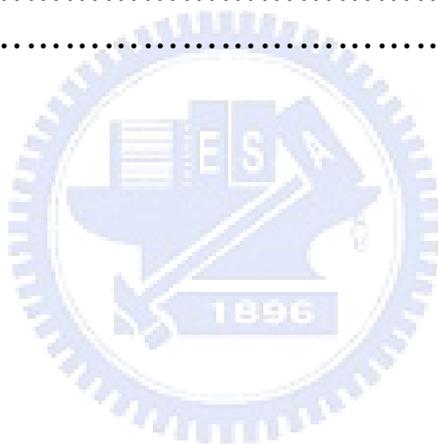
念在職研究所的時間感覺過的很快，二年一下子就過去了，期間除了上課以外，就是找資料做報告，到了後期必須做論文，因為已經把課都修的差不多了，二下只修一門課，有更多的時間可以把論文的實驗做上線實作；然而，因為是在職班的關係，實驗內容選擇與公司現有技術相關的產品來做，因此必須跟公司借機台來作論文的實驗，幸好公司採取開放的態度，願意提供機台來做非生產性的實驗，從而可以把光控制薄膜製作出來，與此相關的同事並無從中獲得任何利益，純粹是義務的幫忙，關於此真的很感謝這些同事們！另外要感謝學校的同學跟老師們的付出，讓我可以增廣見聞，學習正確的待人處事的態度，在未來的工作上可以互相幫忙。



目 錄

中文提要	.....	i
英文提要	.....	ii
誌謝	.....	iii
目錄	.....	iv
圖表目錄	.....	v
一、	緒論.....	1
1.1	從薄型到超薄顯示器.....	1
1.1.1	背光模組.....	2
1.1.2	反射式顯示器.....	3
1.2	全像光柵.....	4
1.3	研究目標：運用全像光柵於反射式顯示器.....	5
1.3.1	光柵置於顯示器表層.....	6
1.3.2	光柵置於顯示器底部反射層.....	7
1.4	論文結構.....	8
二、	研究內容與方法.....	9
2.1.1	反射式膽固醇液晶顯示器光學原理.....	9
2.1.2	弗里斯涅爾定理.....	10
2.1.3	斯涅爾定理.....	11
2.2	全像光柵原理.....	12
2.2.1	向量繞射理論.....	13
2.2.2	正弦光柵的數學表示.....	14
2.2.3	全像光柵效率.....	20
三、	點矩陣全像光柵製作.....	22
3.1	點矩陣全像技術.....	22
3.2	全像點陣列製作流程.....	24
3.3.1	點矩陣全像點陣列圖案 LCF-1.....	25
3.3.2	以光學顯微鏡觀察成品結構.....	26
3.3.3	以原子力顯微鏡觀察微結構.....	27
四、	多向光柵陣列之光學量測與分析.....	29
4.1.0	光度學定義.....	30
4.1.1	CONOSCOPE™(錐光偏振儀)簡介.....	31
4.1.2	Hitachi U4100 分光光譜儀簡介.....	32
4.2.1	藍色膽固醇液晶反射率量測.....	34
4.2.2	LCF-1 單體光學量測.....	36
4.2.3	LCF-1 背面為藍色膽固醇液晶的繞射現象.....	39
4.3.1	LCF-1 背面為藍色膽固醇液晶的+1 階繞射強度.....	40

4.3.2	與 Ag(銀)高反射膜貼上 LCF-1 比較·····	41
4.3.3	LCF-1 光學膜 30 度入射繞射效率模擬分析·····	42
4.3.4	LCF-1 光學量測與分析結果回顧·····	46
五、	改良 LCF-1 效率之光學模擬·····	47
5.1	ASAP™ 模擬軟體之引用·····	47
5.2.1	LCF-1 光學模型建構·····	48
5.2.2	LCF-1 模擬結果與實際繞射圖案比較·····	49
5.3	LCF-1 光柵外形與間隔對於一階繞射效率的影響··	51
5.4	複合式多光柵周期與方向之干涉點陣列·····	53
5.5	光學模擬後語·····	55
六、	結果討論與未來展望·····	56
6.1	正弦光柵低反射特性·····	56
6.2	光控制薄膜功能優劣因素·····	56
6.3	未來工作與展望·····	57
參考文獻	·····	59
附錄一	·····	61



圖表目錄

圖 1.1 背光模組結構示意圖	3
圖 1.2 反射式顯示器	4
圖 1.3 穿透式與反射式光柵	4
圖 1.4 全像光柵應用於民生用品	5
圖 1.5 正弦與矩形光柵	6
圖 1.6 膽固醇液晶顯示器	7
圖 1.7 光柵結構置於反射層	7
圖 2.1 膽固醇液晶結構與反射率	9
圖 2.2 弗里斯涅爾定理圖示	10
圖 2.3 折射現象	11
圖 2.4 全反射現象	11
圖 2.5 平面波干涉現象	12
圖 2.6 正弦光柵透射區與反射區	14
圖 2.7 正弦光柵分層切割	18
表 2.8 光柵繞射效率比較表	20
圖 2.9 光柵周期 1μ 深度 0.7μ 的可見光區反射率	21
圖 2.10 光柵周期 1μ 深度 1μ 的可見光區反射率	21
圖 3.1 干涉光路圖示	22

圖 3.2	光柵點圖示	23
圖 3.3	光柵膜片製作流程	24
圖 3.4	圓形光柵陣列	25
圖 3.5	光柵透射圖案	25
圖 3.6	光柵周期 vs 繞射角度	25
圖 3.7	干涉點陣列 100 倍放大	26
圖 3.8	干涉點陣列 500 倍放大	26
圖 3.9	接觸式原子力顯微儀	27
圖 3.10	NT-MDT 牌 NSG10 探針	27
圖 3.11	$10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 光柵表面圖	27
圖 3.12	光柵剖面深度變化	27
圖 3.13	$65 \times 65 \mu\text{m}^2$ 光柵表面圖	28
圖 4.1	光輻射強度量測	29
圖 4.2	幅射量計算圖	30
圖 4.3	CONOSCOPE™(錐光偏振儀)	31
圖 4.4	量測藍色膽固醇液晶貼 LCF-1 光發散角分布	32
圖 4.5	Hitachi U4100 分光光譜儀	32
圖 4.6	U4100 光路示意圖	33
圖 4.7	光路治具相關尺寸	33

表 4.8 量測治具之收光角	34
圖 4.9 Blue RCHLC 的光發散角分佈	35
圖 4.10 Blue RCHLC 的反射率	35
圖 4.11 LCF-1 穿透光波長 632.8nm 繞射強度分佈	36
圖 4.12 LCF-1 背面塗黑的反射光量測	37
圖 4.13 LCF-1 背面不塗黑的反射光量測	37
圖 4.14 LCF-1 的透射光量測	38
圖 4.15 LCF-1 穿透與反射百分率	38
圖 4.16 LCF-1+RCHLC 於實體空間之光發散圖	39
圖 4.17 RCHLC 貼 LCF-1 的光分佈	39
圖 4.18 光點強度	39
圖 4.19 LCF-1 貼於 RCHLC	40
圖 4.20 膽固醇液晶 vs Ag 5 度貼膜比較	41
圖 4.21 450nm 30° 入射之光路圖示	42
表 4.22 LCF-1 背面 R100% 高反射的正向一階繞射效率計算	43
圖 4.23 模擬分析 30° 反射之一階繞射光強度 vs 光柵深度	44
圖 4.25 Ag(R94%) + LCF-1 30° 反射光譜	44
圖 4.24 5° 擴散膜/LCF-1/鋁反射膜	45
圖 4.26 光柵深度 v. s 反射光+1 階繞射效率	46

圖 5.1	半球形光分佈模擬	48
圖 5.2	LCF-1 圓形光柵點陣列模擬圖示	48
圖 5.3	光柵重疊區產生之繞射光點	49
圖 5.4	LCF-1 的 0 度穿透繞射圖	50
圖 5.5	LCF-1 的 0 度反射繞射圖	50
圖 5.6	LCF-1 的 30 度反射繞射圖	50
圖 5.7	光柵點陣列間隔變化	51
圖 5.8	光柵點間距模擬條件設定	51
圖 5.9	550nm 0° 一階繞射光點分佈圖	52
表 5.10	LCF-1 改變光柵形狀與光柵點間隔對於一階繞射強度的影響	52
圖 5.11	1~1.3 μ ; -20°~20° 複合式光柵模擬圖	53
圖 5.12	多向光柵的 30° 入射繞射模擬	54
圖 6.1	光柵深度漸變式干涉點陣列	58

第一章 緒論

電子紙具有替代紙張的用途。目前發展出的反射式膽固醇液晶顯示器 (Reflective Cholesteric Liquid Crystal Display) 及電子顏料 (E-Ink) 皆具有雙穩態特性，僅於翻頁時需要消耗電力，光源來自環境照明，即使在大太陽底下，亦可清楚閱讀；當環境光不足時，則不利於分辨圖文，因此若能提高反射率或光利用率，即可增加反射式電子書的可讀性。

1.1 從薄型到超薄顯示器

市面上的顯示器，從手機的 1 吋螢幕到家庭劇院 60 吋大螢幕，有運用液晶、電漿、有機發光二極體或者場發射的薄型顯示器，或體積龐大的陰極射線管顯示器，經過國內外幾家大廠的全力發展，已經達到技術成熟期。關於未來顯示器的發展，許多人將目光放在發展更貼近人，更不佔空間，更便於收納，因此軟性顯示器的技術成為必然的方向。科幻電影中的高科技步兵，伸出手臂即可拉出一張電子地圖，馬上就可以判斷目前位置到目的地的方位距離。即時收納與運用，完全不佔空間的概念，結合無線傳輸與定位偵測等等功能的薄型個人數位助理或許在不久的未來，相關的研究可以實現此一科技產品。

顯示器發出人眼可以感知從波長 400 到 700 奈米的光線，視覺經由光

線刺激感色及感光細胞產生電子訊號，傳達視網膜的影像至大腦加以判斷，從而認知眼前的物體的幾何形狀。電子資訊顯示器運用電場控制光開關的大小，改變光的明暗變化，若搭配相對應的濾光片染色，可以顯示特定顏色的光。例如紅色的染料，便是吸收了藍色跟綠色而只允許紅色光通過。每一個畫面經過數位訊號調變，變成由色彩坐標組成的陣列，以 XGA 解析度為例，共有 1024 x 768 個畫素需要顯示；光源的取得有數種方式：

(1) 背光源 (2) 自發光 (3) 前光源。

1.1.1 背光模組(Back Light Module)

顧名思義，光源位於影像(Image)的後方。一個典型符合高均勻度、高效率的背光模組，通常具有：

1. 光源：冷陰極燈管(CCFL)、發光二極體(LED)
2. 導光板：壓克力(PMMA)、聚碳酸酯(PC)
3. 擴散膜(Diffuser Film)
4. 增亮膜(Brightness Enhancement Film)

液晶顯示器的背光模組，通常具有 1~3mm 厚度的導光板，表面製作擴散點以破壞全反射，使光朝導光板正面射出，再經過擴散膜均勻化光的分佈，及菱鏡片(增亮膜)的導正光的方向，使大角度散失的光集中到小角度的範圍，之後若要需要更均勻化光的分佈，會再貼一層擴散膜。背光模組的設計重點一般為：(1)高亮度(2)高均勻度(3)結構輕薄簡單。關於背光模組的

設計，運用光學追跡軟體模擬分析，以現在的電腦運算能力，都可以很快的得到答案，再搭配雷射加工機快速雕刻，實際測試結果與模擬結果比對。

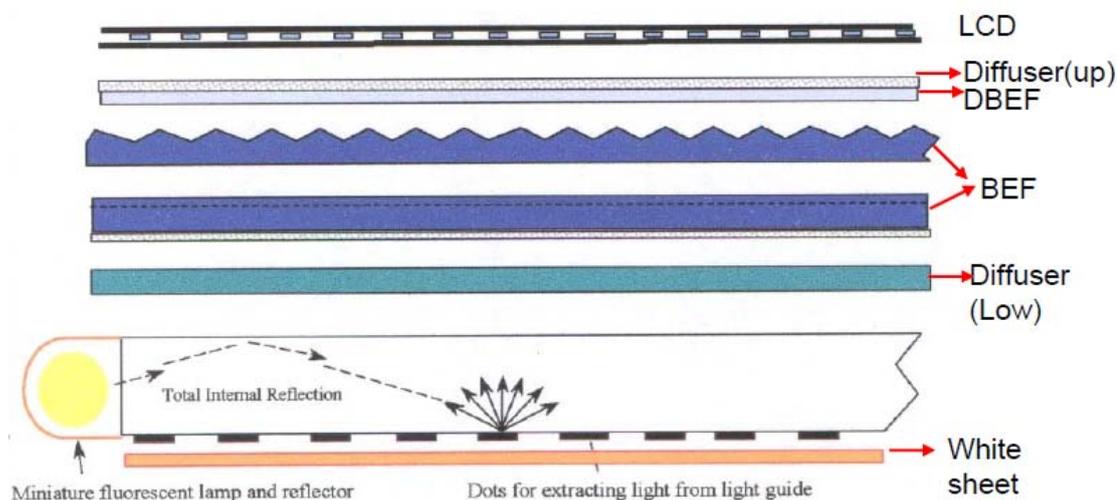


圖 1.1 背光模組結構示意圖

1.1.2 反射式顯示器

光源位於影像(Image)的前方；一般均定義為環境光源。會運用到前光源的顯示器有：

(1) 半穿透半反射液晶顯示器

- 反射式顯示器
- 文書、報紙、雜誌

其中，完全運用環境光源或在某些無法使用電力的場所，或不希望消耗過多電力，如賣場的價格標籤、電子書、大型廣告招牌、悠遊卡的剩餘點數的顯示等等，藉由使用周遭的光源，即普遍使用反射式顯示器，在解析度、彩度、對比、應答速度上，已可滿足使用者的基本閱讀需求。

關於前光源控制薄膜的研究，目的即是為了改善反射式顯示器的光利用效率，採用的方法為在光學膜表面製作光柵結構，改變光的傳播方向。

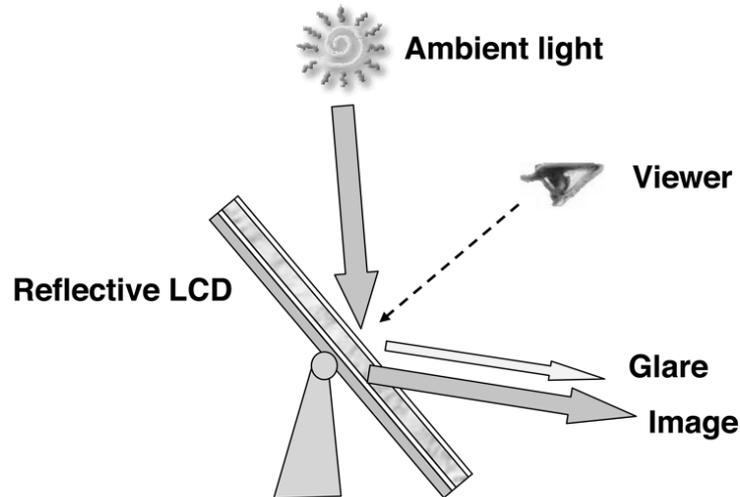


圖 1.2 反射式顯示器

1.2 全像光柵

以光阻材料記錄雷射光干涉的條紋製作而成的全像光柵元件，其剖面之起伏的特性呈現正弦函數週期變化，相對於以機械刻劃的鋸齒狀或以半導體製程蝕刻的柱狀光柵結構，具有低散射的特性。

一般的光柵元件可以分為：

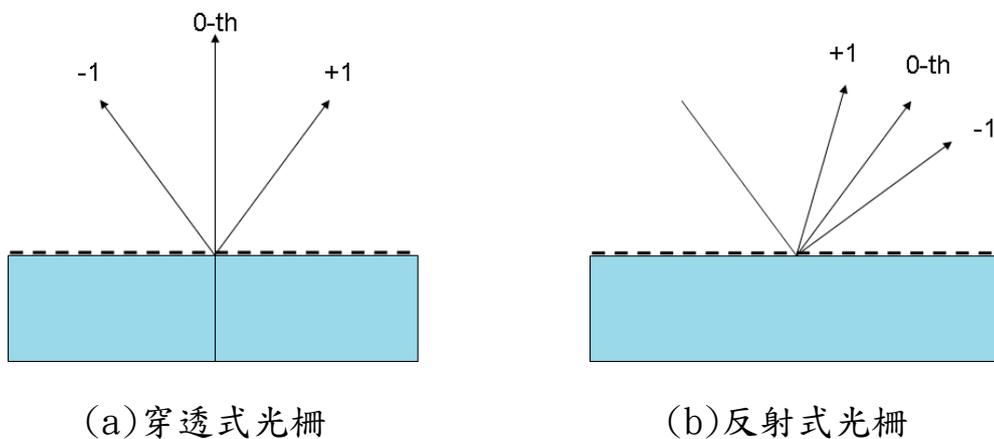


圖 1.3 穿透式與反射式光柵

全像光柵常用於：(1)全像立體圖攝影(2)點矩陣全像圖(3)防偽標誌(4)光通訊(5)光碟讀取頭。為一發展十分成熟的雷射加工之微光學技術，若能將此一技術引入至成為顯示器的光學元件，其需求量將非常大，比如抗反射(Anti-Reflection)、防眩光(Anti-glare)、聚光片(Prism-BEF)、擴散片(Diffuser)、彩色濾光片(Color-filter)等等^[1~8]；只要能充分運用光柵的分光、合光、分色等等特點，再應用光柵模擬軟體並整合照明追蹤軟體，將光柵元件建構於上述的光學系統，並製作樣品實際測試效果，將可開啟光柵元件的大量應用範疇。

1.3 研究目標：運用全像光柵於反射式顯示器

全像光柵廣泛運用於標籤紙、包裝紙、防偽記號等等日常用品；符合製程簡單及大量製造的優點，並且在各種環境下仍能閃耀彩虹般的光芒。為了使光照射在光柵之後可以有高的反射，會在背面鍍上一層鋁反射層。



圖 1.4 全像光柵應用於民生用品

彩虹現象的成因源自於光柵分光的效應：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 + m \frac{\lambda}{d} \quad (1.1)$$

光柵的形式可以是各種形狀的表面起伏，一般多為二維平面的周期排列；入射光照射於光柵時，繞射到第 m 階的光量與表面的形狀、深度有關，而繞

射的角度僅與光柵條間距 d 及入射光波長 λ 有關。

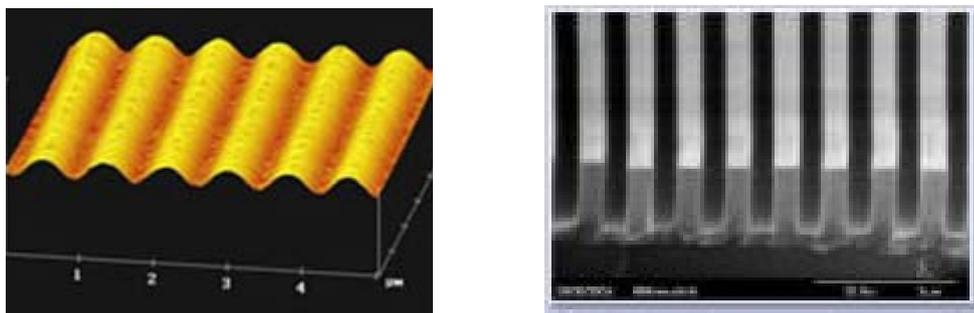


圖 1.5 正弦與矩形光柵

常見的微奈米轉印技術有(1)熱壓奈米轉印(Hot Embossing Nanoimprint Lithography)(2)紫外光硬化奈米轉印(UV-cured Nanoimprint Lithography)(3)可撓性奈米轉印技術(Soft Lithography)，搭配滾筒壓印製程技術，以 Roll-To-Roll 的方式大量製造。若僅需小量的生產，採用平板壓印即可。在本論文中使用的技術為(2)紫外光硬化奈米轉印。

1.3.1 光柵置於顯示器表層

光柵導光膜貼附於膽固醇顯示器表層，適用於反射式膽固醇液晶顯示器(反射率=30%)或電子顏料顯示器(反射率=40%)，此時光柵膜需設計為：(1)防眩光(2)導光(3)低色散(4)消 Moiré。其中，在暗態時入射光被顯示器吸收，貼於顯示器表面的光學膜反射光或眩光須越低越好，亮態時入射光被顯示器反射，光學膜導正大角度的反射光至正面。關於光柵色散現象的減低，參考^[5]所使用的方法，以多種光柵條紋及光柵方向的陣列混合編排。Moiré 條紋的間隔 D 與顯示器畫素的空間頻率 P 有關，若選擇光柵陣列之

空間頻率為 $0.1P$ ，則 $D = P / (1 - 0.1)$ ，因此當選擇的光柵頻率遠低於畫素的頻率時，Moiré 條紋的影響可以減到最低。

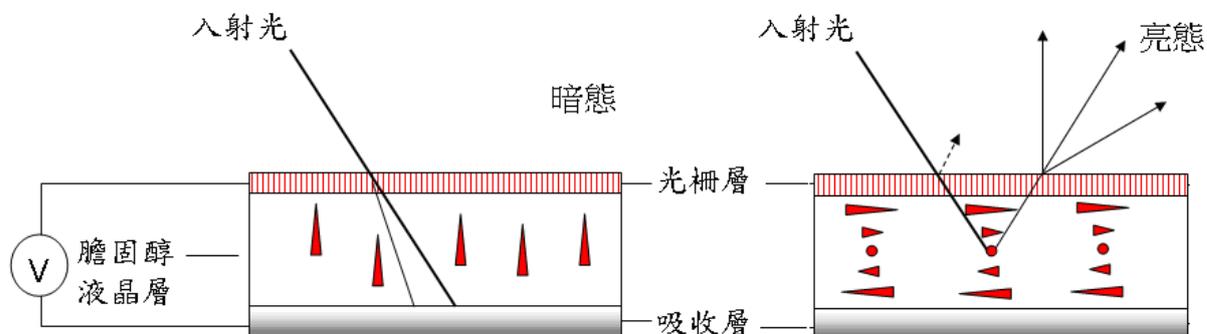


圖 1.6 膽固醇液晶顯示器

1.3.2 光柵置於顯示器底部反射層

光柵擴散膜置於顯示器最底層，適用於單偏光膜反射式液晶顯示器或高分子分散式液晶顯示器(PDLC Display)^[6]，

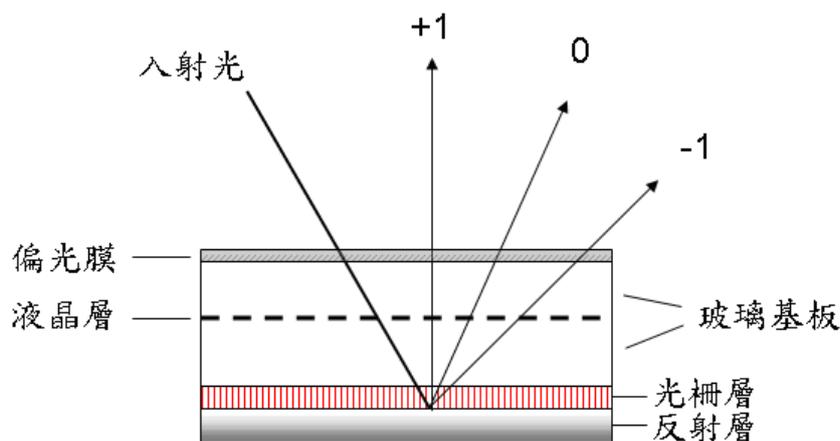


圖 1.7 光柵結構置於反射層

1.4 論文結構

第一章 緒論

第二章 研究內容與方法

第三章 點矩陣全像光柵製做

第四章 多向光柵陣列之光學量測與分析

第五章 改良 LCF-1 效率之光學模擬

第六章 結果討論與未來展望



第二章 研究內容與方法

2.1.1 反射式膽固醇液晶顯示器光學原理

最常見用於提高反射式顯示器可讀性的做法，是在反射式顯示器最底層的反射膜表面製作凸塊反射板(Bump Reflector)或擴散式微傾斜反射板DMSR(Diffusive Micro Slant Reflector)^[9]。環境光經過擴散式反射膜的重新分佈，一部分朝向顯示器正面的方向成為有效光，從而增加了可閱讀性。

膽固醇液晶則是一種具有選擇性波長反射的材料^[10]，運用螺旋分子結構形成布拉格晶格反射條件，達成反射光的目的，反射光的顏色可以由調整螺距來改變；左旋的圓偏振光可以被左旋的膽固醇結構反射，右旋的偏光則可以通過，通過的光被底層的染料吸收，相當於暗態，通電壓大約 10v 即可以切換膽固醇液晶的排列，兩相之間轉換之後並不會自動回復，稱為雙穩態現象，原因為兩相之間轉換的活化能高於雙穩定態的位能。

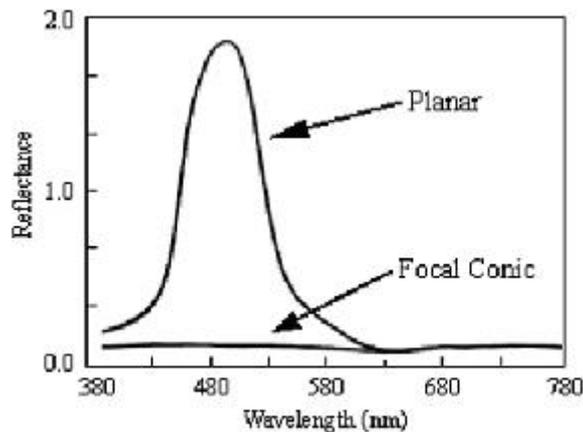


圖 2.1 膽固醇液晶結構與反射率

2.1.2 弗里斯涅爾定理(Fresnel's Equations)

考慮 TE (Transverse Electric) 與 TM (Transverse Magnetic) 的偏振模態，圖二表示了光經過介質轉換的邊界時，TE 與 TM Mode 的震動方向的變化。

$\vec{E} \times \vec{H} = \vec{K}$; 遵守右手定則。

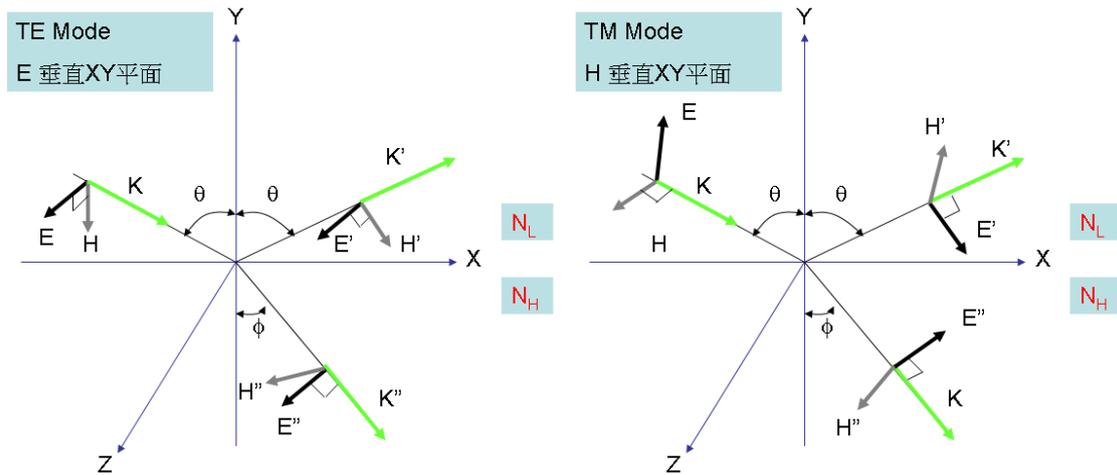


圖 2.2 弗里斯涅爾定理圖示

電磁波的分量的透射比率與反射比率定義如下：

$$\begin{aligned}
 r_s &= \left[\frac{E'}{E} \right]_{TE} = - \frac{\sin(\theta - \phi)}{\sin(\theta + \phi)} \\
 r_p &= \left[\frac{E'}{E} \right]_{TM} = \frac{2 \cos \theta \sin \phi}{\sin(\theta + \phi)} \\
 t_s &= \left[\frac{E''}{E} \right]_{TE} = - \frac{\tan(\theta - \phi)}{\tan(\theta + \phi)} \\
 t_p &= \left[\frac{E''}{E} \right]_{TM} = \frac{2 \cos \theta \sin \phi}{\sin(\theta + \phi) \cos(\theta - \phi)}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

(1)式稱為 Fresnel's equations，可用來計算光通過光學膜表面時的透射與反射光量。

2.1.3 斯涅爾定理(Snell's Law)

當光由疏介質到密介質，入射光與折射光之間的關係，可以寫為：

$$N_L \sin \theta = N_H \sin \phi \quad (2.2)$$

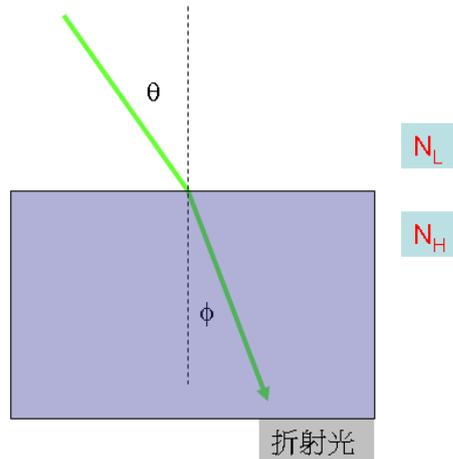


圖 2.3 折射現象

當光由密介質到疏介質時，折射光偏離法線；當 $\theta > \theta_c$ 時，出現全反射。

$$\sin \theta_c = \frac{N_H}{N_L} \quad (2.3)$$

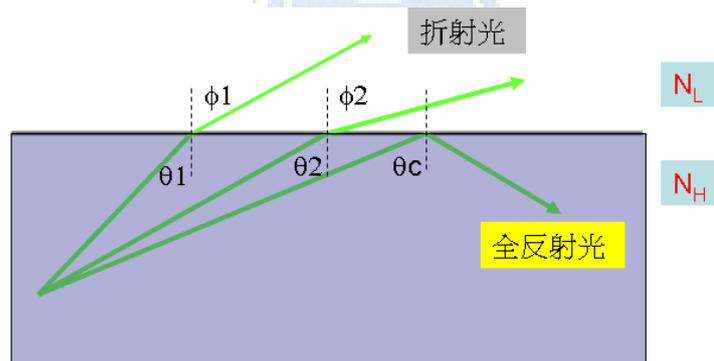


圖 2.4 全反射現象

一般的光學追跡軟體，都是應用 Snell's Law 及 Fresnel's equations 來模擬幾何光學的現象，用於評估照明系統的初始設計是否符合要求，可以減少試模、開模的失敗機率。

2.2 全像光柵原理

光以波動形式傳播的概念^[11]，可追溯至西元 1678 年倫琴(Huygens)所提出的具有睿智的描述：波傳遞的波前的連線可以是下一個波前連線的起源。之後至西元 1804 湯瑪斯·楊(Thomas Young)以波動說解釋雙狹縫干涉的亮暗線成因。其中，蘊含了波可以相疊加或相消的觀念(圖 2.5);以二個點波源相干涉而出現亮區與暗區，即為本論文中光柵干涉(或繞射)的基本圖像。光的波動本質至西元 1860 年由馬克士威爾(Maxwell)所推導出的電磁波理論所闡明。



圖 2.5 平面波干涉現象

波動方程式應用在計算狹縫繞射的研究，由於早期的技術無法做出接近波長範圍的孔徑，即使忽略了光的偏振態及相位項，仍能準確的預測繞射光譜的強度分佈，一般稱此為純量繞射理論。美國亞歷桑納大學博士詹姆士·哈維^[12] (James E. Harvey)關於此理論的研究頗多，僅列其最近且最有影響的一篇。知名光學模擬軟體 ASAP 的孔徑繞射模擬即是採用純量光線追跡，全像正弦光柵亦可以建構於此軟體加以模擬效果，然而在繞射效率方面需要專業繞射計算軟體以向量繞射理論來求出。

2.2.1 向量繞射理論

週期性變化的光柵結構，引致光波的干涉與繞射^[13, 14]，可以用馬克士威爾的電磁波動方程加以描述：

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i\omega\mathbf{B}(\mathbf{r}) \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{J}(\mathbf{r}) - i\omega\mathbf{D}(\mathbf{r}) \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}) = \rho(\mathbf{r}) \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.7)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu(\mathbf{r})\mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (2.9)$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \sigma(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2.10)$$

此概念早先由雷利爵士 (Lord Rayleigh) 提出，受限於電腦尚未發明，無法做深入的分析。遲至 1960 年，史托克 (G.W Stokes) 在論文答辯時提到其可行性^[15]，此時電腦的計算能力已達到可以計算波動方程的地步，之後至 1964 年已有超過 400 篇的論文探討運用計算機的能力於繞射光學的求解。

市面上可以找到的專門光柵模擬軟體有：G-Solver、Virtual-Lab GratingToolBox、PCGrate，可計算各階繞射的效率。待計算出光柵的繞射效率後，搭配專門分析整個光學系統的雜散光模擬軟體：ASAP、Tracepro 即可分析光學系統的效率。

2.2.2 正弦光柵的數學表示

考慮一個平面波入射於正弦光柵的情形(圖三)，在區域一($Z < 0$)跟區域三($Z > h$)都是均勻介質，區域二($0 < Z < h$)的 $\epsilon(x, y, z)$ 呈現正弦函數變化，並假設在 Y 方向沒有變化。電磁場在全區都必須滿足馬克士威方程及邊介值條件

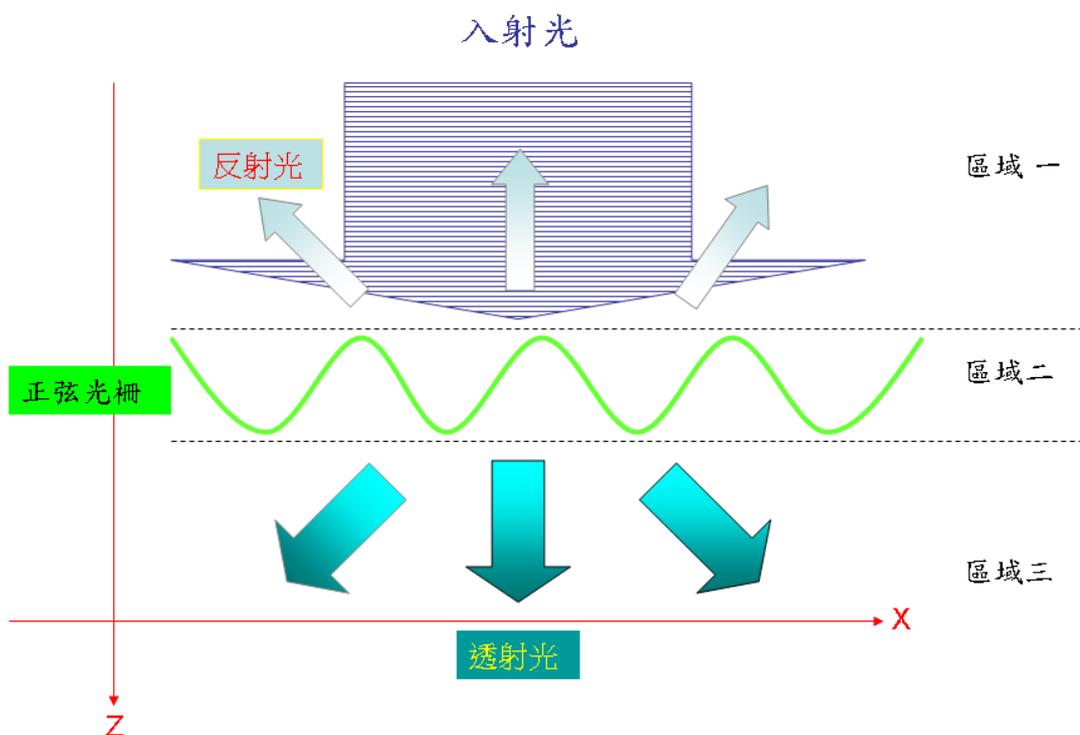


圖 2.6 正弦光柵透射區與反射區

因為電磁場對於 Y 分量的微分變成 0，因此可以簡化馬克士威方程為：

$$i\omega B_x(x, z) = -\frac{\partial}{\partial z} E_y(x, z) \quad (2.11)$$

$$i\omega B_z(x, z) = -\frac{\partial}{\partial x} E_y(x, z) \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} H_x(x, z) - \frac{\partial}{\partial x} H_z(x, z) = J_y(x, z) - i\omega D_y(x, z) \quad (2.13)$$

$$J_x(x, z) - i\omega D_x(x, z) = -\frac{\partial}{\partial z} H_y(x, z) \quad (2.14)$$

$$J_z(x, z) - i\omega D_z(x, z) = -\frac{\partial}{\partial x} H_y(x, z) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} E_x(x, z) - \frac{\partial}{\partial x} E_z(x, z) = i\omega B_y(x, z) \quad (2.16)$$

運用(2.8)(2.9)(2.20)及將(2.11)(2.12)(2.13)代入 (2.14)整理可以得

到 TE Mode (E_y) 的波動方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\mu(x, z)} \frac{\partial}{\partial x} E_y(x, z) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\mu(x, z)} \frac{\partial}{\partial z} E_y(x, z) \right] + \omega^2 [\varepsilon(x, z) + i\sigma(x, z)/\omega] E_y(x, z) = 0 \quad (2.17)$$

$E_y(x, z)$ 即為偏振方向垂直於 X-Z 平面的 TE 電場。

一般 μ 為常數；在此引用一個複數折射率與複數介電常數：

$$\varepsilon_r(x, z) = [n(x, z)]^2 = \varepsilon(x, z) / \varepsilon_0 + i\sigma(x, z) / \omega\varepsilon_0 \quad (2.18)$$

金屬導體的 σ 很大，所以複數項不能忽略；介電質由於沒有自由電子，因

此複數項可以忽略。將(2.18)代入(2.17)可以得到 Helmholtz Equation:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y(x, z) \right] + \left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} E_y(x, z) \right] + k^2 n^2(r) E_y(x, z) = 0 \quad (2.19)$$

其中 $k = \omega/c$ 是為波數， c 為真空中光速。

將 (2.14)(2.15)代入(2.16)經過整理可以得到 TM Mode 的波動方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\varepsilon_r(x, z)} \frac{\partial}{\partial x} H_y(x, z) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\varepsilon_r(x, z)} \frac{\partial}{\partial z} H_y(x, z) \right] + k^2 H_y(x, z) = 0 \quad (2.20)$$

$H_y(x, z)$ 即為偏振方向垂直於 X-Z 平面的磁場。

區域一跟區域三的電磁場都必須滿足(2.18) (2.20)式，定義繞射的電磁場為 U_D ，在此必須引用 Floquet - Bloch Theorem，其定義 U_D 為假周期函數，

$$U_D(x + d, z) = \exp(i\alpha_0 d) U_D(x, z) \quad (2.21)$$

再定義

$$G(x, z) = \exp(-i\alpha_0 x) U_D(x, z) \quad (2.22)$$

並引入光柵方程 $\alpha_m = \alpha_0 + 2\pi * m / d$; 其中 $\alpha_0 = kn_I \sin \theta$

; $\alpha_m = kn_{III} \sin \theta_m$; $d =$ 光柵週期， θ 為入射角， θ_m 為出射角。於是將 U_D

改成：

$$U_D(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} G_m(z) \exp(i\alpha_m x) \quad (2.23)$$

以上將 U_D 變成波數為 α_m 及振幅係數為 G_m 的正弦波的集合，此即為光柵的平面波展開式，其中第 m 階的繞射方向為 θ_m 。

將(2.23)代入(2.19)可以得到

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} G_m(z) + t_m^2 G_m(z) = 0 \quad (2.24)$$

$$t_m^2 = (kn_{III})^2 - \alpha_m^2 \quad (2.25)$$

(2.24)的解為

$$G_m(z) = T_m \exp[it_m(z-h)] + R_m \exp[-ir_m(z-h)] \quad (2.26)$$

$$t_m = \begin{cases} [(kn_{III})^2 - \alpha_m^2]^{1/2} \dots\dots\dots \text{if } |\alpha_m| \leq kn_{III} \\ i[\alpha_m^2 - (kn_{III})^2]^{1/2} \dots\dots\dots \text{if } |\alpha_m| \geq kn_{III} \end{cases} \quad (2.27)$$

(2.26)及(2.27) 表示透射與反射波的集合，對於區域三而言，只有透射

波，因此定義 U_T 為透射的電磁場：

$$U_T(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m \exp\{i[\alpha_m x + t_m(z-h)]\} \quad (2.28)$$

類似的方式用來定義區域一的 U_R 為反射的電磁場：

$$U_R(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m \exp\{i[\alpha_m x + r_m(z-h)]\} \quad (2.29)$$

$$r_m = \begin{cases} [(kn_I)^2 - \alpha_m^2]^{1/2} \dots\dots\dots \text{if } |\alpha_m| \leq kn_I \\ i[\alpha_m^2 - (kn_I)^2]^{1/2} \dots\dots\dots \text{if } |\alpha_m| \geq kn_I \end{cases} \quad (2.30)$$

(2.28)和(2.29)式即為雷利展開式(Rayleigh Expansions, 1907)。

一般會比較第 m 階對第 0 階的電場強度比值：

$$\eta_{R,m} = \Re\{r_m / r_0\} |R_m|^2 \quad (2.31)$$

$$\eta_{T,m} = C \Re\{t_m / r_0\} |T_m|^2 \quad (2.31)$$

其中 $C=1$ (TE Mode); 而 $C=(n_I/n_{III})^2$ (TM Mode)。

區域二的介質變化一般具有周期結構， $\varepsilon(x) = \varepsilon(x+d)$; 運用微分方法 (Differential Method)，切割成 n 個薄板(圖 2.7)，並將這些薄板分別以傅立葉展開表示：

$$\varepsilon_n(x) = \varepsilon_I + (\varepsilon_{III} - \varepsilon_I) \sum_{h=-\infty}^{\infty} \varepsilon_{h,n} \exp(i \cdot h \cdot K \cdot x) \quad (2.32)$$

其中 $K = 2\pi / d$ ， h 為調和常數， $\varepsilon_{h,n}$ 為振幅係數：

$$\varepsilon_{h,n} = \frac{1}{d} \int_0^d f_n(x, z_n) \exp(-i \cdot h \cdot K \cdot x) \quad (2.33)$$

$f_n(x, z_n)$ 為第 n 層薄板的光柵折射率分佈，其數值 0 或 1，取決於 x 的位置為 ε_I 或 ε_{III} ；經過如上所述的分割之後，正弦光柵簡化成僅具 x 方向變化的平板陣列光柵。

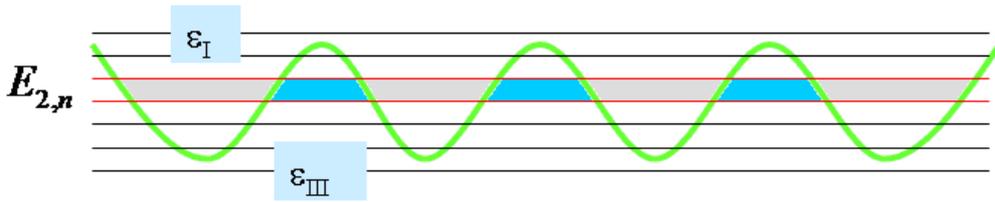


圖 2.7 正弦光柵分層切割

第 n 層薄板之中的電(磁)場以傅立葉展開表示：

$$E_{2,n} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} S_{m,n}(z) \exp\{-i[(k_1 \sin \theta + 2\pi * m / d) \cdot x + [k_{2,n}^2 - (k_1 \sin \theta + 2\pi * m / d)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot z]\} \quad (2.34)$$

回顧之前提到的區域一、三的電場，加上(2.34)可以將全區的電場完全表示出來，區域一的電場：

$$E_1 = \exp[-i(k_1 \cdot r)] + \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_m \exp\{-i[(k_1 \sin \theta + 2\pi * m / d) \cdot x + [k_1^2 - (k_1 \sin \theta + 2\pi * m / d)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot z]\} \quad (2.35)$$

區域三的电場：

$$E_3 = \sum_{m=-\infty}^{\infty} T_m \exp\{-i[(k_1 \sin \theta + 2\pi * m / d) \cdot x + [k_3^2 - (k_1 \sin \theta + 2\pi * m / d)^2]^{\frac{1}{2}} \cdot z]\} \quad (2.36)$$

要求解以上三區域的電磁場，必須帶入邊界條件，亦即每一個相鄰接的電磁場展開式必須在邊界上連續。

邊界條件：定義 \mathbf{n}_{12} 為介面的法向量

$$n_{12} \cdot (B_2 - B_1) = 0 \quad (2.32)$$

$$n_{12} \cdot (D_2 - D_1) = \rho_s \quad (2.33)$$

$$n_{12} \times (E_2 - E_1) = 0 \quad (2.34)$$

$$n_{12} \cdot (H_2 - H_1) = J_s \quad (2.35)$$

當介面為金屬導體， $B_2 = D_2 = E_2 = H_2 = 0$

當介面為介電導體， $J_s = \rho_s = 0$

因為光阻材料屬於介電質，因此 (2.32~2.35) 的右邊都為 0。

由此可以看出，電磁場在邊界的兩邊是連續的。

另外，將(2.34)代入(2.19)式可以計算展開式中的未知數 $S_{m,n}$ 。當 n 值很大時，可以使每一層薄板的厚度變很小，即更能趨近正弦波的形式；同時也會使計算變的很龐大，而且耗時，因此大多採近似的方式來計算繞射效率。

2.2.3 全像光柵效率

本節比較兩種光柵形狀的繞射效率，值得注意的是反射光的強度，之前在 1.3.1 節曾提到正弦光柵有較低表面反射，可以減少光學膜貼於顯示器時對影像的干擾，即同時具有抗反射與防眩光的效果。在表 2.8 中，正弦光柵的 0 階反射可低於 0.3%，低於一般採用抗反射鍍膜 $R < 0.5\%$ 的規格，理論上可以將正弦光柵視為等效漸變折射率結構，具有抗反射的效果。另外，由於光柵的結構尺度與光波長接近，產生共振吸收的現象，可以看到矩形光柵的光能總合低於 96%，反之正弦光柵可以達到 98% 以上。

表 2.8 光柵繞射效率比較表

正弦 光柵 繞 射 效 率	入射波長	632nm		
	入射角度	0度		
	光柵材質	石英玻璃 $n = 1.46$		
	光柵深度	0.7 μ		
	填充係數	50%		
	光柵周期	1 μ	2 μ	3 μ
-5 order T%				
-4 order T%				
-3 order T%		0.09%	0.10%	
-2 order T%	0.00%	2.93%	5.43%	
-1 order T%	35.55%	36.12%	32.64%	
0 order T%	28.67%	20.46%	21.33%	
+1 order T%	35.55%	36.12%	32.64%	
+2 order T%	0.00%	2.93%	5.43%	
+3 order T%		0.09%	0.10%	
+4 order T%				
+5 order T%				
-4 order R%				
-3 order R%		0.17%	0.01%	
-2 order R%	0.00%	0.19%	0.34%	
-1 order R%	0.01%	0.01%	0.00%	
0 order R%	0.20%	0.25%	0.27%	
+1 order R%	0.01%	0.01%	0.00%	
+2 order R%	0.00%	0.19%	0.34%	
+3 order R%		0.17%	0.01%	
+4 order R%				

矩 形 光 柵 繞 射 效 率	入射波長	632nm		
	入射角度	0度		
	光柵材質	石英玻璃 $n = 1.46$		
	光柵深度	0.7 μ		
	填充係數	50%		
	光柵周期	1 μ	2 μ	3 μ
-5 order T%			1.22%	
-4 order T%		0.71%	1.78%	
-3 order T%		3.73%	0.10%	
-2 order T%	0.00%	4.24%	3.93%	
-1 order T%	40.94%	38.66%	38.93%	
0 order T%	12.42%	3.00%	1.19%	
+1 order T%	40.94%	38.66%	38.93%	
+2 order T%	0.00%	4.24%	3.93%	
+3 order T%		3.73%	0.10%	
+4 order T%		0.71%	1.78%	
+5 order T%			1.22%	
-4 order R%			0.01%	
-3 order R%		0.05%	0.05%	
-2 order R%	0.00%	0.61%	0.05%	
-1 order R%	0.20%	0.35%	0.44%	
0 order R%	1.15%	1.41%	1.60%	
+1 order R%	0.20%	0.35%	0.44%	
+2 order R%	0.00%	0.61%	0.05%	
+3 order R%		0.05%	0.05%	
+4 order R%			0.01%	

以電腦模擬正弦光柵的反射率，觀察光柵深度變化對於反射率的關係，顯示深度若可以由 $0.7\mu\text{m}$ 加深到 $1\mu\text{m}$ ，可以將反射率由 0.2% 降到 0.1% ；此外，光柵周期由 $1\mu\text{m}$ 加寬到 $3\mu\text{m}$ ，反射率由 0.2% 提高到 0.27% 。

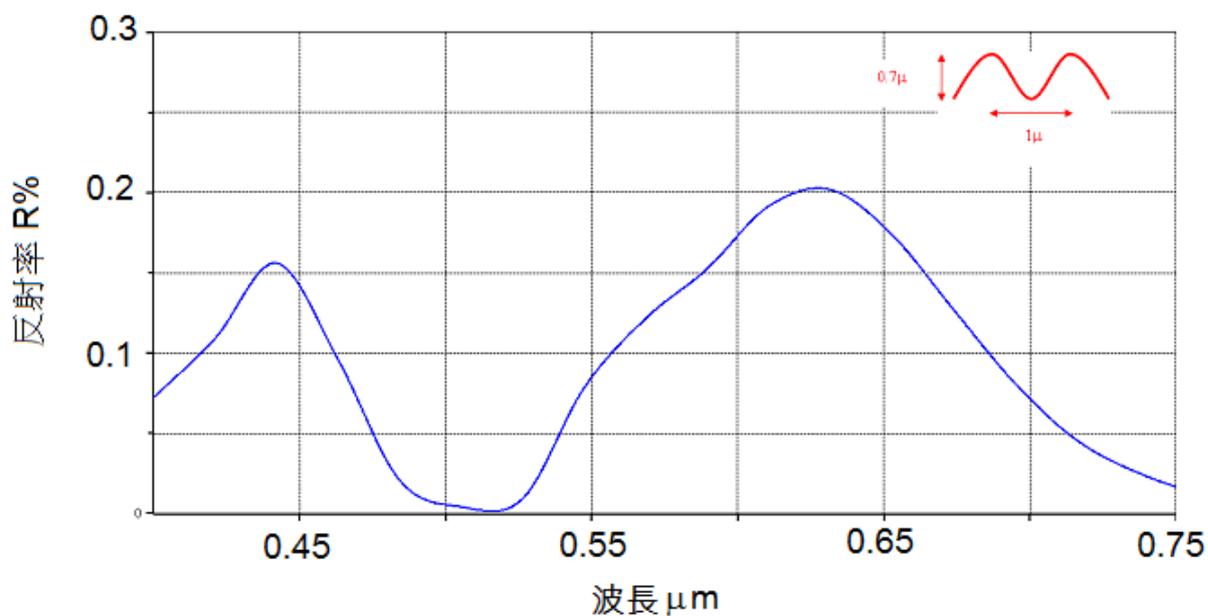


圖 2.9 光柵周期 1μ 深度 0.7μ 的可見光區反射率

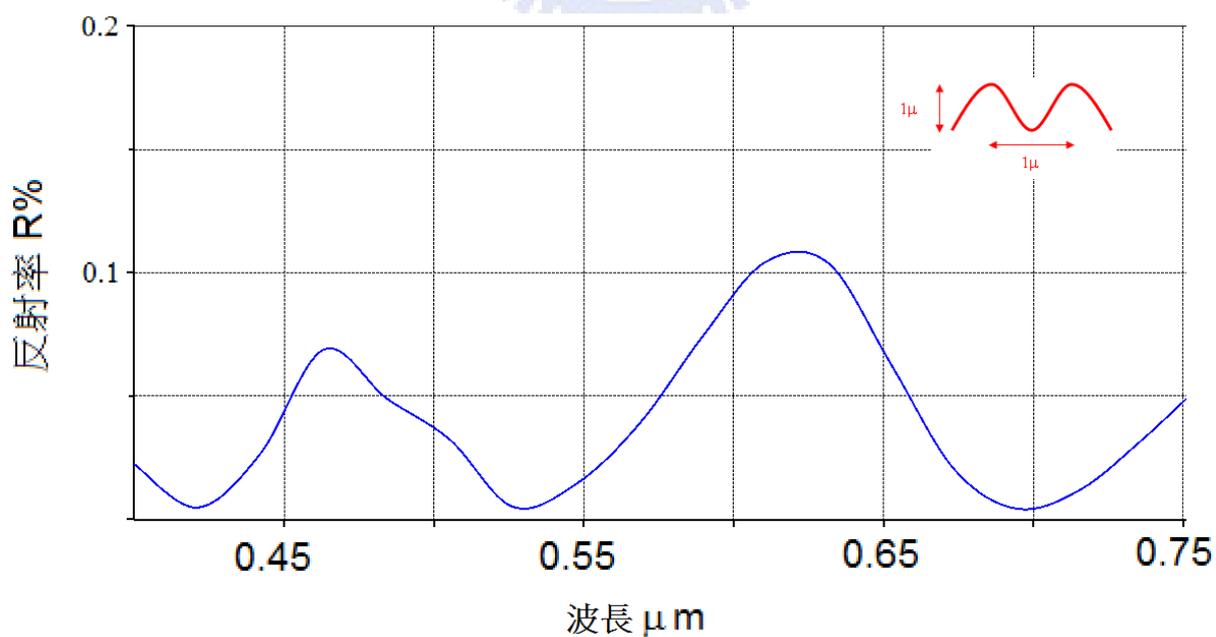


圖 2.10 光柵周期 1μ 深度 1μ 的可見光區反射率

第三章 點矩陣全像光柵製做

3.1 點矩陣全像技術

雷射光具有波長單一，同調距離長，輸出功率穩定的特點，可以用數學表示電場隨空間的變化：

$$E_1(r, t) = \text{Re}[A_1 e^{i(k_1 \cdot r - \omega t + \delta_1)}] \quad (3.1)$$

其中波向量 k 與入射面之法向量的夾角 θ ;

$$k_1 = k[\cos(\theta_1) \hat{z} + \sin(\theta_1) \hat{y}] \quad (3.2)$$

$$k_2 = k[\cos(\theta_2) \hat{z} + \sin(\theta_2) \hat{y}] \quad (3.3)$$

以兩道雷射光做干涉實驗時，可以採用如圖 3.1 的光路安排，可以減少雷射光的相位差。

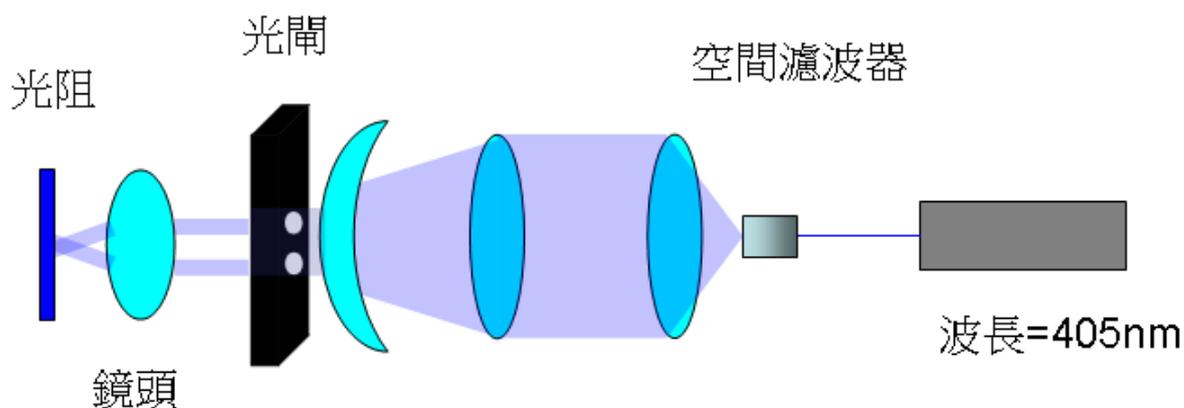


圖 3.1 干涉光路圖示

當兩道光同時照射在光阻時，形成亮暗間隔的干涉條紋，相位差如下所示：

$$\Delta = k_1 \cdot r - k_2 \cdot r + \delta_1 - \delta_2 \quad (3.4)$$

$$\Delta = k[z(\cos(\theta_1) - \cos(\theta_2)) + y(\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2))] + \delta_1 - \delta_2 \quad (3.5)$$

亮紋出現的條件為 $\Delta = m * 2\pi$ ，同時簡化上式中的 z 分量及 $\delta_1 - \delta_2$ 為 0，

$$m2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} y[\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2)] \quad (3.6)$$

$$(m+1)2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} (y + \Delta y)[\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2)] \quad (3.6)$$

相鄰亮線的距離即可以求出如下所示：

$$\Delta y = \frac{\lambda}{[\sin(\theta_1) - \sin(\theta_2)]} \quad (3.7)$$

干涉圖形的形狀，依照光闌區孔徑開口的形狀而定；干涉點的大小依成像鏡頭的倍率 M 而變，縮放的倍率越大，可以產生越小的光點；能量點聚的更小，也可以提高曝光的速度，目前使用 $M=40X$ 的鏡頭， 1mm 直徑大小的光孔徑可以聚焦為 $25\ \mu\text{m}$ 直徑的光點，除此外尚有 $M=60X$ 的鏡頭可以使用。若是改變干涉圖條紋的方向，繞射出來的光路徑也會跟著改變；改變干涉條紋的間隔，可以控制繞射光路徑的角度(附錄一)。

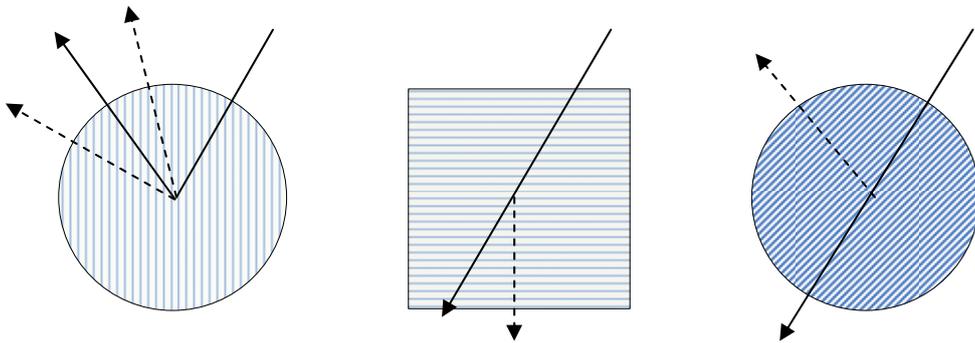


圖 3.2 光柵點圖示

3.2 全像點陣列製作流程

以光群雷射公司自行開發的點矩陣直寫系統(DOT-Matrix-Writer)，將預計要寫在光阻片上圖案，編成之後輸入電腦，全像雷射直寫機台即可以自動化的控制光柵點的位置、方向、曝光時間；一個 100*100mm 面積的光柵陣列，大約一個下午的時間即完成轉寫。經過曝光的全像圖案母片，以電鑄^[16] (Electroforming)翻模至鎳板，增強結構強度，以方便後續的大量轉印。



(1) 電鑄鎳板

(2) 上 UV 膠+滾壓



(3) UV 光硬化

(4) 轉印成品

圖 3.3 光柵膜片製作流程

3.3.1 點矩陣全像點陣列圖案 LCF-1

將干涉點以相等間隔排列形成陣列，搭配干涉條紋間距及方向，如圖 3.2.1 所示的方式排列，使其具有三種方向且等條紋間距=1.1 μm 的干涉條紋，每個干涉點的大小為 50 μm 。經過實地測試此陣列的穿透光譜，以相機拍下繞射圖案，顯示出有三個方向的第一階繞射分佈在以第零階白色主光源為中心的三個方向，並且帶有色散的彩虹現象，若要消除此因為色散造成的彩虹現象，必須增加光柵周期的分佈範圍(圖 3.6)。

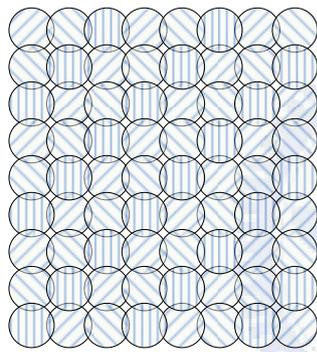


圖 3.4 圓形光柵陣列

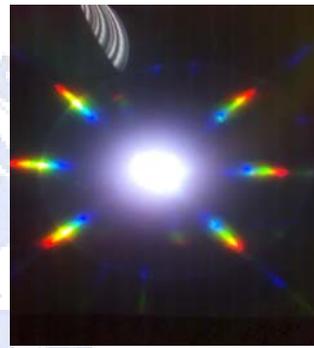


圖 3.5 光柵透射圖案

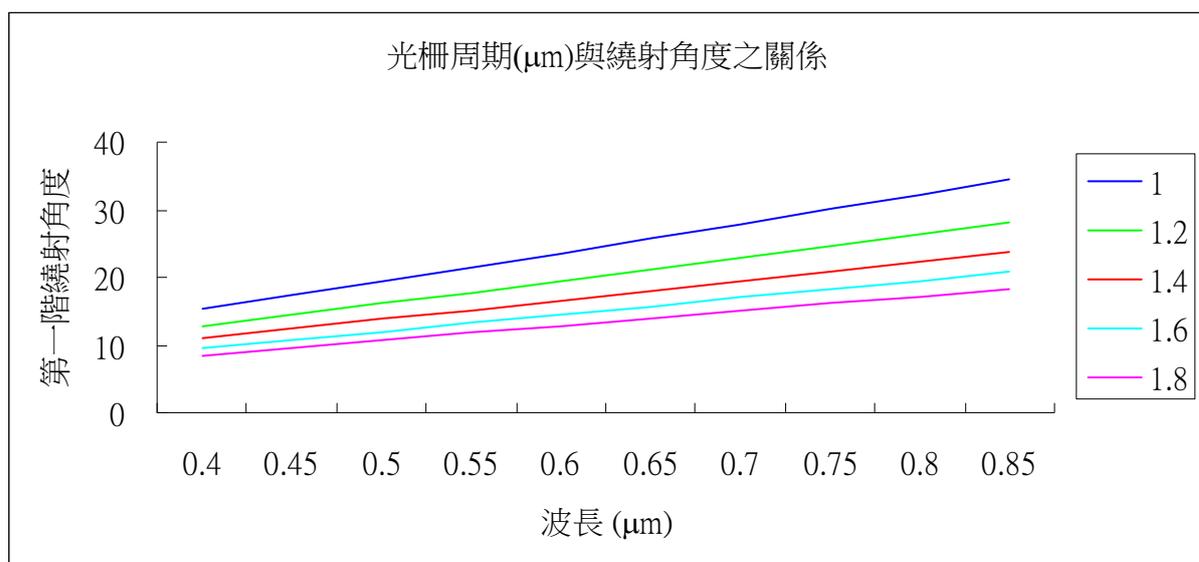


圖 3.6 光柵周期 vs 繞射角度

3.3.2 以光學顯微鏡觀察成品結構

選擇-45、0、+45 度的光柵方向，是假定光源來自於前方三個最有可能方向；如此，可以減少光繞射到不必要角度的損失；而且，在實際讀者觀看顯示器時，是可以自由調整位置及角度的，因此並無需放入更多方向的光柵。光柵寬度選擇 $1.1\mu\text{m}$ ，光阻折射率 1.5，其 633nm 波長之第一階繞射角度經計算為 34.94° ，以光柵深度 $0.7\mu\text{m}$ 而言，繞射效率約為 35%，以顯微鏡觀察這些光柵點，形狀輪廓呈現圓形，且部分區域有圓相交，與圖 3.4 的設計值相去不遠。由於干涉點的形狀選擇圓形，為了提高圖形的涵蓋率，增加可產生繞射的區域，因此將每個圓點與相鄰圓形各邊有 10%重疊，在顯微鏡下的重疊部位顯現黑色(圖 3.7)，亮度下降並非被材質吸收了，而是光線在此區域被散射開來，相當於擴散點的效果。

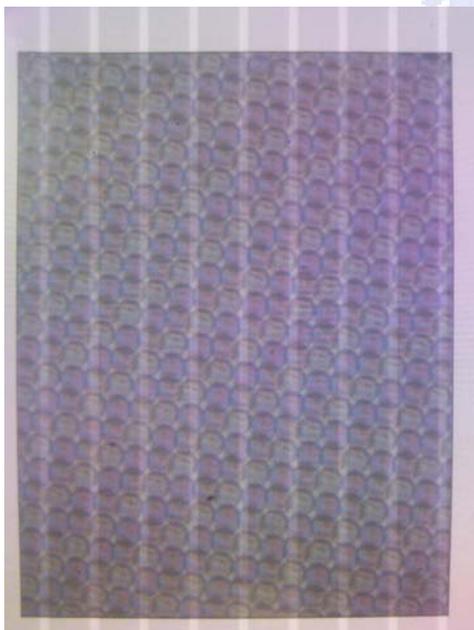


圖 3.7 干涉點陣列 100 倍放大

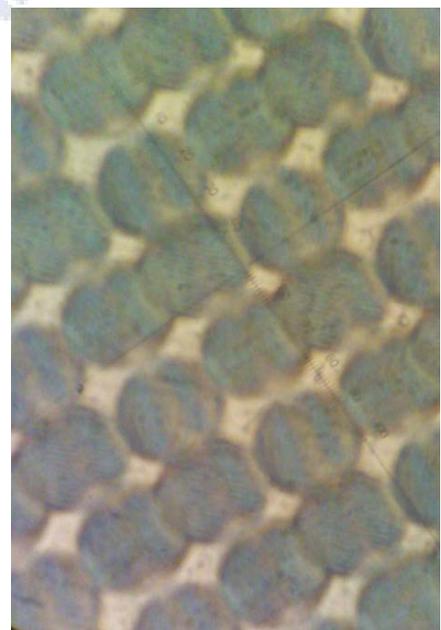


圖 3.8 干涉點陣列 500 倍放大

3.3.3 以原子力顯微鏡觀察微結構

觀察光柵的細部結構需要採用 AFM(原子力顯微儀)，如圖 3.9 所示，探針選擇尖端圓弧半徑達到 1~3nm 的 DLC(類鑽碳)頭，掃描面積可以設定的最大範圍為 $65 \times 65 \mu\text{m}^2$ ，剛好可以完整涵蓋直徑 $50 \mu\text{m}$ 的圓形干涉點。



圖 3.9 接觸式原子力顯微儀

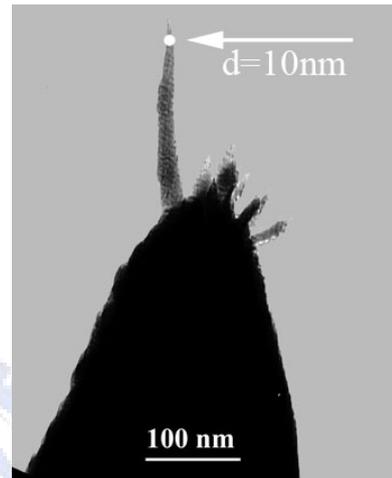


圖 3.10 NT-MDT 牌 NSG10 探針

先以 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 的掃描範圍來觀察光柵周期與深度，可以發現光柵周期約為 $1.1 \mu\text{m}$ ，深度為 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}$ ；另可觀察到整體的光柵平坦度變化頗大，應與滾輪式塗佈光阻及軟性塑膠基板的厚度均勻度有關，在製程上可以改成玻璃基板及旋轉塗佈光阻來加以改善。

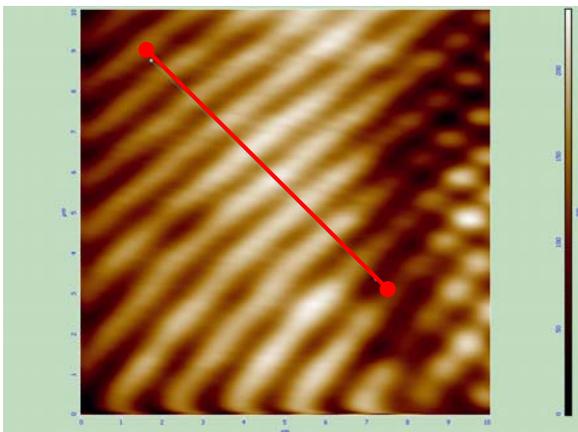


圖 3.11 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 光柵表面圖



圖 3.12 光柵剖面深度變化

觀察 $65 \times 65 \mu\text{m}^2$ 的範圍，可以清楚看到三個光柵方向，交會區的暗顏色顯示高度為相對低點，並且為二維的點狀結構，符合預期的設計要求。仔細觀察四圓交接的白色區域，可以看到邊緣有疊影的感覺，如圖 3.13 的紅圈所示，那是雷射光干涉時，光點沒有完全重合於光軸，原因為聚焦物鏡的焦平面沒有剛好落在光阻的表面。要消除此種聚焦誤差，一般會使用雷射自動對焦，自動調整聚焦的平面，便可使二雷射光點重合。同時，在基板水平精密校準上，也是用雷射投射於基板上，並偵測雷射光反射的位置，如此可以校正基板的垂直度，使其與光軸垂直，以消除光學上的離軸像差。

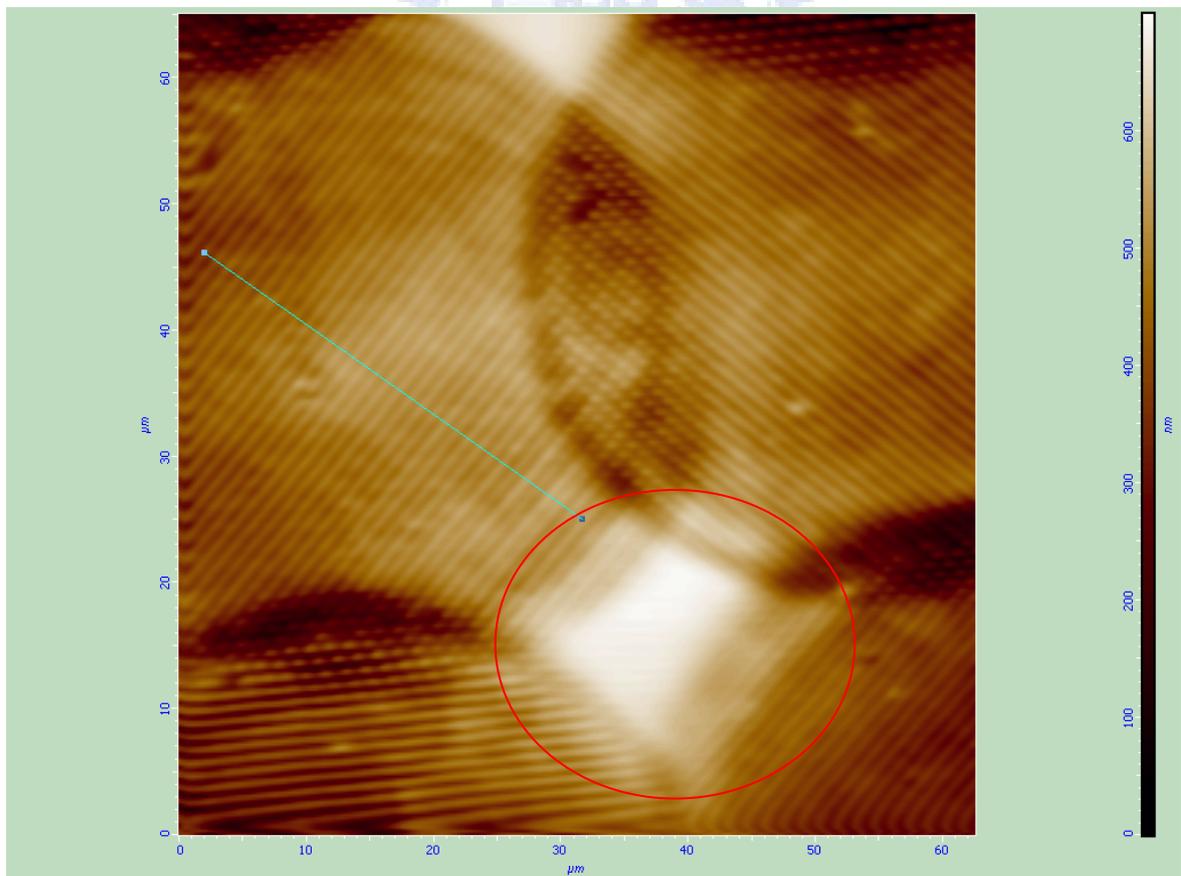


圖 3.13 $65 \times 65 \mu\text{m}^2$ 光柵表面圖

第四章 多向光柵陣列之光學量測與分析

前節的光學膜在確定結構上符合設計需求後，於本章將先運用專門量測顯示器光學特性的 CONOSCOPE™ 及常用於量測穿透率的 U4100 光譜儀，來量測 LCF-1 及膽固醇液晶面板在貼 LCF-1 光學膜前後的反射率變化；之後再以模擬軟體計算繞射光強度，來與量測數據比對，再根據分析結果來找出更好的光柵形式。

4.1.0 光度學定義

探討一個物體在可見光區的幅射現象，稱為光度學；若以下圖為例，在點光源距離 S 夾角 θ 垂直面上的單位立體角且單位面積上偵測到的照度值，常用的單位為 $(W/Ster\text{-}cm^2)$ ，與夾角為 θ 的方向有 $\cos^{-3}(\theta)$ 的關係。

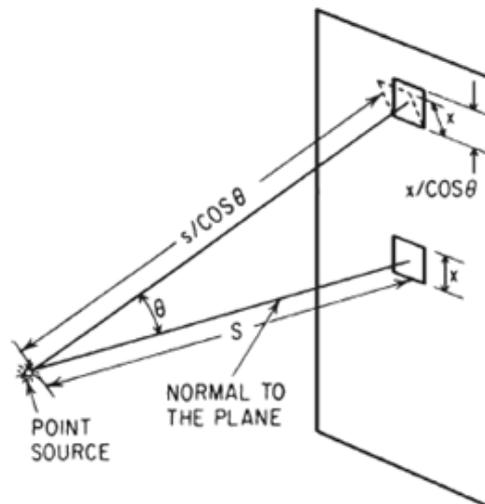


圖 4.1 光輻射強度量測

其中若定義垂直方向光源強度為 J_0 ; 根據朗伯特定理(Lambert's Law)

$$J_\theta = J_0 \cos(\theta) \quad (4.1)$$

再乘上強度與距離 $S/\cos(\theta)$ 平方成反比的關係，即可得 $\cos^{-3}(\theta)$ 的角度因子。接著，將此關係式用於計算整個半圓形天頂的輻射量，如圖所示：

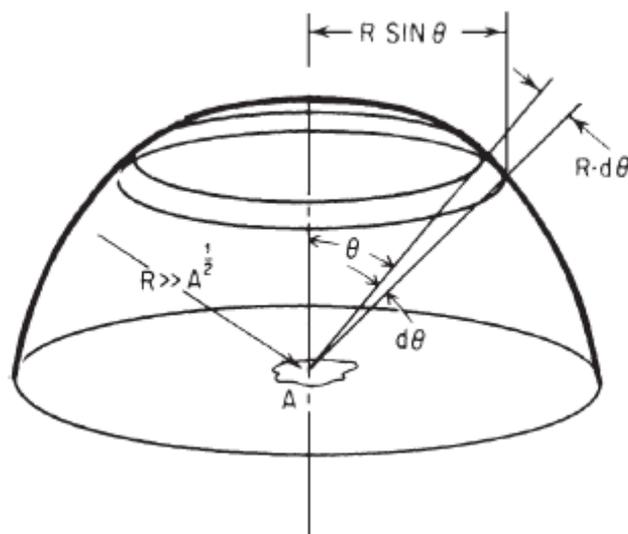


圖 4.2 輻射量計算圖

若面積 $A(\text{cm}^2)$ 的輻射量為 N 瓦($\text{W}/\text{Ster}-\text{cm}^2$)，則：

$$J_\theta = NA \cos(\theta) \quad (4.2)$$

在距離 $R(>>A^{1/2})$ 的環面積 $2\pi R \sin(\theta) * R d\theta$ 上(cm^2)，所涵蓋的立體角除上 R^2 後變為 $2\pi \sin(\theta) * d\theta$ (Ster)，則輻射於此環面所張之立體角的強度為：

$$dP = 2\pi NA \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (4.3)$$

積分整個上半圓球可得總輻射量：

$$P = \int_0^{\pi/2} 2\pi NA \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta = \pi NA (\text{瓦特}) \quad (4.4)$$

以上光度學上定義的量測方式，對於後續的光學膜量測及分析頗為重要。

4.1.1 CONOSCOPE™(錐光偏振儀)簡介

量測光度的利器:CONOSCOPE™(錐光偏振儀)，常用於量測平面顯示器的光發散角度分佈，其特點為可以在一張極化座標圖中顯示待測物 360 度方位角及正負 80 度俯仰角範圍光錐的輝光分佈、色度的角變化;若是同時量測顯示器的白場與暗場，也可以將數值轉換為對比，從而得知對比圖。用於量測光擴散分佈圖時，可以量測穿透或反射的擴散角分佈，光源方面可以選擇發散光或準直光，並可以調整投射在樣品的的光點大小從 0 到 2 mm。

其量測原理為將待測物發出之光，依出射光之方位與俯仰角，以鏡頭聚焦於第一成像面後，再以重放透鏡系統(Relay Lens System)，重新投射於經過致冷器降溫的 CCD 感測器。另外，若物體本身不發光，亦可外接投射用之照明光源，經由四方菱鏡入射於待測物表面，藉以量測反射光分佈。

CONOSCOPE™ (錐光偏振儀)

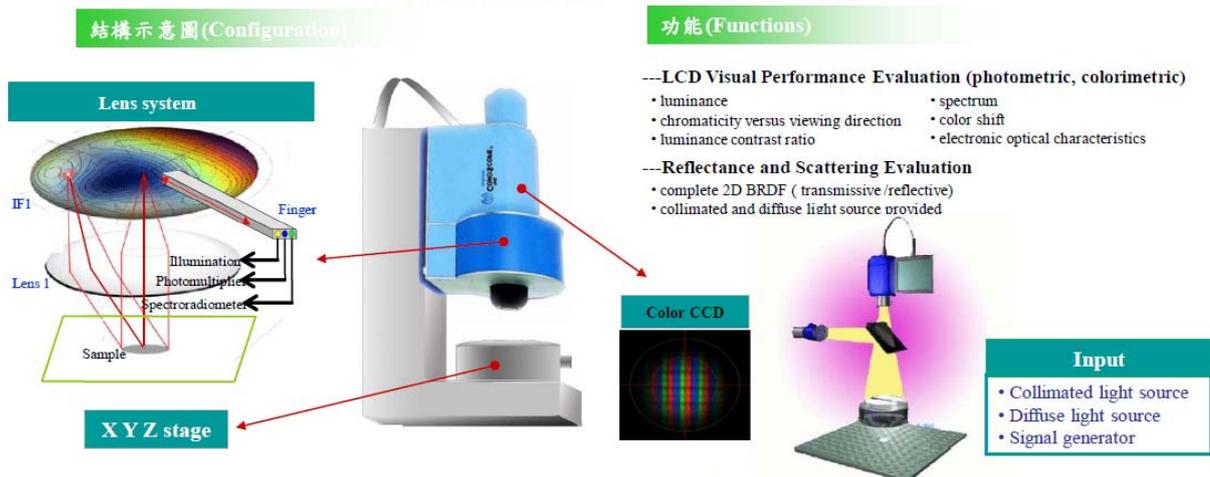


圖 4.3 CONOSCOPE™(錐光偏振儀)

應用此儀器於量測本實驗的光控制薄膜的光學特性時，光學膜以光學膠貼於膽固醇液晶面板，如圖 4.4 所示，量測 Blue RCHLC(藍色反射式膽固

醇液晶)在貼上 LCF-1 前後之反射光方向的變化。

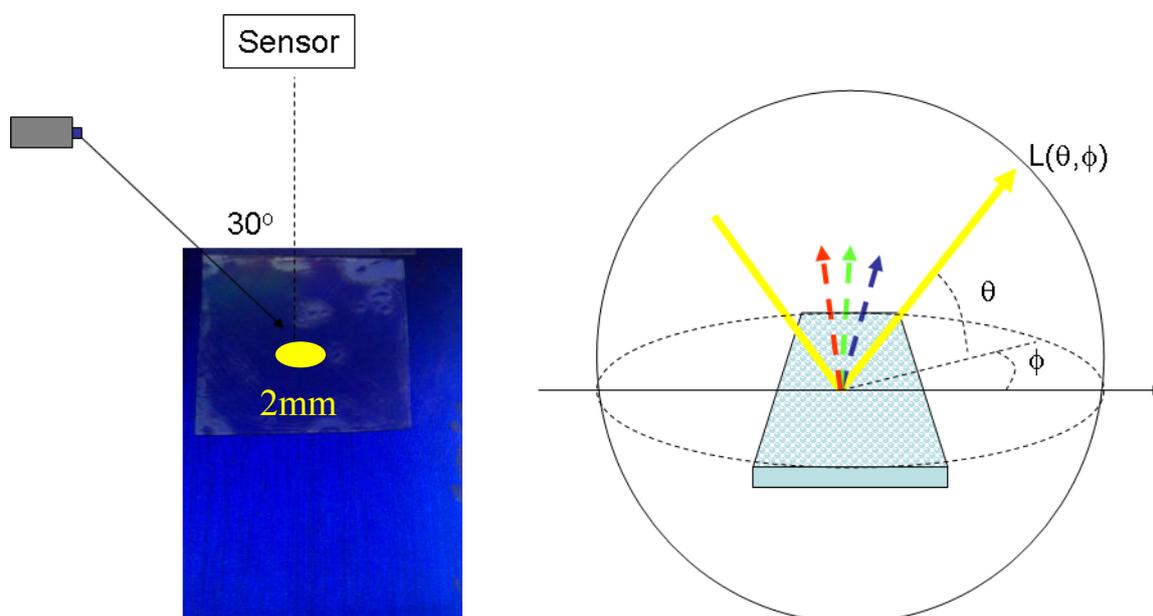


圖 4.4 量測藍色膽固醇液晶貼 LCF-1 光發散角分布

4.1.2 Hitachi U4100 分光光譜儀簡介

U4100 光譜儀可用於量測波長 185nm 至 3000nm 的穿透率(T%)或反射率(R%)或吸收率(A%)，但較無法量測散射與繞射，若是僅用於比較相同條件下貼膜前後的變化，則仍為可行的量測工具；其分光光柵解析度達 1nm，入射角度有 5°、12°、30°、45°可以選擇。

System configuration	
Monochromator	Prism-grating
Sample compartment	10mm rectangular cell holder
Detector	Photomultiplier (UV-Vis) Cooled Pbs (NIR)
Measuring wavelength range	185 to 3,300nm
Sample size	10 mm rectangular cell

圖 4.5 Hitachi U4100 分光光譜儀

U4100 用於量測之光學架構為雙光路比較法(圖 4.6)，以百分率表示量測光與參考光的強度比。集光器為單顆直徑 6.5cm 且內塗 BaSO₄ 的積分球，採光孔直徑為 1.5cm，以光遮斷器區分量測光與參考光，具有 PbS 近紅外光偵測器及 PMT 光電倍增管。適用於量測光滑平面的透反射或吸收率，若樣品具有光散射或繞射的特性時，因為光路頗長，光於量測過程中發散超過積分球的入射孔徑，積分球將無法完整收光，造成量測數值偏低。

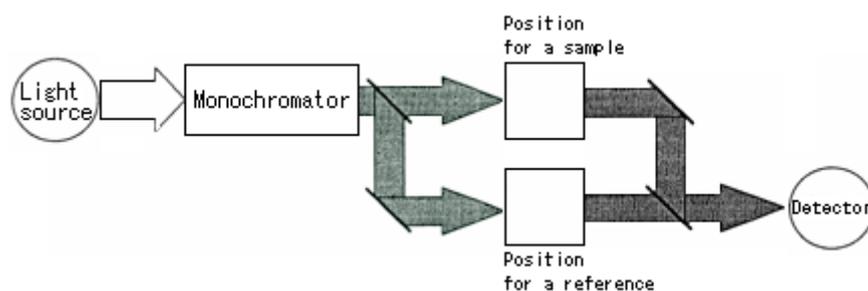


圖 4.6 U4100 光路示意圖

使用 U4100 分光光譜儀的量測過程中，需注意光是否有超出積分球入光孔徑，由於不同的光路治具其光路長度並不相同，使用前需先計算量測治具的收光角，如下圖所示：

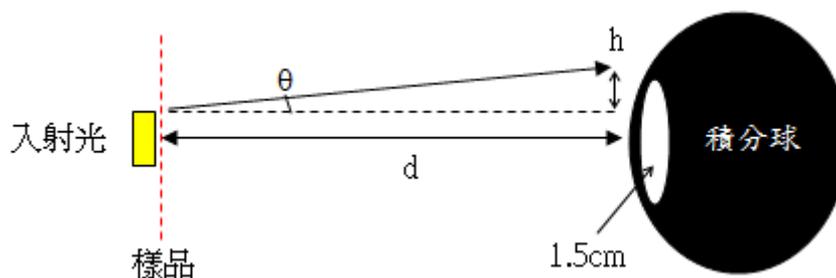


圖 4.7 光路治具相關尺寸

表 4.8 量測治具之收光角

量測光點大小 3*8mm

治具角度(Degree)	5	12	30	45
治具光路長度d(cm)	14	20	15	12
可收光角 θ (Degree)	1.43	1.00	1.34	1.67

以上二種光學儀器，前者對於複雜的光發散角度分佈有良好且快速的量測，後者對於簡單的光學元件異質介面間各種波長的穿透率與反射率有良好的解析能力，同時將二種儀器搭配使用，可以減少量測上的盲點。

4.2.1 藍色膽固醇液晶反射率量測

先用 CONOSCOPE™ 量測膽固醇液晶的光發散特性，圖 4.9 位於 30 度反射角的位置有一明顯的高反射，光點擴散的程度很低，表示反射式膽固醇液晶的可視區很窄，幾乎只有鏡面反射，當目視角度偏離反射光方位時，會感覺藍色反射光立刻變暗，若要做為顯示器的話，必須擴大反射光的角度分佈，來增加可視範圍。在光學膜選擇上，可以用表面擴散膜或光控制膜，使光從主反射角分離出來，一方面來降低鏡面反射的熱點(Hot Spot); 一方面則增加額外的視角。在反射機制上，膽固醇液晶對於大角度入射光的反射率會有主反射波長飄移現象，反射區隨著入射光角度變大而往短波長移動。因此若可運用光學膜將入射光角度變小，則膽固醇液晶的反射率也會提高。

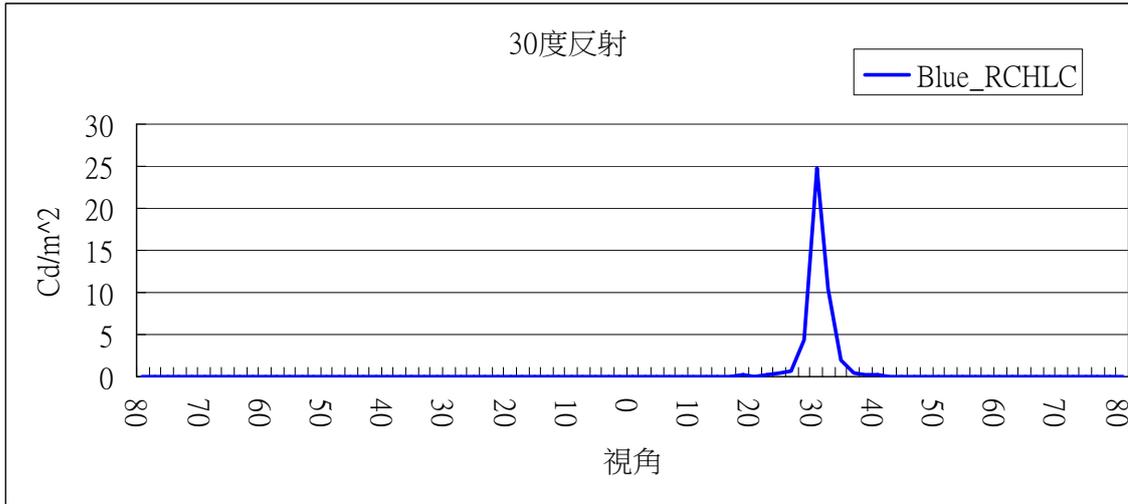


圖 4.9 Blue RCHLC 的光發散角分佈

藍色膽固醇液晶的反射光型態，一旦確定為鏡面反射之後，接下來便是用 U4100 分光光譜儀量測可見光波長範圍(400~700nm)的反射率，圖 4.10 在 400~500nm 之間的數值明顯高出其他波段，峰值位於深藍色近紫外光區，為人眼可以感知的範圍；在 500~700nm 的波段大約為 5% 的廣波段反射，其來源為貼於膽固醇表面的 PMMA($n=1.495$)鏡面反射。

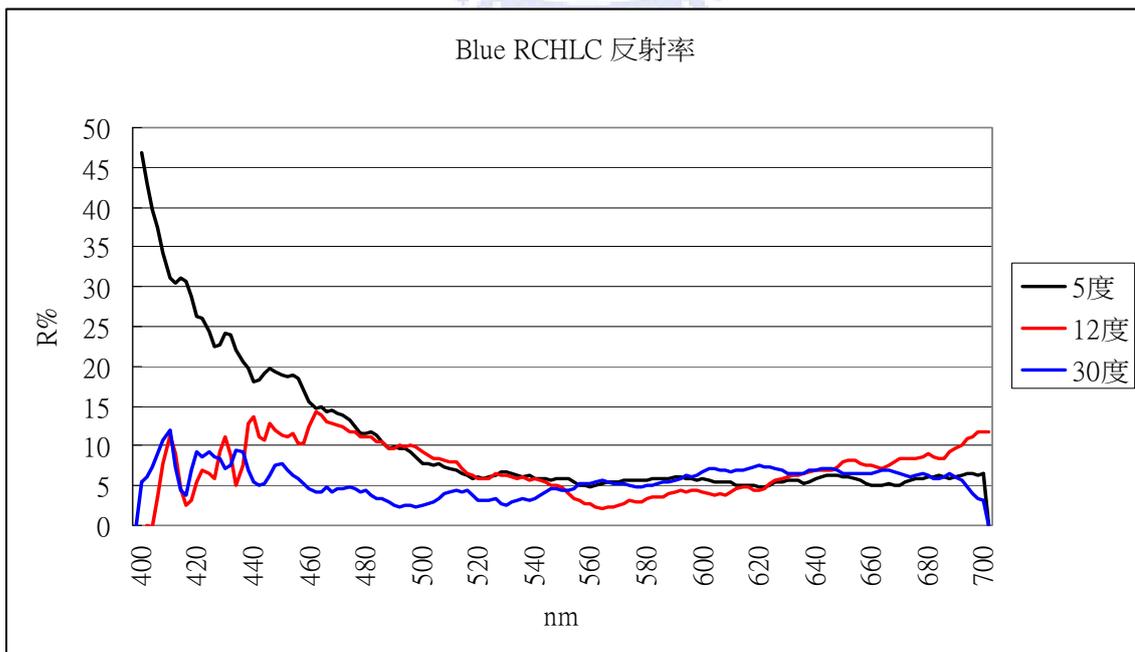


圖 4.10 Blue RCHLC 的反射率

4.2.2 LCF-1 單體光學量測

在量測 LCF-1 的穿透率跟反射率之前，先來量測各個第 0 與±1 階繞射光點的強度比例關係，以利後續使用 U4100 光譜儀量測；用手持式照度計量測 0° 入射的繞射強度如圖 4.11 所示：

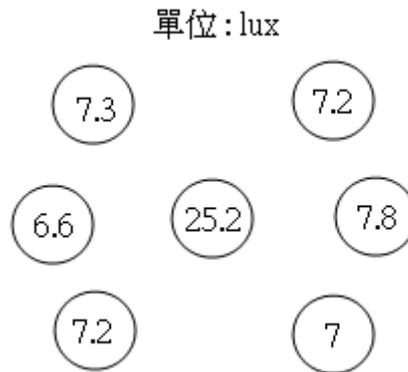


圖 4.11 LCF-1 穿透光波長 632.8nm 繞射強度分佈

將左邊 +1 階 $7.3 + 6.6 + 7.2 = 21.1$ 及右邊 -1 階 $7.2 + 7.8 + 7 = 22$ ，與中間的零階有 25.2 相比稍低，是因為光柵點的重疊使第一階繞射率下降且光柵點間的空白區屬於無繞射的一般光。此量測數據可以用於判斷第零階光與六個一階光的強度比，當量測出第零階的反射率後，即可按照圖 4.11 的比例預測第一階繞射光的反射率。一般使用 U4100 量測第一面的反射率時，正常狀態下是會連第二面一起量，然後再扣掉第二面的反射光；但是 LCF-1 的光學結構較為複雜，無法直接扣除，因此將背面塗黑，用意為吸收第二面的反射光，此時量測第一面的零階反射光可以大幅減低第二面反射的干擾，而得到較低而正確的數值。

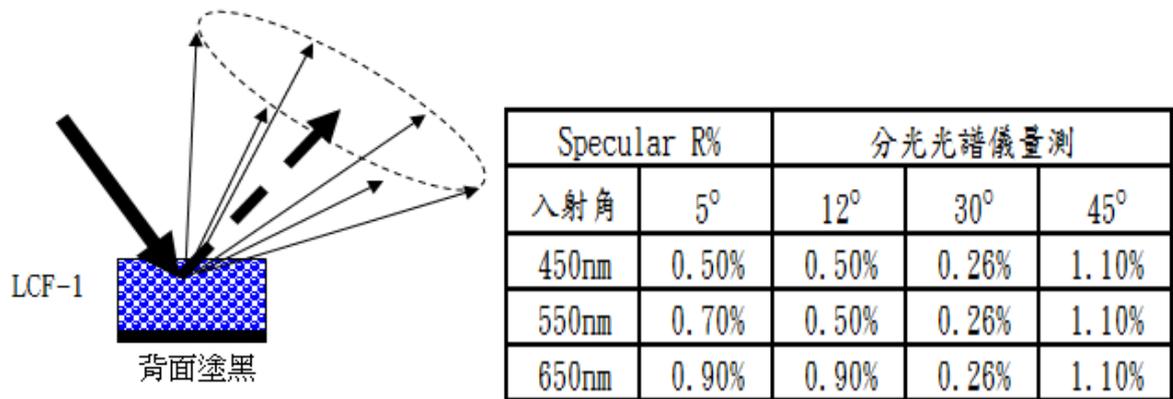


圖 4.12 LCF-1 背面塗黑的反射光量測

背面不塗黑的反射率，稍微高出有塗黑的數值，其中頗重要的是不管塗黑與否，低入射角度的反射率對於波長的改變並不明顯，由此可以確定量到的是沒有繞射角度的第零階光。

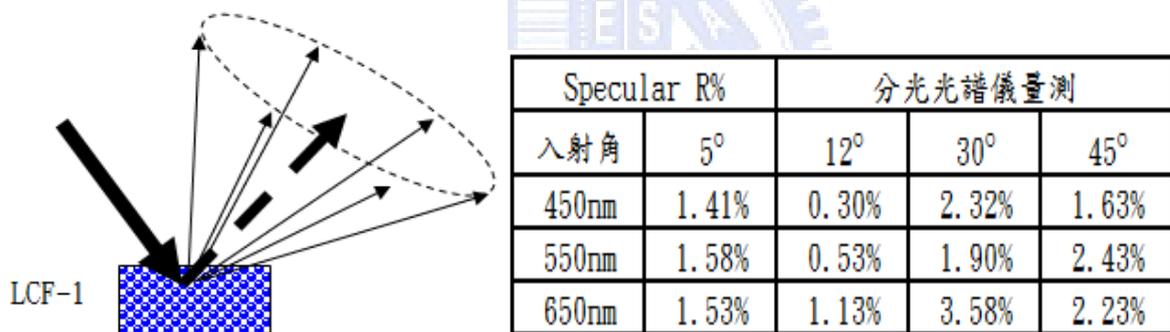


圖 4.13 LCF-1 背面不塗黑的反射光量測

將 LCF-1 緊貼於積分球進光孔(圖 4.14)，量測穿透光的百分率，並與 PET 塑膠基板作比較，以 450nm 的數值來看，1.41% (R%)加上 86.88% (T%) 僅有 88.29%，即有 11.71%沒有進積分球。光損失的程度，隨著波長明顯變多，到了 650nm 穿透率已經掉到 79.18%，推測應與繞射現象有關，紅色的繞射角過大，會從參考光的入口射出，變成損耗。

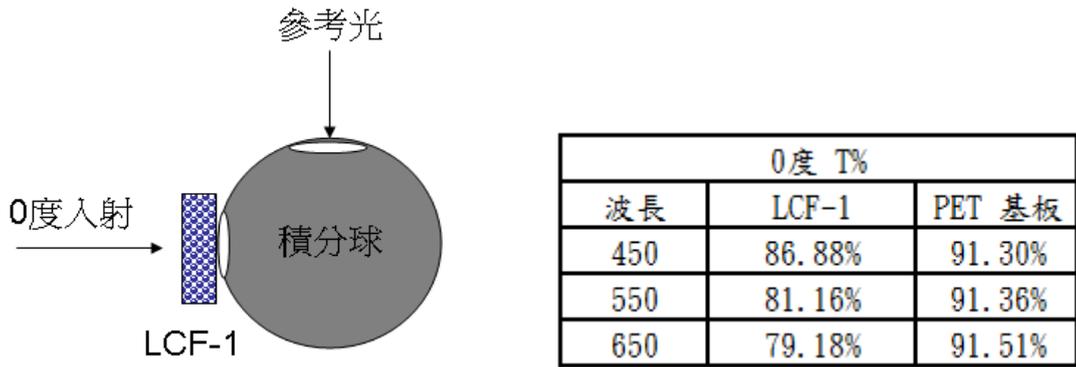


圖 4.14 LCF-1 的透射光量測

U4100 量測具有發散特性的光學膜時，常常只能量測主軸光的強度，對於發散光的部分有很大的誤差，但是若將人眼的瞳孔比擬為積分球的入射光孔，則人眼所見將類似於積分球量到光譜，因此有必要將各個面的穿透及反射率都量出來，以利後續的分析。綜合以上 LCF-1 光學膜的透反射量測數據，可以圖 4.13 簡單表示之：

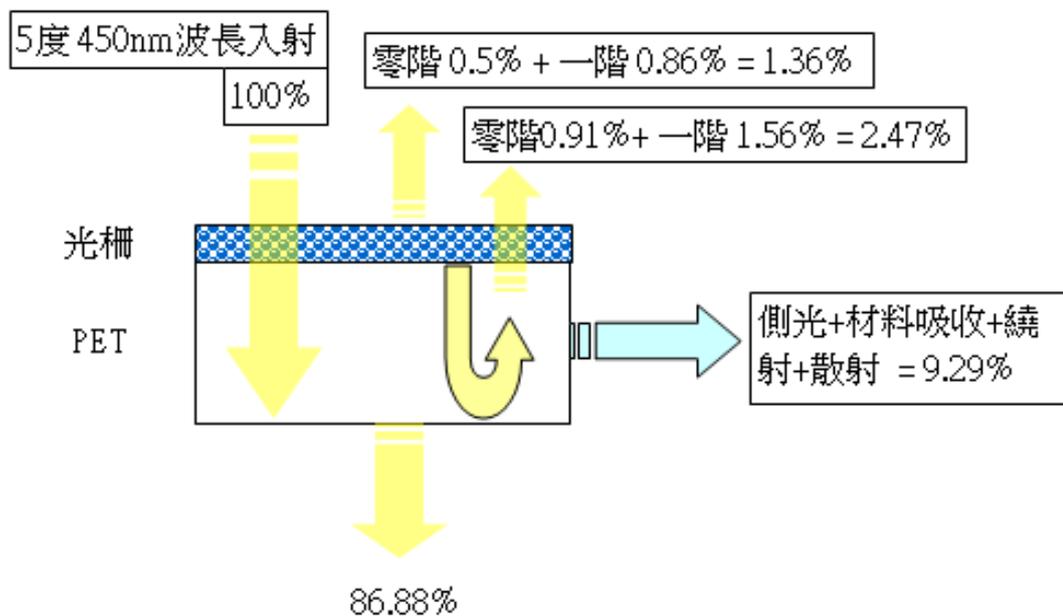


圖 4.15 LCF-1 穿透與反射百分率

4.2.3 LCF-1 背面為藍色膽固醇液晶的繞射現象

藍色膽固醇液晶貼上 LCF-1 光柵膜之後，反射光呈現一個如下圖示的變化，一階繞射光環繞著零階光形成 30 度光錐。

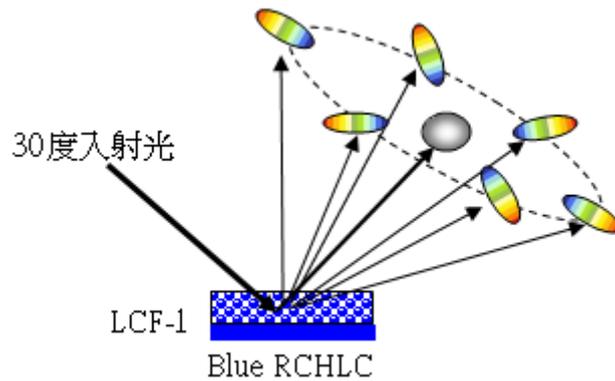


圖 4.16 LCF-1+RCHLC 於實體空間之光發散圖

量測 LCF-1+RCHLC 的反射光角分布與強度，並將各個主要繞射光點的燭光數值分別乘上面積，得到光強度分佈概況；每當光通過光柵層都會繞射分光一次，因此貼於反射式顯示器時，會通過光柵層二次而出現許多繞射光點，光點數目依入射角度與方位而有許多變化，類似萬花筒，頗為複雜。

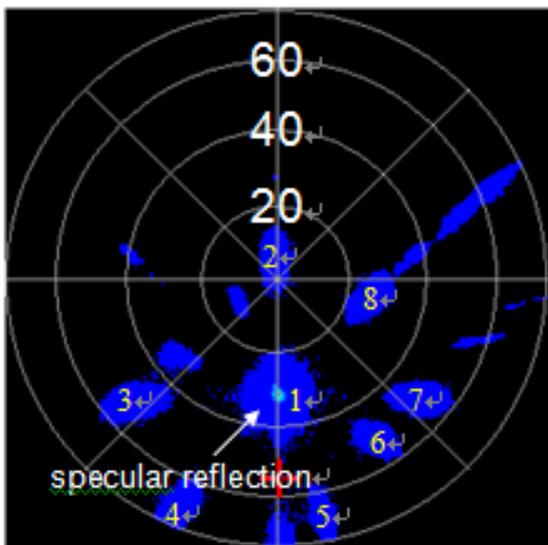


圖 4.17 RCHLC 貼 LCF-1 的光分佈

光點編號	$\text{Cd}/\text{m}^2 * \text{Area}$
1	96.4
2	12.0
3	15.7
4	26.3
5	6.8
6	9.2
7	14.3
8	12.6

圖 4.18 光點強度

4.3.1 LCF-1 背面為藍色膽固醇液晶的+1 階繞射強度

將圖 4.17 中間軸的光強度分佈擷取出來，並對視角作光量相關圖表(圖 4.19)，在 32 度的位置是光反射角的方向，有一個峰值為 $25.5(\text{Cd}/\text{m}^2)$ ，與貼膜前的峰值相當，而且波的寬度並沒有明顯變寬，表示第零階光的擴散度很低，指向性與原 RCHLC 相去不遠。另值得注意的是 0 度位置的峰值為 $1.16(\text{Cd}/\text{m}^2)$ ，只是繞射強度頗低，大約為標準白的三分之一，效果不佳。當觀察者調整顯示器與外部的光源成 30 度角時，直視顯示器即可以觀察到第一階的繞射現象(圖 1.3)。然而若顯示器與光源的角度不是 30 度時，還是不會有正向增亮的效果，這是單一光柵周期的結果，若需要 0 到 30 度都有繞射光，只需要增加光柵周期即可；同時，若是要擴大零階的主反射光的角度範圍，只需將光柵點的重疊區加大即可，因為光柵點重疊時會變成二維點陣列，但是繞射光的強度會變低。

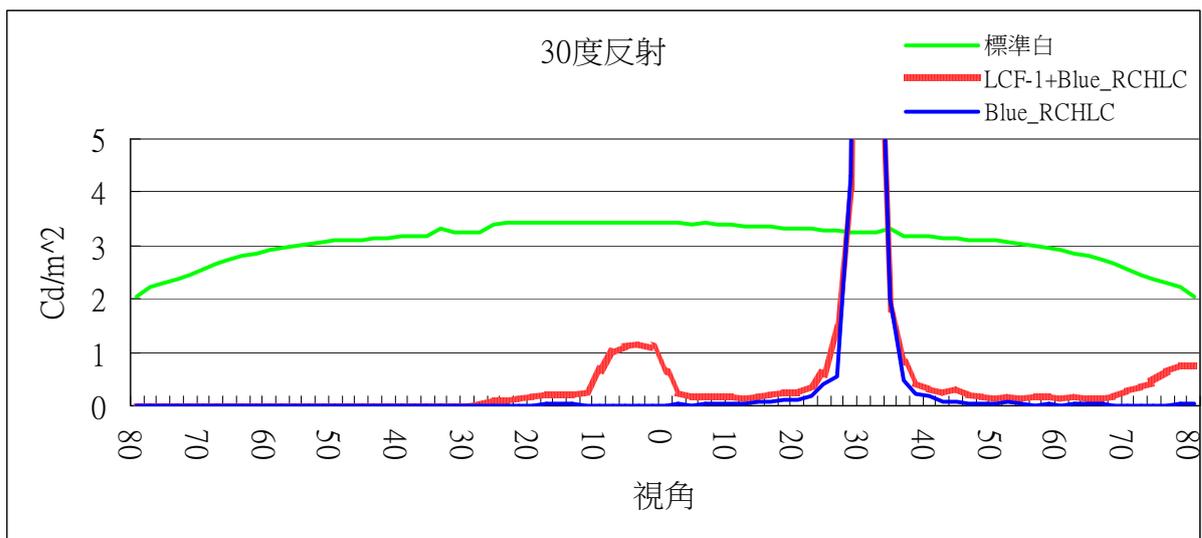


圖 4.19 LCF-1 貼於 RCHLC

4.3.2 與 Ag(銀)高反射膜貼上 LCF-1 比較

高反射銀膜類似理想反射面，對於不同入射光的角度與波長都有相同的反射率 94%，因此圖 4.20 中的” --Ag(R94%)_LCF-1_5deg” 一階繞射除上 0.94 之後，便是純鎢絲燈光源照在 LCF-1 的繞射光強度，若將橫坐標視角代入光柵公式(1.1)，即可以回推出各波長的繞射光強度。

觀察藍色膽固醇液晶貼 LCF-1 光學膜後的一階繞射強度值 2.84(32°)，與高反射且無色散 Ag 銀膜(R94%)貼上 LCF-1 後為 27.3(32°)比較，液晶反射率可以估算出 $2.84/27.3/0.94 = 11\%$ ，一階繞射 32° 的位置是對應到 0.55nm 波長，高出 2 倍左右，同時計算 26° 的 450nm 為 39.1%。另外值得觀察的是第零階 5° 位置，光強度峰值的比較結果為 $80/235/0.94=36.2\%$ ，此數值可視為藍色膽固醇液晶對於 5° 白光的反射率。

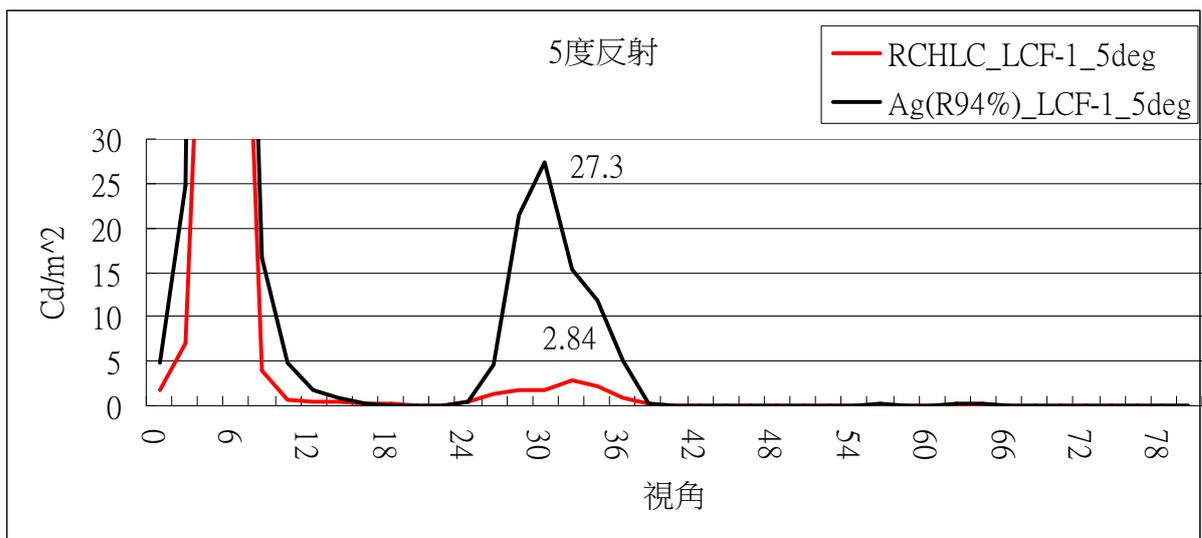


圖 4.20 膽固醇液晶 vs Ag 5 度貼膜比較

4.3.3 LCF-1 光學膜 30 度入射繞射效率模擬分析

在本節希望能解釋圖 4.19 之零度附近的一階繞射光強度值；先考慮在理想狀態下的一維光柵膜光學傳遞情形，以波長 450nm 且 30° 入射的狀況作光路圖，將可以到達觀賞者的光路以紅色線標示出來，各個穿透與反射繞射的數值以軟體(LightTrans VirtualLab™)計算求得，模擬條件為厚度 200μ 的 PET 膜，光柵周期 1.1μ，光柵深度 0.6μ。背面簡化為理想高反射面 (R100%)。根據圖示：入射光以 30° 入射於光柵面之後，第零階光以 19.4° 經由底部高反射面返回光柵，再次繞射分光後，+1 階 450nm 藍光以 5.2° 出射，其強度為入射光的 2.76%。

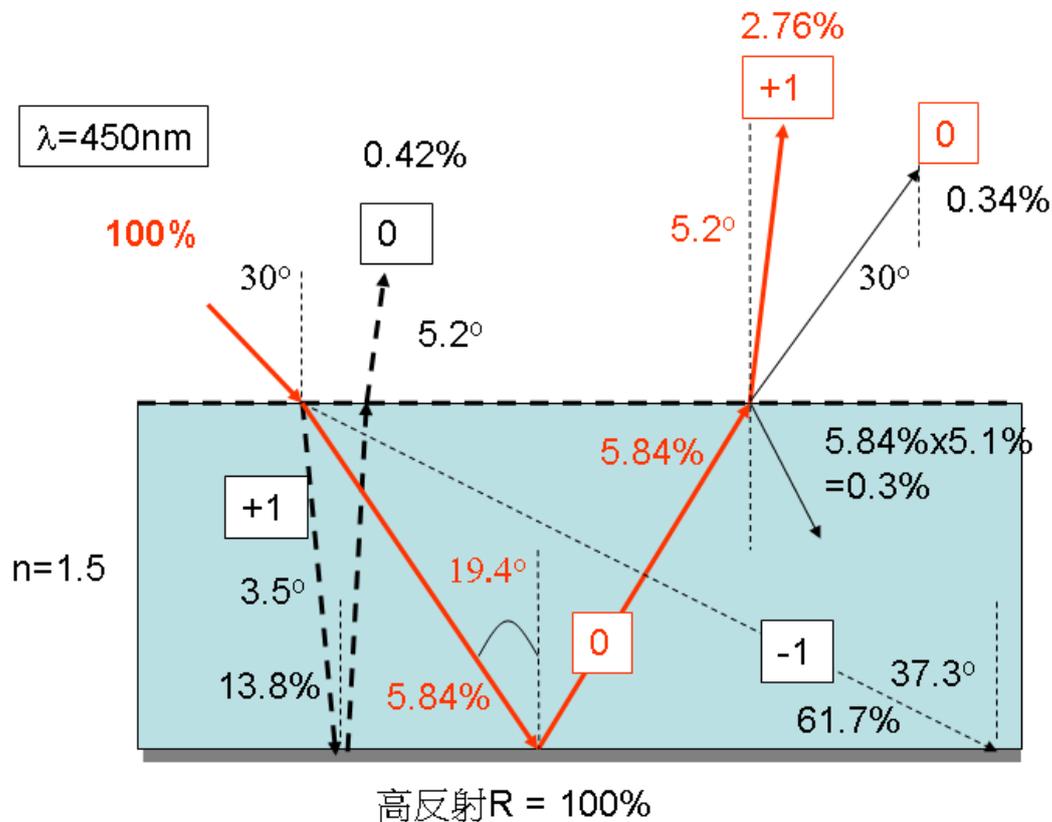


圖 4.21 450nm 30° 入射之光路圖示

當光柵膜製作成三向光柵點陣列時，任一個方向($0^\circ, \pm 45^\circ$)的光柵點都有第零階繞射，模擬繞射強度為 0° (5.84%)及 $\pm 45^\circ$ (3.16%)，在此先忽略此光柵旋轉方向的差異。光經過底面的反射層轉折後，朝向光柵面作第二次繞射，此時三個方向的光柵僅有光柵線條垂直於入射光的第一階繞射可以到達正向附近，在此定義為 0° 光柵點的+1 階繞射，因此其繞射的強度為第一次零階繞射的百分率乘上第二次+1 階繞射的百分率，將此模擬數值紀錄於表 4.22。

表 4.22 LCF-1 背面 R100% 高反射的正向一階繞射效率計算

30度入射	450nm	550nm	650nm
入射 (0階繞射%)	5.84%	19.98%	40%
出射 (+1階繞射%)	47.20%	35.50%	26.00%
出射光量 (+1階)	2.76%	7.09%	10.43%
出射角度 (+1階)	5.21°	0°	$(-)5.21^\circ$
出射光量 (0階)	0.34%	5.37%	20.81%

從數據上來審視，此+1 階繞射光在強度上的比重，出現紅色稍高且藍色偏低的情形，並且在整體數值都偏低，其原因與光經過二次繞射分光有關，以正弦光柵的 ± 1 階繞射效率平均約為 33%來看，經過二次繞射之後將剩下 $33\%*33\%=9.99\%$ ，與模擬值相去不遠。然而根據模擬數據顯示，只需要將光柵深度由 600nm 減低到 400nm，紅綠藍三色的+1 階繞射強度即可同時都接近 10%，在光柵製程上的僅需將雷射曝光時間調低，即可達成；但是在轉印時很難控制到這麼精準的深度，圖 3.12 可以詳細說明此誤差的範圍。

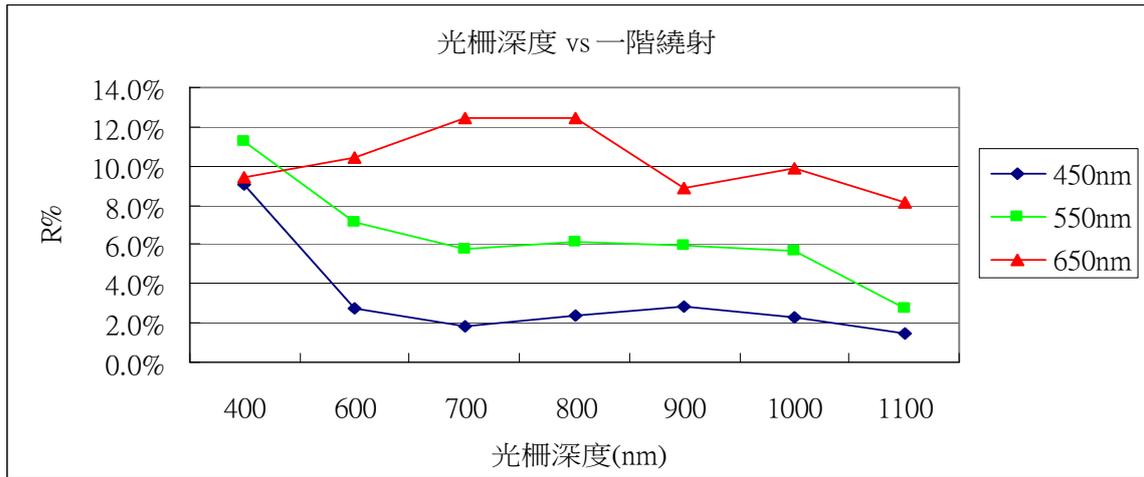


圖 4.23 模擬分析 30° 反射之一階繞射光強度 vs 光柵深度

以上僅就光柵部分的繞射效率作模擬，其他光柵點部位如：(1) 光柵重疊區 (2) 空白區 (3) 光柵深度變化；都會使計算與實際情形的一致性造成偏差，若同時將膽固醇液晶的反射特性一起考慮，將使整體的模擬數據完全與實際狀況偏離。因此根據圖 4.21 的光路圖計算的 LCF-1 的第零階反射效率，與以 U4100 光譜儀量測 LCF-1 貼於 Ag(R94%) 高反射膜之 30° 第零階反射光譜(圖 4.25)相比較，在趨勢上與表 4.22 的出射光(0 階)模擬計算結果相似，反射率均由短波長往長波長增高。

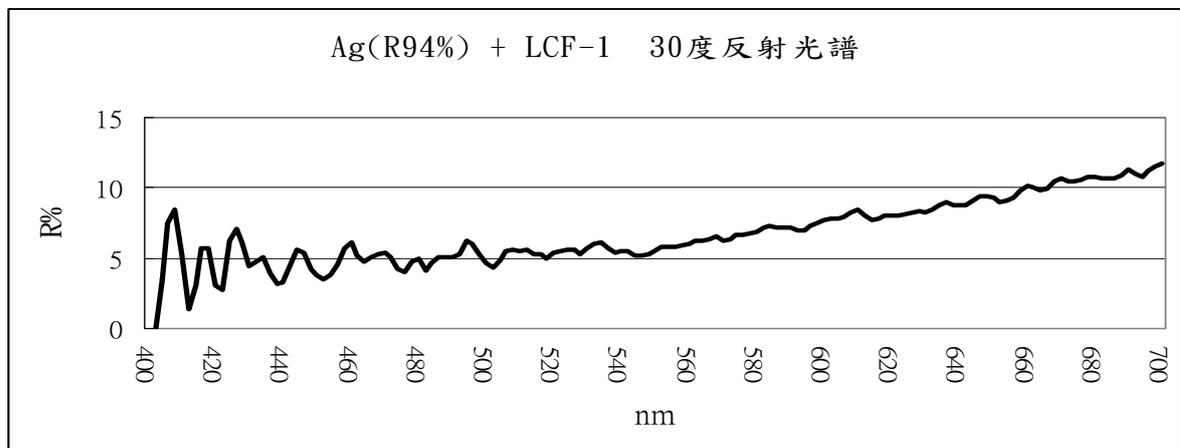


圖 4.25 Ag(R94%) + LCF-1 30° 反射光譜

表 4.22 中的 +1 階繞射的角度，為以綠色 550nm 為中心 $\pm 6^\circ$ 以內的彩虹光譜，若將波長 400~700nm 的一階繞射角都計算進來，為 $\pm 8^\circ$ 以內的張角。因此若在 LCF-1 上增加一層 5° 小角度擴散膜，即可將色散現象移除，原理為光經過二次擴散膜相當於通過一次 10° 擴散膜的效果；實際將擴散膜貼覆後的除虹效果如圖 4.24 所示。

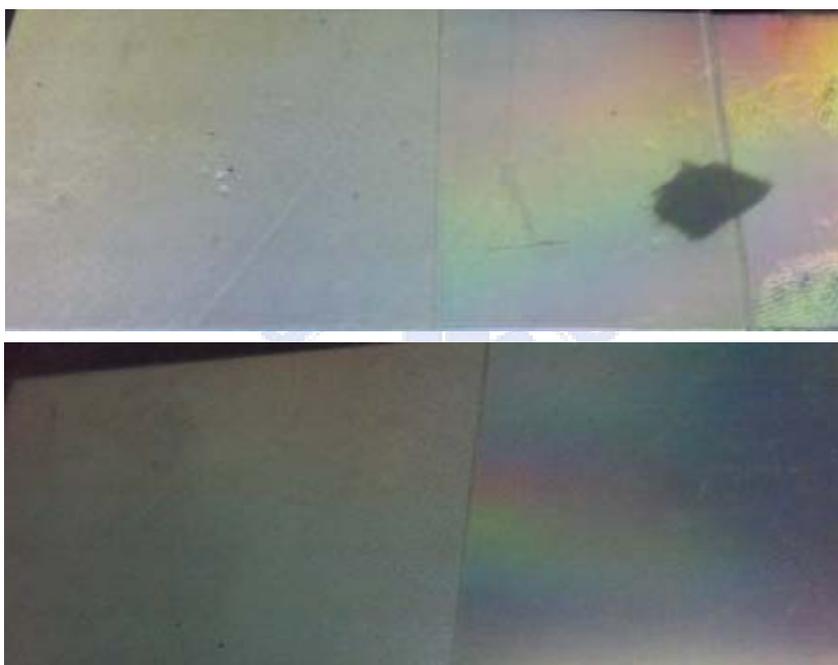


圖 4.24 5° 擴散膜/LCF-1/鋁反射膜

4.3.4 LCF-1 光學量測與分析結果回顧

1. LCF-1 的繞射效率的量測結果顯示出光柵在藍光 450nm 的一階繞射效率偏低，探究其原因為光柵深度達 $0.6\mu\text{m}$ ，與藍光波長的共振效果不大，若深度減為 $0.4\mu\text{m}$ ，藍綠色的繞射效率皆可以提升，其中 450nm 藍光部份提升最多可達 3 倍。

波長	深度 400nm	深度 600nm
450nm	9.1%	2.7%
550nm	11.2%	7.1%
650nm	9.4%	10.5%

圖 4.26 光柵深度 v. s 反射光+1 階繞射效率

2. 光柵重疊區產生的擴散效果，只對零階繞射光有效，一階繞射的彩紅現象很明顯，須要發散角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的擴散膜加以去除。
3. 一階繞射光到達可視區的涵蓋角僅有大約 $\pm 8^{\circ}$ ，需要加以擴大，將於下一章以 ASAP™ 模擬複合光柵結構的擴大效果。

第五章 改良 LCF-1 效率之光學模擬

本論文之雷射點矩陣干涉點陣列，在技術上受限於機械式雷射光干涉角的調整無法即時點對點變換，其結果是光柵周期的單一性；然而，未來的技術即將達到即時調控干涉點的光柵周期，其名稱為灰階式液晶光閥之雷射直寫光柵系統。因此，於本章先以光學模擬的方式，探討如何改善 LCF-1 的一階繞射的效率與可視區範圍。

5.1 ASAP™ 模擬軟體之引用

ASAP™ (Advanced Systems Analysis Program) 是一非序列式光學模擬軟體，常用於照明分析、光束追跡，其特點為以類似程式語言的方式，對光學系統的參數作差異化分析，例如：入射光角度、鏡面曲率大小、機構空間位置、光軸傾斜角等等，來找出光學系統的最佳值。

ASAP™ 用於模擬光的擴散分佈時，可以如圖 5.1 所示的方式，以半徑 3cm 的圓形天頂罩住 LCF-1，且球心的位置為 LCF-1，光打到球體表面時便會被記錄下來，每一個光點帶有相同的能量，在傳播的過程中，距離每增加一倍，單位面積的光點數目變成四分之一，因此半球的半徑不能太大，在此是設定球面半徑為待測物的 30 倍大，入射光直徑為 1mm。

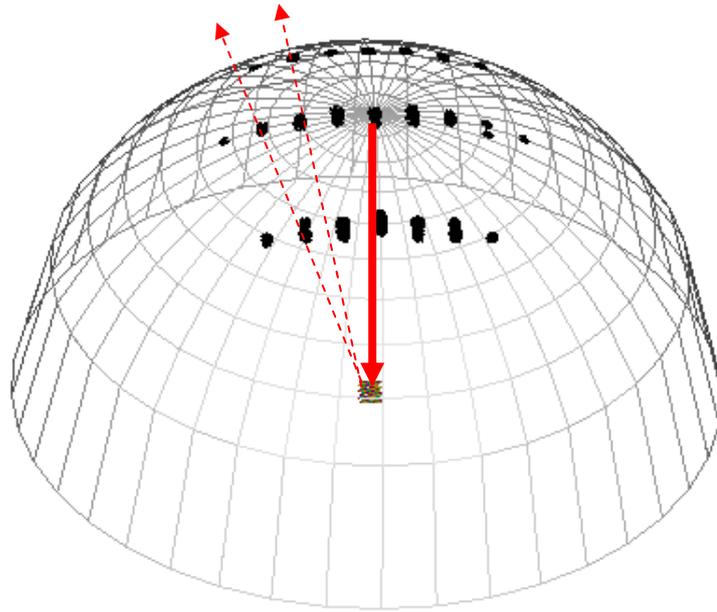


圖 5.1 半球形光分佈模擬

5.2.1 LCF-1 光學模型建構

本論文中的正弦光柵點陣列 LCF-1，由圓形直徑 $50\mu\text{m}$ 以 ± 45 度及 0 度三個光柵方向交錯形成等距陣列，光柵點的間隔為 $40\mu\text{m}$ ，光柵的形式為正弦且周期為 1.1μ ，繞射效率定為零階 40% ， ± 1 階 30% 。代入光柵繞射公式，算出第一階繞射角度為 $450\text{nm}(24.14^\circ)$ 、 $550\text{nm}(30^\circ)$ 、 $650\text{nm}(32.79^\circ)$ ，基板為厚度 0.2mm 的 PET 塑膠膜，折射率 1.495 ，背面定義為高反射面。

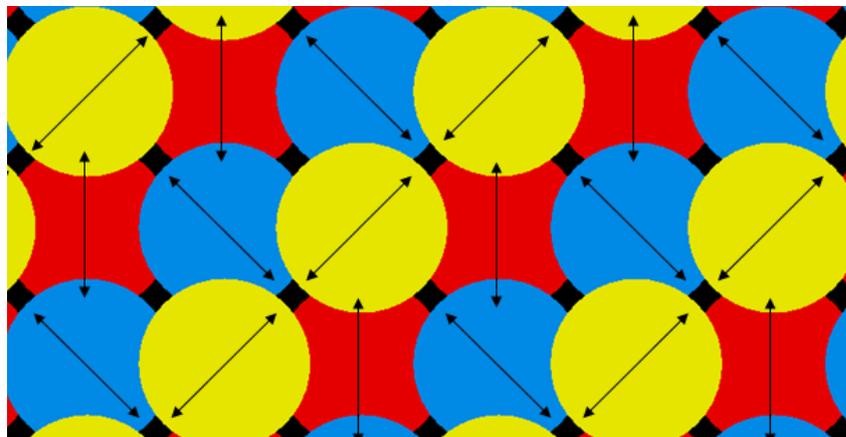


圖 5.2 LCF-1 圓形光柵點陣列模擬圖示

5.2.2 LCF-1 模擬結果與實際繞射圖案比較

任何的模擬均需要實物的驗證，使用雷射光波長 632.8nm，光點 1mm 直徑照射 LCF-1 的繞射圖案與模擬結果相比較(圖 5.3~5.5)，顯示 ASAP™ 的光束追跡可用於模擬光柵繞射的圖案；關於圖 5.3 中 0° 穿透各繞射光點的形成，以光學追跡逆推的方式，發現其來源與光柵點陣列的組成及排列方式有關：

- (1) 紅點： 0° 及 $\pm 45^\circ$ 光柵的第 0 與 ± 1 階繞射光點。
- (2) 外圍十字方位四個藍點： $\pm 45^\circ$ 光柵重疊區。
- (3) 中間小長方形四個藍點： $\pm 45^\circ$ 對於 0° 光柵重疊區。

光柵重疊區產生的繞射點，依照其光柵組合的方式，會有群組對應的關係，各光點之間的關聯性以紅色線圖示出來(圖 5.2)；二個 ± 1 階繞射向量的合向量即是新繞射點的位置；光點強度方面，由於光柵重疊的面積並不大，所以繞射點強度也不高。在應用上，當 $\pm 45^\circ$ 角可以變小時，圖 5.3 的重疊區繞射點均各自往 0° 一階繞射及零階無繞射區靠近。

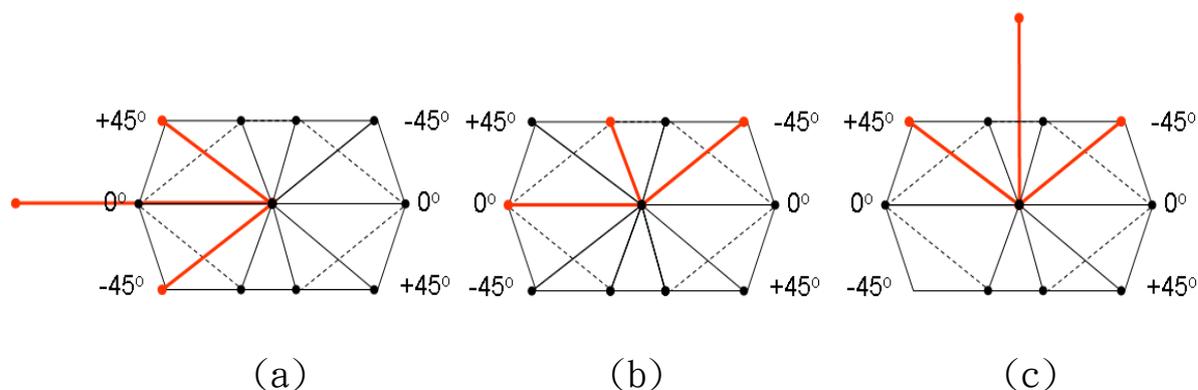
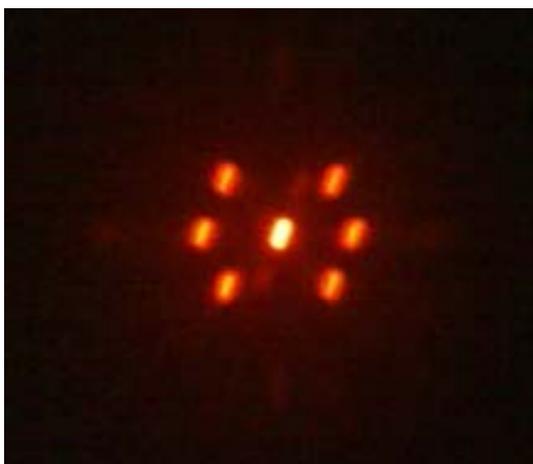


圖 5.3 光柵重疊區產生之繞射光點

LCF-1 繞射影像



ASAP™ 模擬 LCF-1 繞射

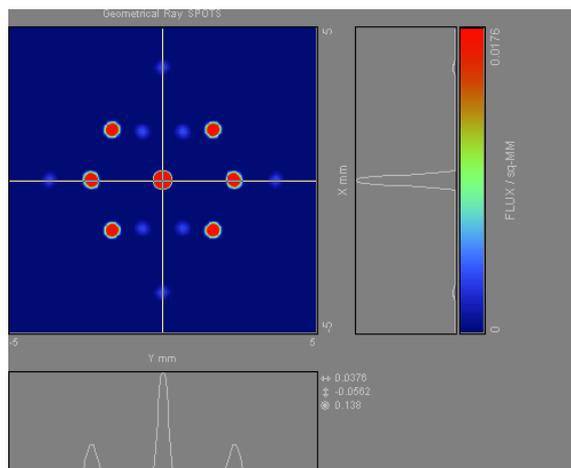


圖 5.4 LCF-1 的 0 度穿透繞射圖

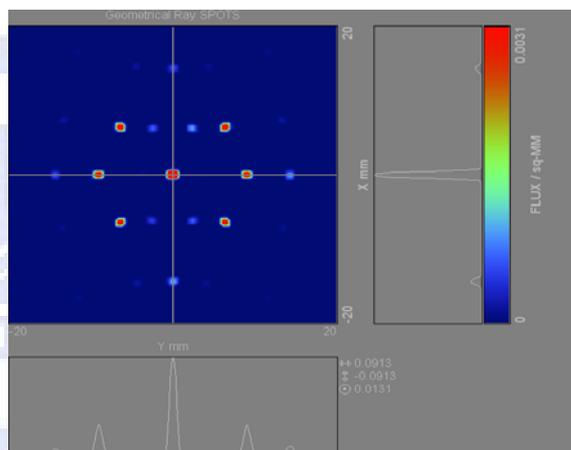
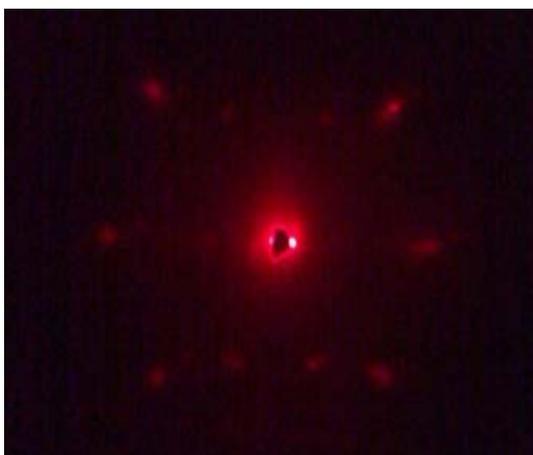


圖 5.5 LCF-1 的 0 度反射繞射圖

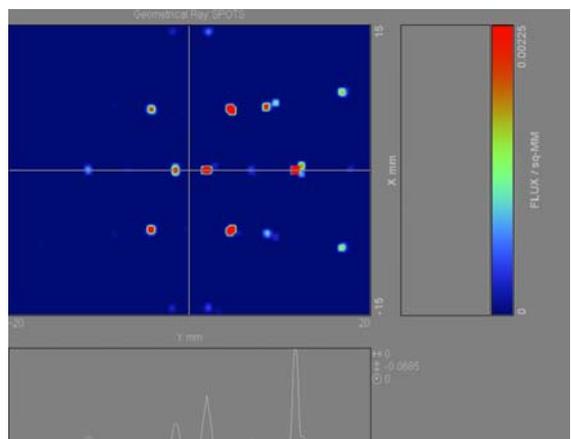
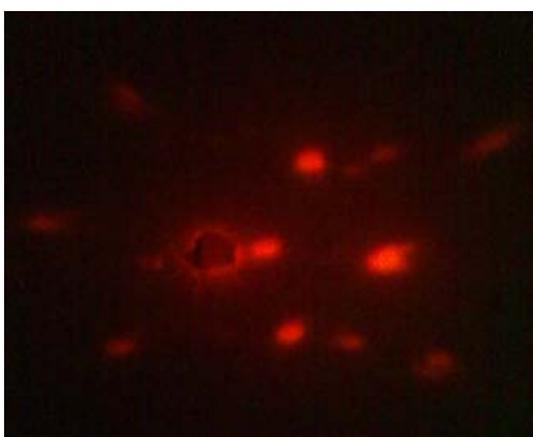


圖 5.6 LCF-1 的 30 度反射繞射圖

5.3 LCF-1 光柵外形與間隔對於一階繞射效率的影響

前節了解光柵重疊區對於繞射圖案的影響之後，本節將繼續探討光柵間隔對於一階繞射強度的影響。下圖左為本論文中的光柵點陣列，光柵點間距由 $40\mu\text{m}$ (左圖)增加為 $50\mu\text{m}$ (右圖)之後，光柵密度變低且重疊區消失：

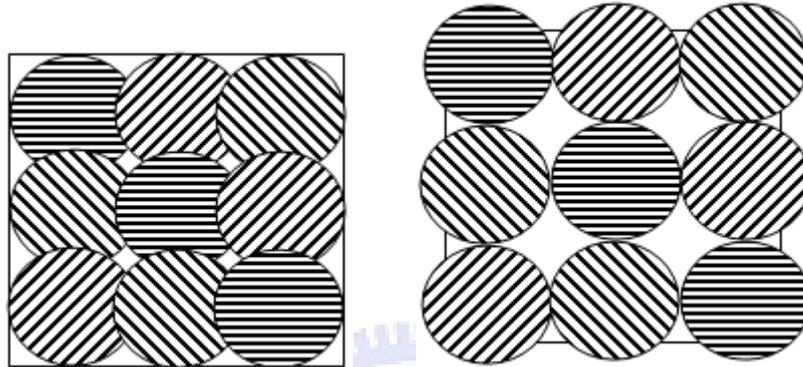


圖 5.7 光柵點陣列間隔變化

當光柵點間距改變時，可繞射區域與不可繞射區域的比例跟著改變，繞射現象本質上不會改變，因此可以比較光柵點間距變化對於一階繞射強度的影響；模擬的條件如下：

光柵方向	$0^\circ, \pm 45^\circ$
光柵周期	1.1μ
光柵數目	120×60 點
波長	550 nm
光束大小	$1 \times 1\text{ mm}^2$
追蹤光線間隔	5μ
入射角度	30°
接收面積	$2 \times 2\text{ mm}^2$
接收角度	$\pm 5.71^\circ$
接收距離	10 mm
一階繞射角	0°

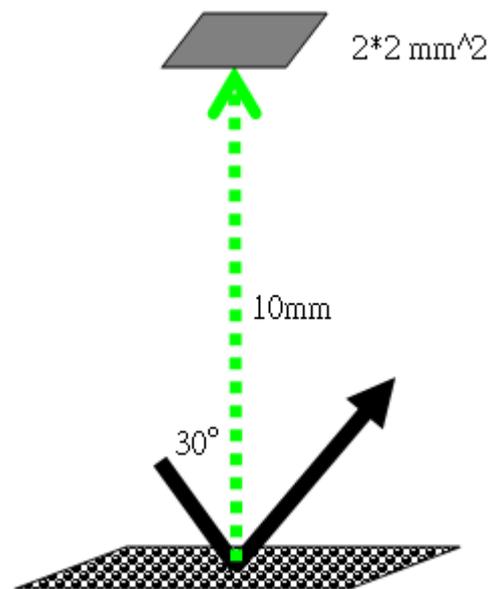


圖 5.8 光柵點間距模擬條件設定

觀察位於天頂 0° 正上方 $2 \times 2 \text{mm}^2$ 接收面上的光點分佈，總光形大小為 1mm^2 ，每一個黑點均來自光柵點的一階繞射，黑點間的空白區原為 $\pm 45^\circ$ 光柵點的位置，若空白區越多，則接收到的光量越少；反之，若黑點越多越密，即等於光量越多。

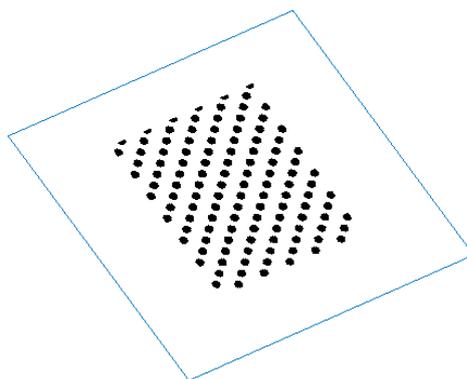


圖 5.9 550nm 0° 一階繞射光點分佈圖

將 LCF-1 的圓形光柵點間隔從 $30 \mu\text{m}$ 提高到 $60 \mu\text{m}$ ，並同時與方形光柵點作模擬比較，結果是具有較密集排列的 $50 \mu\text{m}$ 方形光柵其一階繞射光強度可以達到最高，並且隨著光柵點密度降低而降低。當光柵間隔小於光柵點而有重疊區時，圓形 $40 \mu\text{m}$ 的反射率下降較輕微，原因為光柵交會區的面積比方形光柵小。

表 5.10 LCF-1 改變光柵形狀與光柵點間隔對於一階繞射強度的影響

光柵間隔	圓形 +1階反射率%	方形 +1階反射率%	光柵密度
30μ	0.5	0.44	999 點/ mm^2
40μ	5.09	4.06	625 點/ mm^2
50μ	7.39	8	400 點/ mm^2
60μ	5.21	6.45	277 點/ mm^2

5.4 複合式多光柵周期與方向之干涉點陣列

方形 $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$ 光柵點以間隔 $40\mu\text{m}$ 排列的時候，有以下二項優點：

(1)光柵點間沒有空白區(2)重疊區面積比圓形光柵大。本節將以此排列方式，對光柵點陣列作延伸設計，其中增加的項目為：

(a)增加光柵周期：由 $1.1\mu\text{m}$ 增加為 $1\sim 1.3\mu\text{m}$ ，共四種周期。

(b)增加光柵角度：由 $0^\circ\pm 45^\circ$ 改為 $-20^\circ\sim 20^\circ$ ，每 2° 一個，共有 21 種角度。

光柵種類增加以後，需要 $4\times 21=84$ 個光柵點以亂數排列方式來組成，根據表 5.10 的計算，方形光柵間隔 $40\mu\text{m}$ 的光柵密度為 $625\text{點}/\text{mm}^2$ ，因此平均每種光柵在單位釐米平方的密度變為 $625/84=7.44$ 個。當入射光以 550nm 波長 $\theta=0^\circ, \phi=0^\circ$ 照射於此光柵陣列時，其一階繞射的角度變成 $-2.8^\circ\sim 4.4^\circ$ ，等於增加了 7.2° 的範圍，橫向方面則為 $-20^\circ\sim 20^\circ=40^\circ$ 的範圍。

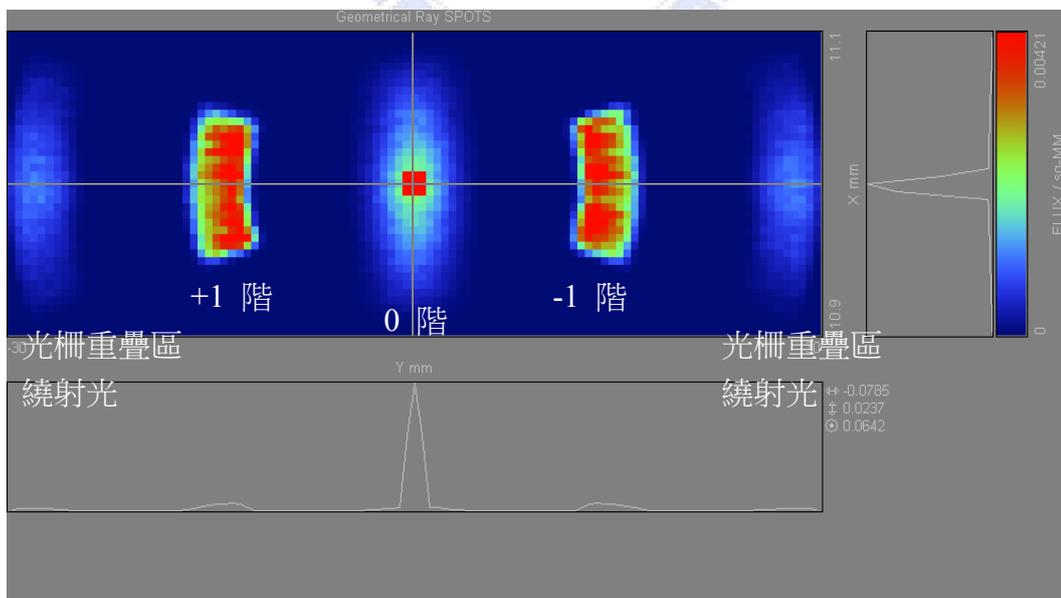


圖 5.11 $1\sim 1.3\mu$; $-20^\circ\sim 20^\circ$ 複合式光柵模擬

圖 5.11 的模擬結果顯示了擴大的一階繞射區，但是強度也大幅的減低了；同時，光柵重疊對於零階無繞射光的擴散效果，也可以從模擬中看出來。

將入射光改為 $\theta=30^\circ$ 後，原本繞射方向為 -30° 的+1 階光剛好移到 0° 區域，而 0 階反射光移到 $+30^\circ$ 的位置，如圖 5.12 中+1 階的扇形區域所示：

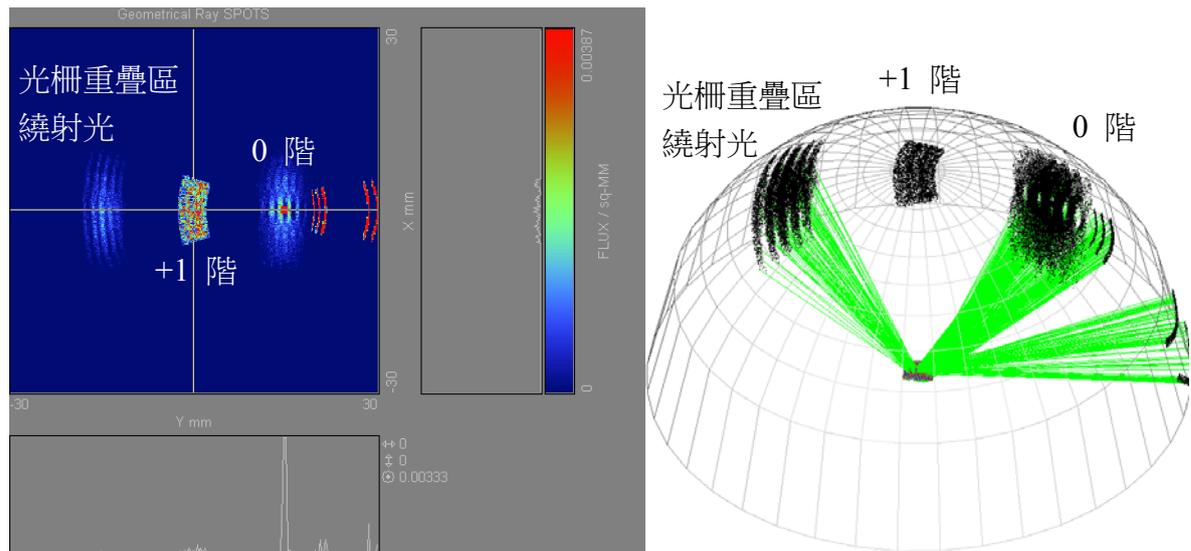
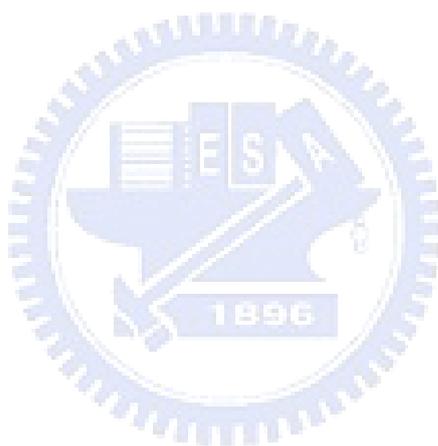


圖 5.12 多向光柵的 30° 入射繞射模擬

以上模擬光柵點陣列的繞射效果是以單波長 550nm 綠光，其一階繞射剛好位於 0° 位置，其他可見光以此為中心散落在 $-5.2^\circ \sim 5.2^\circ$ 之間，在 ϕ 角方面則都是一樣落在 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 之間；各個繞射階之間的區域只要增加光柵周期，即可將光繞射到這些空白區，但是會增加製作上的難度，因此若能將光柵的製作方式，由雷射光干涉點改為數位式灰階光罩，直接將光柵線條寫入，即可達到任意形式的光控制膜。

5.5 光學模擬後語

本章運用 ASAP™ 以幾何光學追跡的方式，模擬 LCF-1 光控制膜的繞射光點分佈，其模擬結果與實際繞射圖案頗為一致。接著根據此模擬結果，將原始的光柵點陣列形式作空間佈局調整並觀察其影響的結果，經由此模擬過程，一步一步將 LCF-1 的結構作優化。當然最後得到的模擬結果不一定就是最完美的答案，而是有待更多的實際驗證才能確定模擬出來的效果的真實性。



第六章 結果討論與未來展望

6.1 正弦光柵低反射特性

經由本實驗製作出來的多向正弦柵點陣列光學膜片，在製程上是已經發展完全的技術；然而在微結構圖案的設計上仍有發展的空間，搭配市售的光學模擬軟體，可以做出許許多多的光彩變化，這些圖案可以在一些製作全像圖的公司網站找到，以國內而言為光群雷射公司。不同的雕刻技術，所製作出來的微結構，會有各自的差異點，正弦光柵的表面起伏，以等效折射率的觀點來看，與折射率漸變膜的概念相通，從低折射率過渡到高折射率的膜層結構是相似的，因此在光阻厚度的選擇上，可以波長 550nm 的四分之一為相厚度，使可見光區的反射率降低。

6.2 光控制薄膜功能優劣因素

要達成提高反射式顯示器的光利用效率，可以從改善顯示材料的光學性質著手，然而當顯示器本身的架構已經確定的時候，將無法再提高光利用效率，此時就必須採用增加外部的光學元件，且不更動原本的顯示器。繞射光控制薄膜應用於一般的反射式顯示器時，可以有二種方向的光可以利用：(1) 零階繞射 (2) 第一階繞射。運用(1)時需儘量將光源的位置放在符合光反射角的位置，觀賞者亦必須位於與此反射角相當的位置，然而此

時的光強度頗高，造成過亮的反射，因此光學膜需具有擴散膜的勻光效果。當光學膜具有繞射結構時，在第一階繞射的角度可以提供額外的可視角，本實驗中的一階繞射強度僅有標準白的 30%。

貼附光控制膜於黑色背景的区域有觀察到稍為白化的現象，經過推測應該是光穿過微結構時產生了散射光所致，並且有部分的光沒有達到黑色的染料層吸收掉，而是返回到入射的方向，若能減少向後擴散的光，即可減少白化的現象，根據文獻記載^[17]，光柵結構的散射光來自：(1)缺陷 (2)結構平整度 (3)光柵間隔一致性；其成因有光阻塗佈產生氣泡、光阻填充率不佳、剝膜時分離不完全、灰塵、表面平整度、光柵周期誤差等等。本論文的 LCF-1 為”光柵點”陣列，存在著很多不連續的光柵間隔，因此(3)為主要的散射光來源。

6.3 未來工作與展望

在本論文的實驗中，研究雷射干涉點陣列製作光控制膜的效果，其光柵形式屬於可以大量複印的表面結構，在執行光柵點打點的過程中發現以下問題：

- (1) 光柵周期的控制上仍是傳統的機械方式，因此無法在每次雷射打點的時候變換光柵周期。
- (2) 光柵旋轉角的控制同上。

因此目前的設備並無法將光柵點陣列作更多的變化，未來若是能以即時的控制方式，變換光柵方向與周期，即可以驗證第 5 章模擬的結果。另一個需要解決的是光學膜的光散射現象，根據光柵繞射效率模擬的結果與參考文獻記載，提出以下想法：

- (1) 光柵深度:光柵周期=0.4:1.1 時，一階反射穿透繞射效率可以達 9%。
- (2) 光柵不連續造成的散射現象，可以將 DOT-MATRIX-WRITER 的雷射能量分佈作中高外低的高斯或餘弦分佈，且外緣的光柵深度需接近零，可以將光柵周期不連續現象減低。

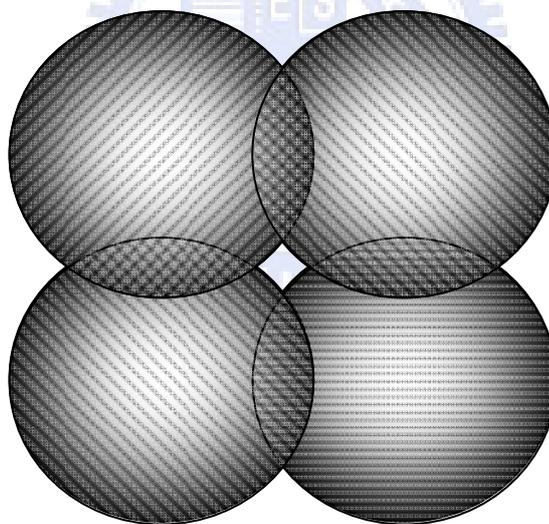


圖 6.1 光柵深度漸變式干涉點陣列

參考文獻

- [1] Seung Ryong Park, et al. "Grating micro-dot patterned light guide plates for LED backlights" , Optics Express, Vol. 15 Issue 6, pp.2888-2899(2007).
- [2] Samuli Siitonen, et al. "White LED light coupling into light guides with diffraction gratings" , Applied Optics, Vol. 45, Issue 12, pp.2623-2630 (2006).
- [3] Roberto Caputo, et al. "Short period holographic structures for backlight display applications" , Optics Express, Vol. 15 Issue 17, pp.10540-10552 (2007).
- [4] Eri Miyamoto, et al. "Novel diffraction grating light guide for LED backlight" , SPIE, Vol. 6488,64880H(2007).
- [5] Yi-Pai Huang, Han-Ping David Shieh, and Shin-Tson Wu. " Applications of multidirectional asymmetrical microlens-array light-control films on reflective liquid-crystal displays for image quality enhancement" , Applied Optics, Vol. 43 Issue 18,pp.3656-3663(2004).
- [6] 黃乙白，「應用微型光學元件於提升攜帶式液晶顯示器之影像品質」，國立交通大學，博士論文，民國 93 年。
- [7] Komatsu Tokutarō, Hitachi Chemical Co.Ltd. " Grating-Based Optical Film For High-Efficiency Backlights", SID '07, p62(2007).
- [8] Kiyoshi Minoura,Sharp. "Micro Coner Cube Array, Method Of Making The Micro Cube Array, And Display Device " , U.S. 73,609,07 B2(2008).
- [9] C.-J. Wen, et al. "Comparison between Reflective LCDs with Diffusive Micro Slant Reflector (DMSR) and Bump Reflector" ,SPIE,Vol. 4079,p191-200(2000).

- [10] 陳鈺雯，「量測與電腦模擬雙穩態反射式聚合物穩定膽固醇液晶的反射特性」，國立成功大學，碩士論文，民國 91 年。
- [11] Joseph W. Goodman, Introduction To Fourier Optics, 3th ed, Roberts & Company, Colorado(2005).
- [12] James E. Harvey, Andrey Krywonos, and Dijana Bogunovic. " Nonparaxial scalar treatment of sinusoidal phase gratings" , J. Opt. Soc. Am. A ,Vol. 23 Issue 4,pp.858-865(2006).
- [13]M. G. Moharam ,T. K. Gaylord. "Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings", J. Opt. Soc. Am.A,Vol. 72 Issue 10 ,pp.1385-1392 (1982).
- [14]M. G. Moharam, Eric B. Grann, and Drew A. Pommet. " Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings" , J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 12 Issue 5,pp.1068-1076 (1995).
- [15]Bernard Kress, Patrick Meyrueis ,Digital Diffractive Optics , 1st ed, Wiley (2000).
- [16]Wen-Chung Chang, et al. "High-resolution periodical structure on polycarb-onate using holographic interferometry and electroforming process" , Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials, Vol.8 Issue 3, pp.1243–12 46(2006).
- [17]Christopher Palmer, Erwin Loewen, Grating Hand Book , 4th ed,Newport (2006).

附錄一：

