

特殊型反射式彩色光柵的設計與製作

Design and fabrication of the special reflective color grating

計劃編號：NSC 90-2215-E-009-076

執行期限：民國 90 年 8 月 1 日至民國 91 年 7 月 31 日

計畫主持人：陸懋宏 國立交通大學光電工程研究所

一、中文摘要

光柵和濾光片都是光學上常用的分光元件，但利用濾光片時，普遍存在效率不佳的缺點，此一效率不佳的問題使得整個機構需要更強的光源才能達到足夠的光強度。本論文為設計一分色光柵，應用於單片式液晶投影系統當中，以改善使用濾光片的缺點。在光柵的分析上，過去所用多為標量繞射理論，但在光柵週期和光波長十分接近時，此理論已無法精確的分析預測繞射效率，故改以嚴格耦合波理論為基礎，並建構光柵模擬程式，利用程式模擬出光柵繞射效率最佳時的參數。製作上由於設計的光柵線寬相當細小，所以利用電子束微影的製程技術來製作光柵；根據設計的光柵參數，我們製作出四階表面刻紋型光柵，最小線寬達到 $0.15 \mu\text{m}$ 。而最後對光柵繞射效率量測的結果我們證明出嚴格耦合波理論的正確性。

關鍵詞：分色光柵，嚴格耦合波，

電子束微影

Abstract

Gratings and filters are both commonly used for separating light in optics, but the efficiency of filters for separating light is generally not good. So the system with the

filter needs more power of light in order to have enough light intensity. In this thesis we designed a color-grating, instead of the filter, to separate light. With the color-grating we can increase the efficiency to 80%.

Since the line-width of the grating is same order of magnitude as the wavelength of light, instead of the simple scale diffraction theory, we have to use the rigorous coupled-wave theory(RCWT) for calculation of the grating efficiency. So an optimization program by the RCWT is made for determining the structure parameters of gratings and environment parameters, such as line-width, the depth, incident angle...etc. The line-width of our gratings is so small that we made them with E-beam lithography techniques. We have made four-level gratings with line-width about $0.15\mu\text{m}$. Finally, we measure the diffraction efficiency of the grating and show that the RCWT is correct.

Keyword: Color-grating,

Rigorous coupled-wave theory,

E-beam lithography

二、緣由與目的

在單片式液晶投影顯示系統中，利用彩色濾光片作為分光元件是主要的方式，濾光片之穿透效率不高再加上孔徑比率的關係，使整體效率不超過30%，這是濾光片的最大缺點，而且由於濾光片為穿透式會使系統有發熱的問題，當系統散熱不良將使機器壽命縮短。利用反射式光柵加上微透鏡(micro lens)作為投影系統的分光元件稱為分色光柵法(Color Grating MethodTM)。[3]本論文將著重於分色光柵的設計上，而光柵形式為一維表面刻紋型平面光柵。

在過去，大多使用標量繞射理論來分析光柵的繞射效率，而在現今光學元件已日漸走向微小化的情況下，標量繞射理論已不能夠再繼續處理這類問題，在光柵週期與光波波長接近或更小的情況下，標量繞射理論已無法適用，所以我們採用向量繞射理論之嚴格耦合波理論[1]，來模擬分析一維光柵的問題。

嚴格耦合波理論是 M. G. Morharam 和 T. K. Gayload 於 1981 年提出，但是此一理論並不容易用於計算機的處理，在此之後有人提出不少數值處理的方法，我們採用的是 1994 年 Chateau 提出的迭代方法[2]。我們使用 MatlabTM 撰寫 Chateau 迭代法之模擬程式來分析一維光柵。

光柵所用的材料以矽晶圓為基板，表面鍍上鋁膜以增加反射效率；由於所設計的反射式表面刻紋型光柵線寬相當的細，無法使用光學微影(optical lithography)製程製作，故採用電子束微影(E-beam lithography)[5]的技術來進行曝光的工作，電子束微影的技術可以製作出 $0.1\mu\text{m}$ 的最小線寬，且具有直接曝光不需製作光罩的優點，對實驗的進行具有相當的便利性。蝕刻上我們使用變壓耦合式蝕刻機

(Transformer Coupled Plasma, TCP)[6]完成蝕刻工作，經過多道光罩製程後，將矽晶圓鍍上鋁膜即完成光柵成品，並進行量測。

三、光柵的設計

影響光柵繞射效率的參數包含：光柵本身的參數如：光柵週期、光柵材料折射率、光柵的深寬比(aspect ratio)、工作週期(duty cycle)、光柵外型輪廓等；環境參數則有入射光波長、入射角及其他限制因素等；我們撰寫之模擬程式能夠模擬一維光柵各階出射的繞射效率關係。

首先我們列舉幾個光柵模擬的例子：光柵為二階石英基板，入射光波長 $0.6328\mu\text{m}$ (TE 模)，入射角 30 度，光柵週期等於波長，我們分析其它參數對效率的影響。光柵深寬比對於繞射效率為如圖一之模擬結果，是呈現週期性的變化。而工作週期的關係如圖二所示，可看出工作週期在 0.4~0.5 的範圍能產生最高的繞射效率。而光柵剖面形狀對繞射效率的關係如表一，可以看出：相對應的繞射效率以階數越高其效率也越高，我們也可看出在十六階的情況下已經很接近平滑型剖面形狀的繞射效率。環境參數對繞射效率的影響有如圖三之入射角對繞射效率作圖，但沒有明顯的關係；至於光柵材料和入射光波長影響光柵折射率，折射率不同隨之改變電容率的值，影響繞射效率。

分色光柵之其他限制條件：為了搭配液晶面板因此必須滿足選定之紅、綠以及藍、藍光波長之出射角度差相同的條件。由光柵方程式(the grating equation)可以看出：在相同的入射角及光柵參數下，相同階數的繞射角隨著波長的不同而不同，也就是波長影響繞射角。如果想讓紅綠藍三色光垂直對稱 γ 角出射，我們可以

由光柵方程得到三個方程式，結果為：紅、綠和藍、藍光的波長相差必須相同，且必須滿足最大張角限制：

$$\gamma < \arcsin \left[\frac{1}{\lambda_2} \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_3}{2} \right) \right]$$

才能滿足垂直對稱出射，其中 λ_1 、 λ_2 及 λ_3 分別為紅綠藍光的波長。

若是三色光傾斜對稱 6 度角出射時，我們也可以得到三個方程式：

$$\sin(\beta + 6) + \sin \alpha = \frac{\lambda_1}{\Lambda}$$

$$\sin \beta + \sin \alpha = \frac{\lambda_2}{\Lambda}$$

$$\sin(\beta - 6) + \sin \alpha = \frac{\lambda_3}{\Lambda}$$

其中 β 為綠光繞射角， Λ 為光柵週期， α 為入射角， λ_1 λ_2 λ_3 為紅綠藍光波長。這裡方程組是反射式光柵的情況，我們已先選定+1 階光及張角 6 度。我們想要找出：在如何的紅綠藍三色光波長範圍下，能夠滿足上述聯立方程組的解，解有入射角、光柵週期和綠光繞射角。我們選定紅光範圍為 0.62~0.67 μm ，綠光 0.5~0.55 μm ，藍光 0.45~0.49 μm ，找出三個波長有解的範圍，圖四為以紅綠藍光波長為座標軸之解範圍，三角形平面將空間分成右下方有解區和左上方無解區；圖五為藍光波長為 0.46 μm 時圖四之切面圖，我們可以由一系列這樣的作圖判斷出三色光必須如何的選取，才能滿足在某張角下傾斜對稱出射的條件。

量測上我們選擇紅綠藍光雷射為光源，波長分別為 0.6328 μm 、0.5435 μm 及 0.4886 μm ；我們發現三色光並不在有解的範圍內，因此這樣的組合無法達到三色光對稱出射的目的。因此令紅、藍光角度差 12 度，使紅綠光一階角度差 7.43 度，綠藍光一階角度差 4.57 度，這樣可以得到光柵

方程組的解：光柵週期 0.6898 μm ，入射角 53.7 度；經過程式模擬得到：光柵輪廓為左四階(如圖六)時效率最佳，由深度對效率關係圖(如圖七)可知深度在 0.4 μm 時三色光效率各大約為 60%。其中光柵分階之工作週期由上到下分別為 1/6、1/2 和 5/6，而分四階為製作上之考量結果。

另外我們設計以繞射效率之提高為目標來作設計(如圖八)，我們找出光柵週期為 0.9 μm ，入射角為 15 度，由圖八可看出在深度為 0.36 μm 時，繞射效率可以達到 80%。這裡光柵輪廓同樣為左四階，計算出之紅綠光一階角度差為 6.19 度，綠藍光一階角度差 3.69 度，這組為我們實驗之光柵設計。

實際投影系統使用之光源為連續譜線之超高壓汞燈(UHP™)[4]，我們以較強的譜線為選取之波長，由圖九可知藍光譜線為 0.44 μm 、綠光為 0.55 μm 而紅光則沒有較強之譜線，我們以光學設計選擇之 0.61 μm 作為紅光波長的代表。這組三色光波長落於張角 6 度之有解範圍內，由方程組可得到光柵週期 4.6 μm 、入射角-60 度及綠光繞射角 80 度。由圖十可看出在深度為 0.41 μm 時，繞射效率為 52% 左右；這裡光柵輪廓同樣為左四階，紅綠和綠藍光各相差 6 度出射角。

製作上我們各實驗一組二階和四階光柵。二階光柵的參數為：光柵週期 0.9 μm 、入射角 30 度、工作週期 0.5，紅綠光一階角度差 6.19 度，綠藍光一階角度差 3.69 度，由圖十一可看出深度 0.16 μm 時，繞射效率約在 55% 左右。而四階光柵為以效率作考量之光柵設計，光柵參數前面已經詳細敘述過。

四、實驗結果與討論

實驗上我們已製作出二階與四階光柵，二階光柵線寬為 $0.45\ \mu\text{m}$ ，四階光柵之最小線寬為 $0.15\ \mu\text{m}$ ，圖十二為四階光柵之電子顯微鏡圖。製程上我們使用國家奈米實驗室(NDL)之電子束微影來作曝光，配合自動化光阻塗佈與顯影系統(Trek System)之黃光機台作光阻塗佈、顯定影等製程步驟，再以變壓耦合式電漿蝕刻機(TCP)作蝕刻的動作，我們發現能得到良好的平坦度與精確的蝕刻深度，最後在晶圓鍍上鋁膜後即完成光柵的製作。

量測上我們以 $0.6328\ \mu\text{m}$ 、 $0.5435\ \mu\text{m}$ 及 $0.4886\ \mu\text{m}$ 雷射光為紅綠藍三色光波長，這也是設計時所選用的波長，量測架構如圖十三，經過偏振片、空間濾波器與透鏡後，測量各入射角的繞射效率，並和模擬的結果相比較，表二和表四分別為二階和四階的繞射效率量測結果，表三和表五為二階和四階之理論值。

和理論相比較後發現誤差都在 10% 以內，因此嚴格耦合波理論計算光柵的繞射效率相當的可靠。然而有幾點問題需討論：(1)計算上電容率表示式經由傅利葉展開，將光柵視為無限延伸，此是理論上的缺陷因為實際上不可能有無限延伸的光柵；(2)製程上光柵的線寬誤差，原因除了曝光之外，因為經過多層對準(overlay)一定會產生誤差，曝光機台的對準誤差雖然在 50nm 以內，但是由於光柵線寬十分細小，對光柵的線寬與輪廓將造成影響；(3)蝕刻深度的誤差，由於深度和效率有關，深度誤差一點對繞射效率影響很大。

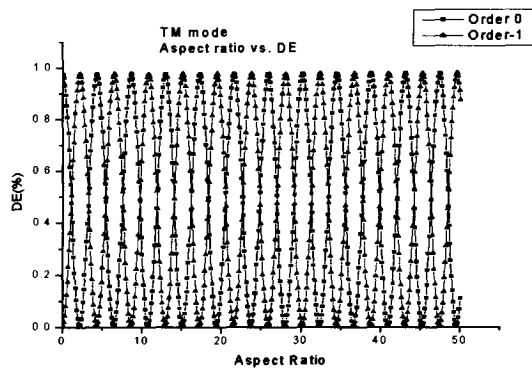
五、結論

利用嚴格耦合波理論分析一維光柵的繞射效率經過實驗證明為可靠的工具，現今光學元件逐漸朝微小化邁進，嚴格耦合波理論將更加重要。設計上，三色光波長的選擇根據我們的分析能夠提供往後投影系統的設計光波長選擇的參考。

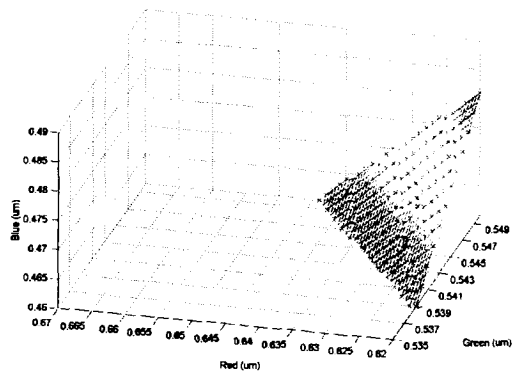
製程上電子束直寫對小線寬的製作能力，在微元件光學的領域能夠提供快速製作與驗證的工具。

參考文獻：

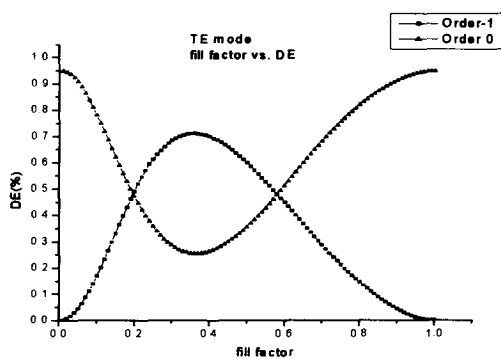
- [1]M.G Moharam and T.K. Gayload, "Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction", J. Opt. Soc. Am. ,Vol.71, pp.811(1981)
- [2]Nicolas Chateau and Jean Paul Hugonin,"Algorithm for the rigorous coupled-wave analysis of grating diffraction",Opt. Soc. Am. Vol.11,pp.1321(1994)
- [3] H.Kanayama,D. Takemori,Y.Furuta"A New LC Rear-Projection Display Based on the Color-Grating Method"SID'98 Digest,P199-202(1998)
- [4]Edward H. Stupp,Matthew S.Brennesholtz,"Projection Displays"SID Press,1999
- [5]許進財、李瑞光、邱燦賓,"電子束微影系統 Leica WEPRINT 200 簡介",毫微米通訊七卷一期,民國 89 年二月
- [6]洪啟超,"TCP9400 多晶矽蝕刻機簡介",毫微米通訊四卷二期,民國 86 年八月



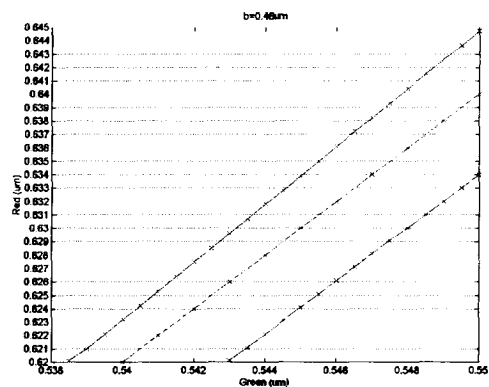
圖一 深寬比對繞射效率



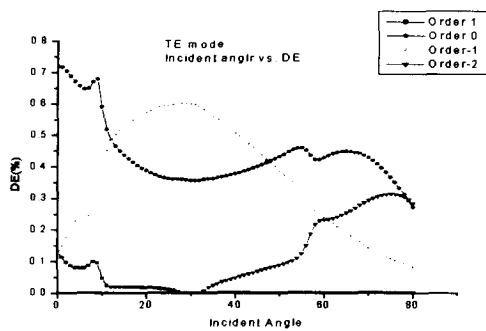
圖四 紅綠藍光有解的範圍



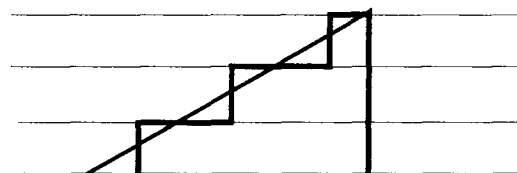
圖二 工作週期對繞射效率



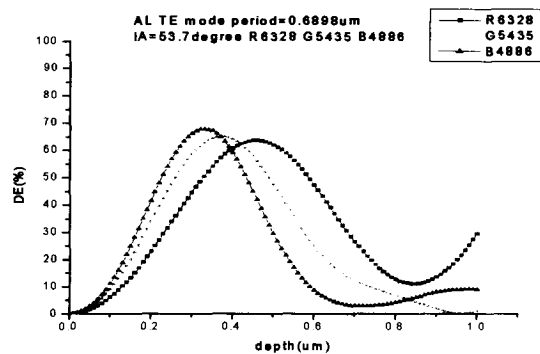
圖五 藍光 0.46 μm 時解的範圍



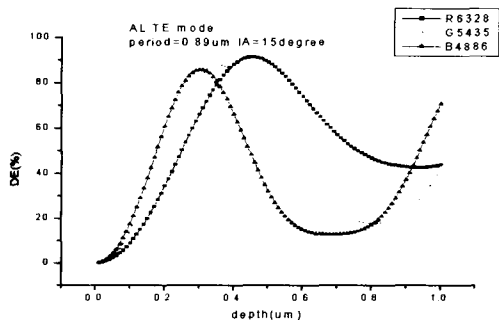
圖三 入射角度對繞射效率



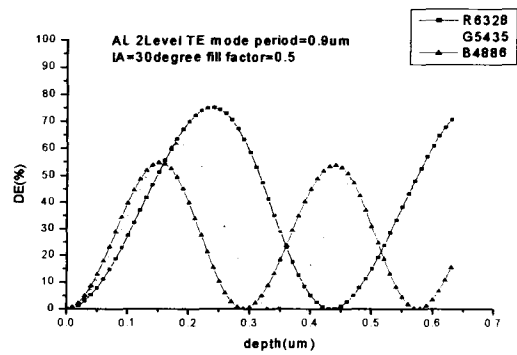
圖六 左四階示意圖



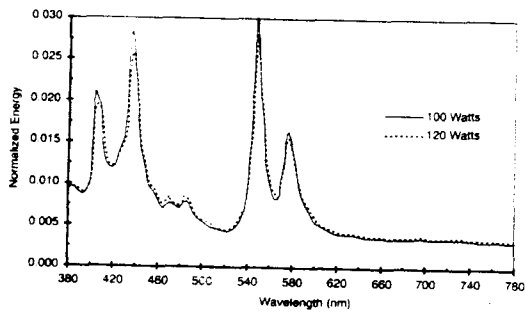
圖七 左四階光柵之繞射效率對深度圖



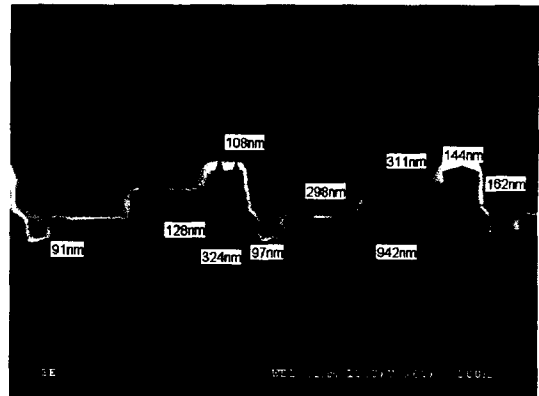
圖八 效率提高下之深度對效率圖



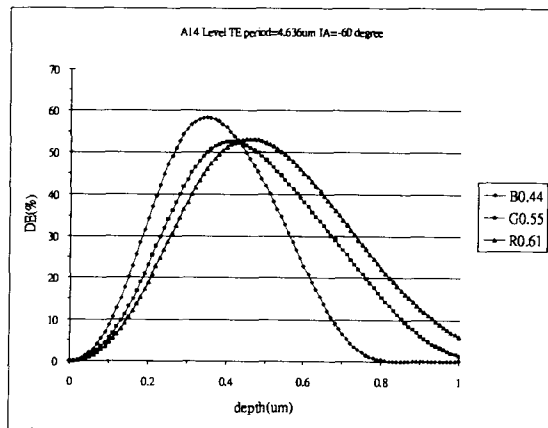
圖十一 二階光柵之繞射效率對深度圖



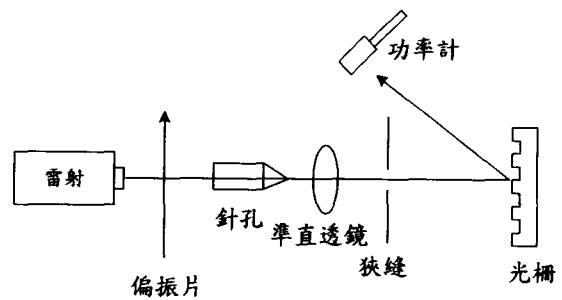
圖九 超高壓汞燈譜線圖



圖十二 四階光柵電子顯微鏡觀察



圖十 汞燈波長下繞射效率對深度圖



圖十三 量測架構示意圖

光柵外型 輪廓	最高一階 繞射效率 (%)	對應的深寬比 (D/Λ)
三角波形	99	2.54
餘弦型	99	2.09
二階光柵	98	1.71
對稱 4 階	99	2.31
左鋸齒形	54	2.44
左 4 階	52	2.38
左 8 階	53	2.38
左 16 階	54	2.44
右鋸齒形	54	2.45
右 4 階	53	2.41
右 8 階	53	2.33
右 16 階	54	2.44

表一 各種剖面 TE 模入射之最高效率

波長(um)	繞射效率 (%)	一階出射 對法線 夾角	一階出射 角度差
0.6328	61±8%	12.08±3%	5.44
0.5435	63±6%	6.64±10%	
0.4886	49±6%	2.25±8%	4.39

表二 二階光柵量測結果

波長(um)	繞射效率 (%)	一階出射 對法線 夾角	一階出射 角度差
0.6328	55.6	11.7	5.76
0.5435	59.1	5.96	
0.4886	54.4	2.46	3.5

表三 二階光柵理論值

波長(um)	繞射效率 (%)	一階出射 對法線 夾角	一階出射 角度差
0.6328	63.8±4.3 %	25.8±7.2%	5.91
0.5435	74.2±6.2 %	19.9±8.5%	
0.4886	79.5±3.2 %	15.6±6.4%	4.08

表四 四階光柵量測結果

波長(um)	繞射效率 (%)	一階出射 對法線 夾角	一階出射 角度差
0.6328	65.72	26.38	6.19
0.5435	77.83	20.19	
0.4886	77.77	16.50	3.69

表五 四階光柵理論值