

計劃主持人自我評估表

計劃名稱：以嚴格向量繞射理論設計分析與製作次波長微型光學元件
計劃編號：NSC88-2215-E009-022
計劃主持人：謝漢萍教授
執行機構：國立交通大學光電工程研究所

完成的成果及創見

1. 次波長光柵的分析、設計，以為製作高效率表面浮雕光柵式偏極光轉換器的基礎。
2. 半導體製成程序，以製作光學繞射元件。
3. 所製成平面式偏極光轉換器，是新型光學元件，可用於微型光學系統上。

是否有未完成之項目（說明未完成項目）

是 否

是否具有專利申請之項目（說明可申請專利之項目）

是 尚未成熟 否

是否有創新或改進之技術推介至產業界，並請列出可推介之業界廠商

可推介（請說明之）

平面顯示器、投影電視業界

建議兩位您認為合適的評審人（以供參考）

熊暉博士，達碁科技 副總經理
劉容生博士，工研院光電所 副所長

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

以嚴格向量繞射理論設計分析與製作次波長微型光學元件
Design, Analysis, and Fabrication of sub-wavelength Micro-Optical
Devices by Rigorous Vector Diffraction Model

計劃編號：NSC89-2215-E009-022

執行期間：88年08月01日起至89年07月31日

計劃主持人：謝漢萍

- 處理方式：可立即對外提供參考
一年後可對外提供參考
兩年後可對外提供參考

執行單位：國立交通大學光電工程研究所

中華民國89年9月30日

以嚴格向量繞射理論設計分析與製作次波長微型光學元件

(Design, Analysis, and Fabrication of sub-wavelength Micro-Optical
Devices by Rigorous Vector Diffraction Model)

計劃編號： NSC89-2215-E009-022

執行期間：88年08月1日起至89年07月31日

計劃主持人：謝漢萍

執行單位：國立交通大學光電工程研究所

中華民國89年9月30日

目錄

一、前言

二、原理

三、計劃成果

四、研究結果與討論

五、參考資料

六、論文

計劃中文摘要

(關鍵詞：次波長結構、向量繞射理論、表面浮雕光柵、電子束直寫)

結合繞射理論與半導體製程技術，可設計出各種微型光學元件與特殊光學特性的光學材料，來克服傳統光學製作方式的極限。本計劃從簡單的光程差法，到傳統純量繞射理論、等效介質理論以及嚴格向量繞射理論，以分析模擬近波長與次波長表面浮雕光柵結構的光學行為，並設計製作此新型光學元件，用於人造折射率材料結構、偏極光分離等應用，以期作為研發其他平面微集成元件的基礎。

Abstract

(Keywords: sub-wavelength-structure, vector diffraction theory, surface-relief grating, E-beam direct write)

The objective of this research project is to develop a new diffractive optics device which can mimic the effect of complicated thin-film coating, to function as polarizing, antireflection, or filtering effects. From the rigorous vector diffraction theory and E-beam direct writing techniques, we will design and fabricate a sub-wavelength-structure surface (SWS), which contains surface-relief grating whose grating period is small compared to the wavelength of the incident light. The proposed new sub-wavelength-structure diffraction device can synthesize an effective index of refraction which is not easily fabricated by thin film coatings and produce very efficient polarizing elements.

一、前言

在微電子、半導體技術日新月異的今日，電腦、通訊、一般日常家電、娛樂影音等各項資訊設備的功能進步真可謂一日千里，不僅體積縮小，功能更是強大。而結合了光學的高速度與高容量等特性，更發展出如光纖通訊(fiber communication)、數位影音光碟(digital video disk)等新的領域與產品。然而相對於微電子元件的小體積、高功能，光學元件的體積大小限制，常造成整個系統的體積與重量等不易解決的問題。為了克服此一問題，微光學(micro-optics)便應運而生，並且逐步發展出各種微型化的光學元件(micro-optical device)，諸如微透鏡、微稜鏡...等。這些新的光學技術結合發展中的新一代機電整合系統技術(micro-electro-mechanical system, MEMS)，發展出新的光機電整合系統(micro-opto-electro-mechanical system, MEOMS)，將能大幅縮小整個光機電系統的體積與重量，對於實際應用提供更大的潛力。

除了將傳統光學元件微型化的微光學元件外，利用微光學製作原理，我們可以設計製作出各種具特殊光學特性的結構，如人造等效高折射材料、等效負單軸晶體等，均具有和一般光學材料不同的光學特性。

在傳統薄膜光學中，利用多層鍍膜的方式可以製作出如抗反射膜(anti-reflection film)、偏光板(polarization sheet)、以及彩色濾光片(color filter)等光學元件。但是針對不同功能與波長設計時，所需特殊折射率材料未必能夠找到，而且需同時考慮鍍膜材料與基板的附著品質以及熱膨脹係數匹配等物理特性，因此鍍膜材料的選取是極需克服的問題。

為了克服這種在鍍膜材料上難以解決的問題，在 87 年度計畫中提出由嚴格的繞射光學理論出發，研究並設計以半導體曝光顯影(photolithography)、蝕刻(etching)等製作技術，在矽晶片或玻璃基板上製作表面浮雕光柵(surface-relief grating)結構。由不同週期大小的光柵結構，可以分別設計出偏極光束分離器(polarizing beam splitter)、特殊抗反射層、以及模擬多層鍍膜之漸變折射率的次波長週期表面結構(sub-wavelength-structured(SWS) surface)，如此可以製作出能取代傳統鍍膜設計的元件，並且可以解決材料選擇的難題。

在 87 年度計畫中，本實驗室提出了光柵週期近波長的偏極光分離光柵。在此情形下，利用純量繞射光學已無法有效近似在此狀況下不同偏振方向 TE、TM 波的繞射行為。本實驗室以電磁學出發，以嚴格的耦合波理論(Rigorous coupled wave theory)來設計分析此光柵對偏極光的分光行為，並尋求一最佳的分光效率設計。另外再配合以商用光柵分析軟體 GSolver 來驗證分析。這樣的計算數學推導上十分複雜且在電腦計算上輸入與運算均相當耗時。對於分析其他週期結構小於光波長的特殊光學特性結構並不是十分經濟的方法。

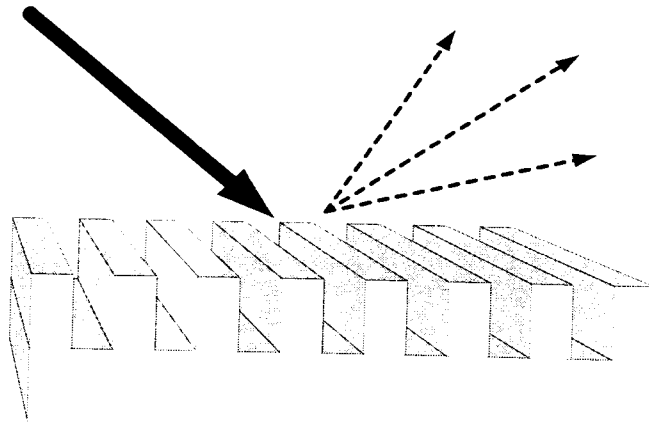
本計畫延續上一年度的計畫內容，進一步以較為簡易的等效介質近似理論(Effect-Medium Theory)來設計分析光柵週期小於入射光波長的次波長表面結構。此近似理論在光柵結構為小於波長的次波長表面結構時，將入射光的行為近似為光通過一單一等效介質層，藉由調整光柵的週期(period)、深度(depth)、與填充係數(filling factor)來得到所需特殊光學折射係數。此一近似法在光柵週期遠小於入射光時能得到相當好的近似，但是對於光柵週期稍大或是光斜向入射時，此一近似結果將無法完全符合，因此本計畫將進一步以嚴格耦合波理論驗證推導，並比較與等效介質理論的差異，並嘗試以推導較高階次項的等效介質理論，來改善次波長光學結構的設計誤差。

同時進一步由一維(1D)等效介質理論擴展到二維(2D)的等效介質理論，並進一步藉由此設計原理，分別設計製作一維與二維的次波長人造等效折射率結構，可製作出高折射率差($\Delta n=n_e-n_o$)的雙折射層，在偏極片(polarizer)、光束分離器(beam splitter)、以及各種相位板(waveplate)、以及特殊濾波器(filter)上有相當大的應用潛力。

二、原理

(1). 週期近波長的光柵元件:偏極光束分離器(polarizing beam splitter)

傳統上，分析光柵是以純量繞射理論分析強度的空間分佈變化關係，但是當光柵的週期接近波長甚至小於入射波長時，繞射光束的空間行為不再符合純量繞射理論的近似結果，偏振方向不同的 TE wave 和 TM wave 不再有相同的繞射行為，這需改以較嚴格的向量繞射理論加以分析。本計畫以嚴格耦合波理論(rigorous coupled-wave)設計一反射式的偏極光束分離器，結構如圖(一)所示，為一表面鍍鋁等導體的表面浮雕光柵。



圖一 光柵週期接近波長的反射式偏極光束分離光柵

當未偏極化的入射光以布拉格角(Bragg angle, θ_B)入射時，

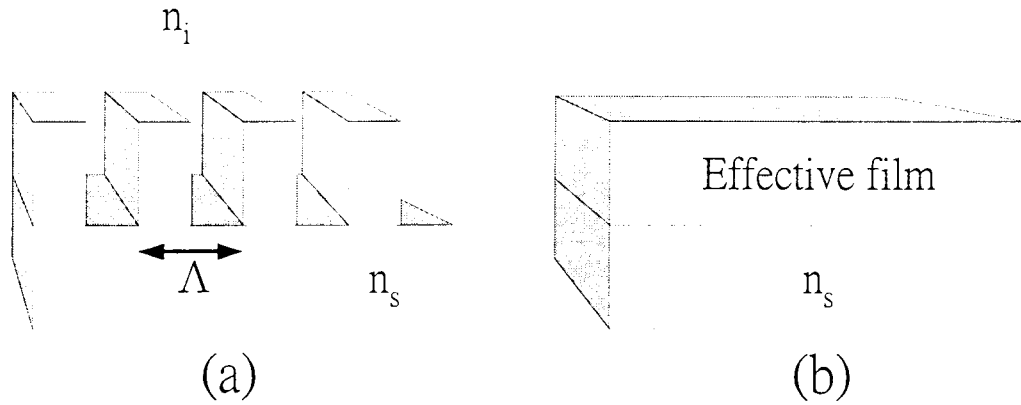
$$\theta_B = \sin^{-1}(\lambda/2\Lambda)$$

第一階繞射光沿原入射方向反射而回，而且呈 TE wave(電場方向平行光柵條紋)的偏極方向，而第零階繞射光將沿反射定律的反射方向射出，並呈現 TM wave(電場方向垂直光柵條紋)的線偏振光。

為了得到 100% 的 TE 偏極化的反射光，並且避免其他繞射階的能量損耗，設計光柵週期(period) Λ 約為二分之一波長到二分之三波長，深度週期比(aspect ratio(depth/period))約為 0.35，以及填充係數(filling factor(linewidth/period))為 0.5 的薄金屬光柵，使其滿足 Litrow condition，將可得到最佳偏極化的繞射光。

(2). 週期次波長的次波長表面結構(sub-wavelength-structured(SWS) surface)

將表面浮雕光柵的週期再縮小至比入射波長還小，如圖二(a)所示



圖二(a) 一維次波長表面結構所形成的等效折射率結構
(b)等效單軸晶體

當週期滿足以下條件

$$\Lambda \leq \frac{\lambda}{2n_1}, \Lambda \leq \frac{\lambda}{2n_2}$$

光入射於此一結構將不再有繞射階產生，而僅會看到一整體的等效折射率 n_{eff} (effective refractive index)。

我們以此製作一人造雙折射率表面結構，結構如圖二(b)所示，此一次波長表面浮雕光柵具有如同負單軸晶體的特性，具有 n_e 與 n_o 兩個不同的折射率，這可以由人造雙折射理論(theory of form birefringence)推得。

$$n_e^2 = \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma n_1^2 + (1 - \gamma) n_2^2}$$

$$n_o^2 = \gamma n_2^2 + (1 + \gamma) n_1^2$$

其中 γ 為填充係數(filling factor)，

$$\gamma = a/\Lambda$$

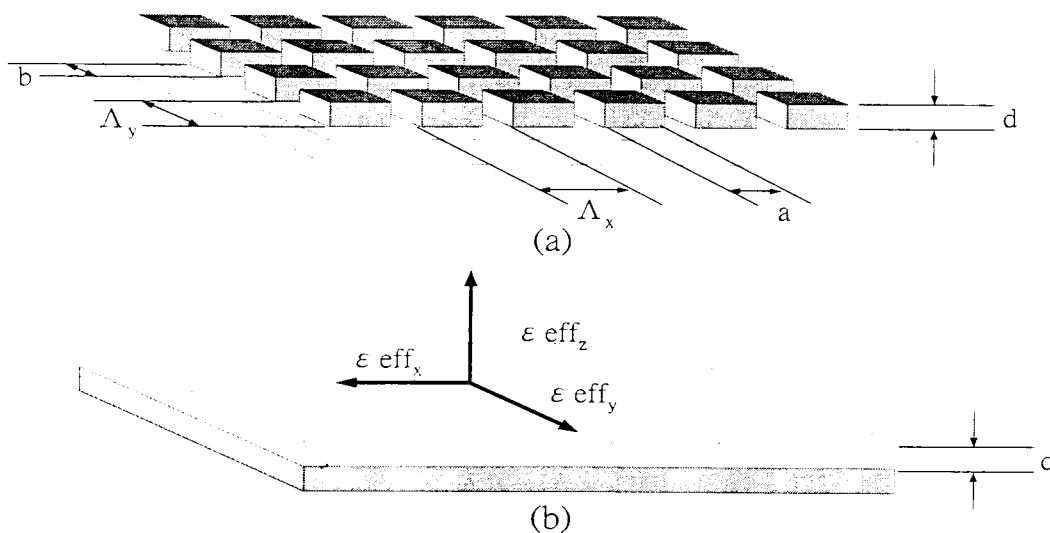
此僅為初階近似下的等效介質理論，此分階近似下未考慮入射波長的變化。為仔細分析此元件下適用的容許頻寬，需考慮高階項並進一步引入光波長的影響討論。其式推導得如下所示：

$$n_{te}^{(2)} = \left[n_{te}^{(0)2} + \frac{1}{3} \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2 \pi^2 \gamma^2 (1-\gamma)^2 (n_{ss}^2 - n_a^2) \right]^{1/2}$$

$$n_{tm}^{(2)} = \left[n_{tm}^{(0)2} + \frac{1}{3} \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2 \pi^2 \gamma^2 (1-\gamma)^2 \left(\frac{1}{n_{ss}^2} - \frac{1}{n_a^2} \right)^2 n_{te}^{(0)2} n_{tm}^{(0)6} \right]^{1/2}$$

上式為高頻二元光柵的二次等效介質理論公式。

以上推導為一維光柵的設計理論，為了得到設計中更大的自由度，光柵的結構也可設計為二維光柵，此時由於 X 與 Y 方向的光柵週期不同可以得到 X、Y、Z 三個方向不同的折射率，形成一雙軸晶體層，如圖(三)所示。



圖三(a)二維次波長光柵結構
(b)等效雙軸晶體

如此適當選擇基板反射率與光柵的週期結構，可製作出高折射率差($\Delta n=n_e-n_o$)的雙折射層，在偏極片(polarizer)、光束分離器 (beam splitter)、以及各種波板(waveplate)的應用上有極大的潛力。

三、計劃成果

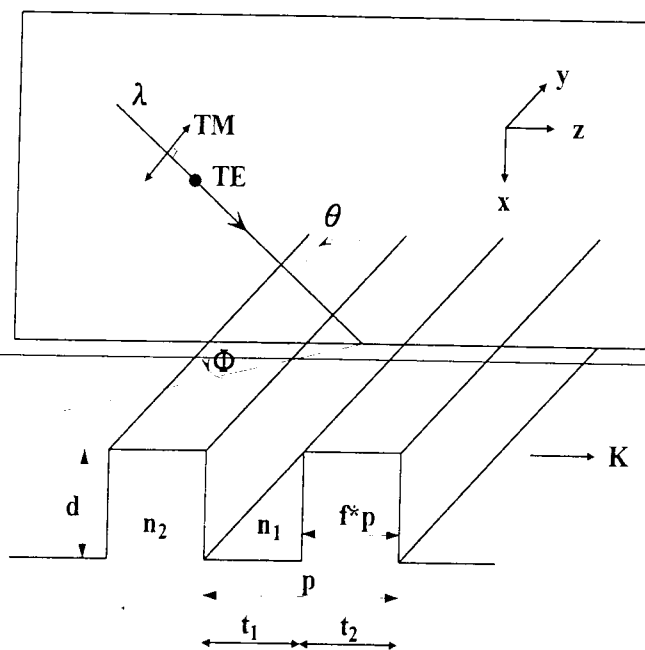
(一)、次波長週期結構的等效折射率元件之理論推導及次波長光柵設計程式

等效介電質理論(EMT: Effective Medium Theory)

當一個表面蝕刻光柵的週期 p 遠小於入射光波長時，光柵的光學性質會類似一層單軸晶體，其光軸和光柵 K 的波向量平行。此時除了零階繞射外，其餘的繞射階均以消散波(evanescent wave)的形式衰減。本計畫所討論的是以電磁學的方法推導此一等效介電質的光學特性，以資作為光柵式偏極分光器的設計參考

1. 光柵及入射光的參數定義

考慮一矩形結構的光柵，如圖四所示，其週期為 p ，深度為 d ， $f=t_2/(t_1+t_2)$ 為矩形結構寬度和週期的比例， K 為光柵之波向量。入射光波長為 λ ，入射角為 θ_0 ，折射角為 θ_s ，入射光平面與 K 之夾角為方位角 Φ ，電場振動方向和 K 垂直為 TE mode，磁場振動方向和 K 垂直為 TM mode， n_1 、 n_2 分別為構成光柵材料的折射率。



圖四 矩形結構之光柵及其參數定義

2. 等效介電質理論的適用範圍

為了簡化問題，以下討論的等效介電質理論先考慮入射光平面平行光柵之波向量 K ，即 $\Phi=0$ 的情況。由光柵公式(1)來看

$$(n_1 \sin\theta_1 + n_2 \sin\theta_2) = m \lambda/p \quad (1)$$

其中 m 為整數，為光柵的繞射階數。其左式之最大值為 $n_1 + n_2$ ，故當 λ/p 大於 $n_1 + n_2$ 時， m 必須等於零 θ_2 方有實數解。因此光柵要具有等效介電質等特性之條件為周期 p 必須小於 $\lambda/(n_1 \sin\theta_0 + n_2)$ 。

3. 等效介電質理論 I -- 平均加權法

TE mode

由 material equation 可得

$$D_1 = \epsilon_1 E_1 \quad (2)$$

$$D_2 = \epsilon_2 E_2 \quad (3)$$

加上邊界條件電場 E 要連續可得

$$E_1 = E_2 = E \quad (4)$$

因此平均電通量 D 可由 t_1 及 t_2 來加權

$$\begin{aligned} D &= (t_1 D_1 + t_2 D_2) / (t_1 + t_2) \\ &= (1-f)D_1 + f D_2 \end{aligned} \quad (5)$$

將 $D = \epsilon_{TE} E$ 及(2)、(3)、(4) 代入(5)即得

$$\epsilon_{TE} = (1-f) \epsilon_1 + f \epsilon_2 \quad (6)$$

$$n_{TE}^2 = [(1-f) n_1^2 + f n_2^2] \quad (7)$$

TM mode

TM mode 的邊界條件為電通量 D 要連續：

$$D_1 = D_2 = D \quad (8)$$

因此平均電場 E 由 t_1 及 t_2 來加權可得

$$\begin{aligned} D &= \epsilon_{TM} E \\ &= \epsilon_{TM} [(1-f) E_1 + f E_2] \\ &= \epsilon_{TM} [(1-f) (D / \epsilon_1) + f (D / \epsilon_2)] \end{aligned}$$

化簡可得

$$\varepsilon_{TM} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / [f \varepsilon_1 + (1-f) \varepsilon_2] \quad (9)$$

$$n_{TM}^2 = n_1^2 n_2^2 / [f n_1^2 + (1-f) n_2^2] \quad (10)$$

由平均加權法所得的 n_{TE} 和 n_{TM} 只適用於 $p \ll \lambda$ 的光柵，同時推導中直接採用 f 和 $1-f$ 來作加權指數的方法也不是非常嚴謹。下面將以更加嚴謹的方法來推導 n_{TE} 和 n_{TM} ，並使其能適用於 p 接近 $\lambda / (n_0 \sin\theta_0 + n_s)$ 。

4. 等效介電質理論 II -- 布拉格解法

我們可以把光柵的折射率視為一個週期性的位能阱，因此光在光柵內傳遞時，電磁波的形式必須符合布拉格函數 (Bloch Function)。

TE mode

TE mode 的電場和磁場強度之向量式可表示為 $\mathbf{E} = (0, e, 0)$ 、 $\mathbf{H} = (h_x, 0, h_z)$ ，代入 Maxwell equations 可得

$$\frac{\partial e}{\partial z} = i\omega\mu h_x \quad (11)$$

$$\frac{\partial e}{\partial x} = -i\omega\mu h_z \quad (12)$$

$$\frac{\partial h_x}{\partial z} - \frac{\partial h_z}{\partial x} = i\omega\varepsilon e \quad (13)$$

由於 ε 是在 z 方向是一周期函數，因此 e, h_x, h_z 其解為 Bloch equation 之形式，令其為

$$e = U(z)e^{-iknx} \quad (14)$$

$$h_x = V(z)e^{-iknx} \quad (15)$$

$$h_z = W(z)e^{-iknx} \quad (16)$$

將 (14)、(15)、(16) 代入 (11)、(12)、(13)：

$$\frac{dU}{dz} = ik\mu V \quad (17)$$

$$nU = \mu W \quad (18)$$

$$\frac{dV}{dz} + iknW = ik\varepsilon U \quad (19)$$

解 (14)、(15)、(16) 聯立方程式可得 U, V, W

For $0 < z < t_1$

$$U = A \cos(\alpha_1 z) + B \sin(\alpha_1 z) \quad (20)$$

$$V = -[A \cos(\alpha_1 z) + B \sin(\alpha_1 z)] \alpha_1 / (i k \mu_1) \quad (21)$$

$$W = [A \cos(\alpha_1 z) + B \sin(\alpha_1 z)] n / \mu_1 \quad (22)$$

$$\alpha_1 = k (n_1^2 - n^2)^{1/2}$$

For $t_2 < z < 0$

$$U = C \cos(\alpha_2 z) + D \sin(\alpha_2 z) \quad (20)$$

$$V = -[C \cos(\alpha_2 z) + D \sin(\alpha_2 z)] \alpha_2 / (i k \mu_2) \quad (21)$$

$$W = [C \cos(\alpha_2 z) + D \sin(\alpha_2 z)] n / \mu_2 \quad (22)$$

$$\alpha_2 = k (n_2^2 - n^2)^{1/2}$$

加上電場連續的邊界條件

$$U(+0) = U(-0) \quad U(t_1) = U(-t_2)$$

$$V(+0) = V(-0) \quad V(t_1) = V(-t_2)$$

可得到四個 A、B、C、D 的 homogeneous equations

$$C = A \quad (23)$$

$$C \cos(\alpha_2 t_2) - D \sin(\alpha_2 t_2) = A \cos(\alpha_1 t_1) + B \sin(\alpha_1 t_1) \quad (24)$$

$$D = x B \quad (25)$$

$$C \cos(\alpha_2 t_2) - D \sin(\alpha_2 t_2) = -x [A \cos(\alpha_1 t_1) + B \sin(\alpha_1 t_1)] \quad (26)$$

$$x = (\mu_2 \alpha_1) / (\mu_1 \alpha_2) \quad (27)$$

若 A、B、C、D 要有解，則其行列式要等於零：

$$(1 + x^2) \sin(\alpha_1 t_1) \sin(\alpha_2 t_2) + 2 x [1 - \cos(\alpha_1 t_1) \cos(\alpha_2 t_2)] = 0 \quad (28)$$

由 (28) 式可解得 x

$$\tan(\alpha_2 t_2 / 2) / \tan(\alpha_1 t_1) = -1 / x \quad (29)$$

將 α_1 、 α_2 、x、 $t_2 = f p$ 及 $t_1 = (1-f) p$ 代入 (27) 即可得

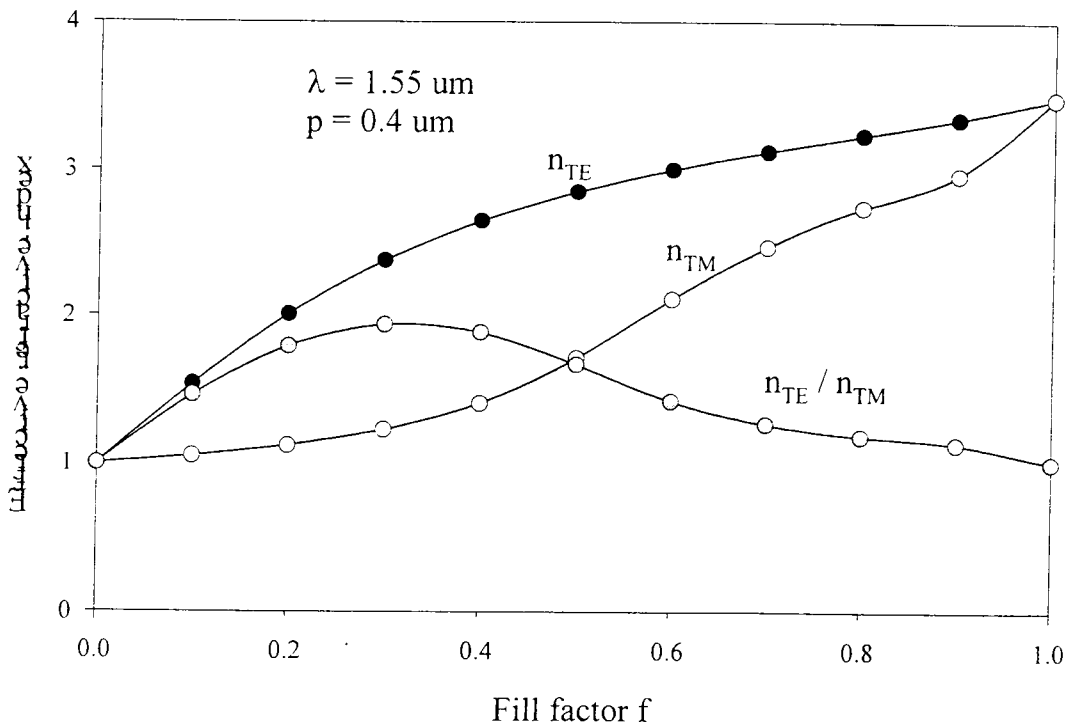
$$\frac{\tan(\pi \cdot \sqrt{n_2^2 - n^2} \cdot \frac{f \cdot p}{\lambda})}{\tan(\pi \cdot \sqrt{n_1^2 - n^2} \cdot \frac{(1-f) \cdot p}{\lambda})} = -\frac{\sqrt{n_1^2 - n^2}}{\sqrt{n_2^2 - n^2}} \quad (30)$$

TM mode

TM mode 的電場和磁場強度之向量式可表示為 $\mathbf{E} = (e_x, 0, e_z)$ 、 $\mathbf{H} = (0, h, 0)$ 。利用相同的推導流程可求出 n_{TM} 之方程式為

$$\frac{\tan(\pi \cdot \sqrt{n_2^2 - n^2} \cdot \frac{f \cdot p}{\lambda})}{\tan(\pi \cdot \sqrt{n_1^2 - n^2} \cdot \frac{(1-f) \cdot p}{\lambda})} = -\frac{n_2^2 \cdot \sqrt{n_1^2 - n^2}}{n_1^2 \cdot \sqrt{n_2^2 - n^2}} \quad (31)$$

公式 (30)、(31) 分別為 TE mode 和 TM mode 之等效折射率之關係式。利用數值軟體如 mathematica 或 mathcad 等可以很快求出其數值解。由於此二式包含了 p 及 λ 之參數，因此不像之前的平均加權法有 $p \ll \lambda$ 的條件。當 $p \ll \lambda$ 時， $\tan(x)$ 趨近於 x ，展張即可得到(7)、(10)。當 $p > \lambda / (n_1 + n_2)$ 時， n 沒有實數解。

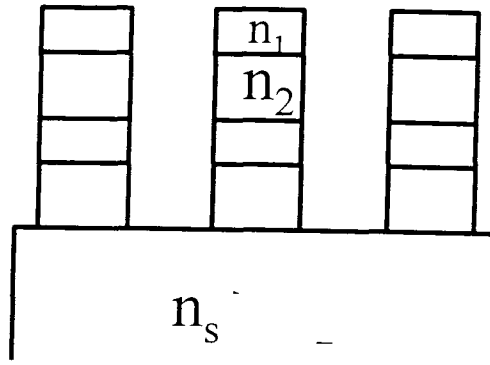


圖五 等效折射率對光柵填充比 f 。

從次波長光柵的等效折射率公式可以看到一些特性，如圖五。首先，次波長光柵的等效折射率 n_{TE} 和 n_{TM} 可以經由 f 的改變而在 n_1 和 n_2 之間變化，這表示我們可以經由設計而達到傳統光學材料上沒有的特殊折射率。其次是 n_{TE} 和 n_{TM} 可以有很大的差距，不似傳統的單軸晶體其最大的折射率差約只有 0.02 左右。藉著這些特性可以設計出與傳統光學系統不同的偏極分光器。

(二)、多層膜光柵設計

次波長光柵的結構使我們可以經由 f 的變化和材料的選擇而達到指定的 n_{TE} 和 n_{TM} 。有了等效折射率的公式之後，接著就可配合薄膜光學來設計偏極分光器。如同麥克尼爾偏光器，我們也採用多層膜的結構來加強分光的效果，如圖六。此外可藉由調整每層薄膜的厚度來作對多波長及兩偏振方法來作最佳化。



圖六 多層膜次波長光柵

1. 光學薄膜之特性

薄膜是一種特殊的光學結構。由於膜層厚度夠薄，使得一個薄膜的兩個界面的反射光能夠產生干涉，因此薄膜具有特殊的光學特性。一般來說，當膜層厚度約小於五個入射光波長時便具有上述的特性，也就是所謂的光學薄膜。薄膜的特性可以用一個二維的矩陣來表示：

$$m = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i \sin \delta}{\gamma} \\ i \gamma \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{2\pi}{\lambda} n \cdot \cos \theta \cdot d \\ \gamma &= n \cdot \cos \theta \end{aligned} \quad (33)$$

n 、 d 分別為薄膜的折射率和厚度， θ 為光在薄膜內的入射角。當一個基板上鍍一層薄膜時，整個光學系統的反射率可由下式求出

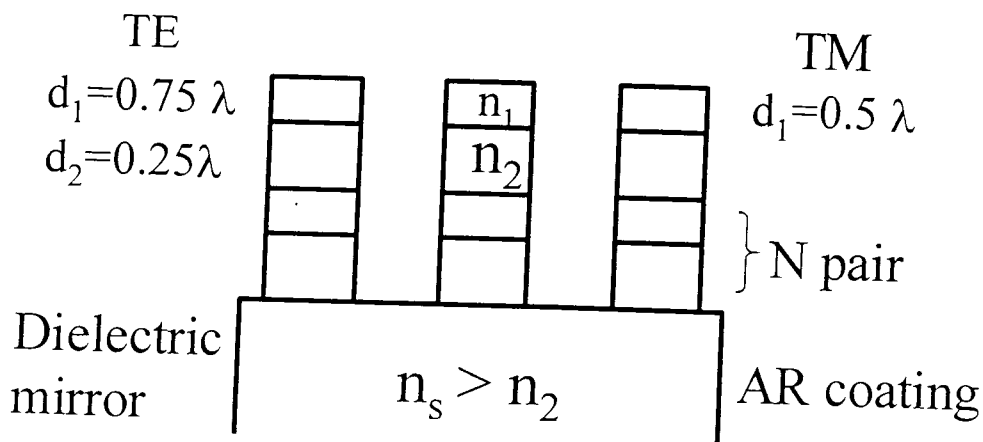
$$R = \left(\frac{m_{11}\gamma_0 + m_{12}\gamma_0\gamma_s - m_{21} - m_{22}\gamma_s}{m_{11}\gamma_0 + m_{12}\gamma_0\gamma_s + m_{21} + m_{22}\gamma_s} \right)^2 \quad (34)$$

其中 γ_0 、 γ_s 分別為 (33) 式中的 γ 代入相對在空氣和基板的折射率及光線和薄膜法線的夾角。

多層膜的光學特性矩陣可由每層薄膜的特性矩陣相乘而得，同樣地將多層膜之特性矩陣代入 (34) 即可得到多層膜光學系統的反射率。一般而言，多層膜的特性矩陣都非常複雜，因此很難用解析的方法來作設計，大都是使用電腦利用數值方法來作設計和最佳化。

如上節所言，多層膜光學系統的參數隨著膜層數目而增加，使得參數的抉擇有如陷於五里霧之中，即使是利用電腦來作最佳參數的搜尋，也會耗費相當多的時間。仔細觀察薄膜特性矩陣 (32)，可以發現當薄膜厚度在某些特定值時矩陣得以簡化，進而可做解析設計。當薄膜厚度等於二分之一波長或其倍數時，此時 δ 等於零，因此矩陣化簡為 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，由於單位矩陣在矩陣相乘中並沒有任何作用，因此二分之一波長的薄膜完全不會影響多層膜系統的反射率，就好像薄膜不存在一樣，所以一般薄膜設計是不會採用此一厚度。另一特殊膜厚是四分之一波長或其奇數倍，此時 δ 等於 $\pi/2$ ，因此矩陣化簡為 $\begin{bmatrix} 0 & i/\gamma \\ iy & 0 \end{bmatrix}$ ，進而可用反對角矩陣的特性來簡化矩陣相乘。

2. 多層膜次波長光柵之設計



由於次波長光柵具有單軸晶體的特性，可以設計使多層膜次波長光柵對 TE wave 而言是一介電質反射鏡 (dielectric mirror)，而對 TM wave 而言是一抗反射膜，如此可得到一反射 TE wave 和穿透 TM wave 的偏極分光器。為了方便，以下所指的薄膜厚度皆為光學厚度。如圖七所示，此多層膜次波長光柵對 TE wave 而言，是由 N 組的四分之三波長薄膜 (layer 1) 和四分之一波長薄膜 (layer 2) 雙層膜所構成的。在參考波長下其反射率為

$$R = \left[\frac{n_0 \left(\frac{n_{2,TE}}{n_{1,TE}} \right)^{2N} - 1}{n_s \left(\frac{n_{2,TE}}{n_{1,TE}} \right)^{2N} + 1} \right]^2 \quad (35)$$

當 N 愈大，反射率也愈大。而對 TM wave 而言，藉由適當選擇 layer 1 的折射率和其光柵的開口比例 f，使得 layer 1 形成二分之一波長薄膜。由於二分之一薄膜對多層膜系統沒有作用，因此多層膜次波長光柵可視為一厚度為 $N \cdot d_2$ 、折射率為 $n_{2,TM}$ 的抗反射膜。

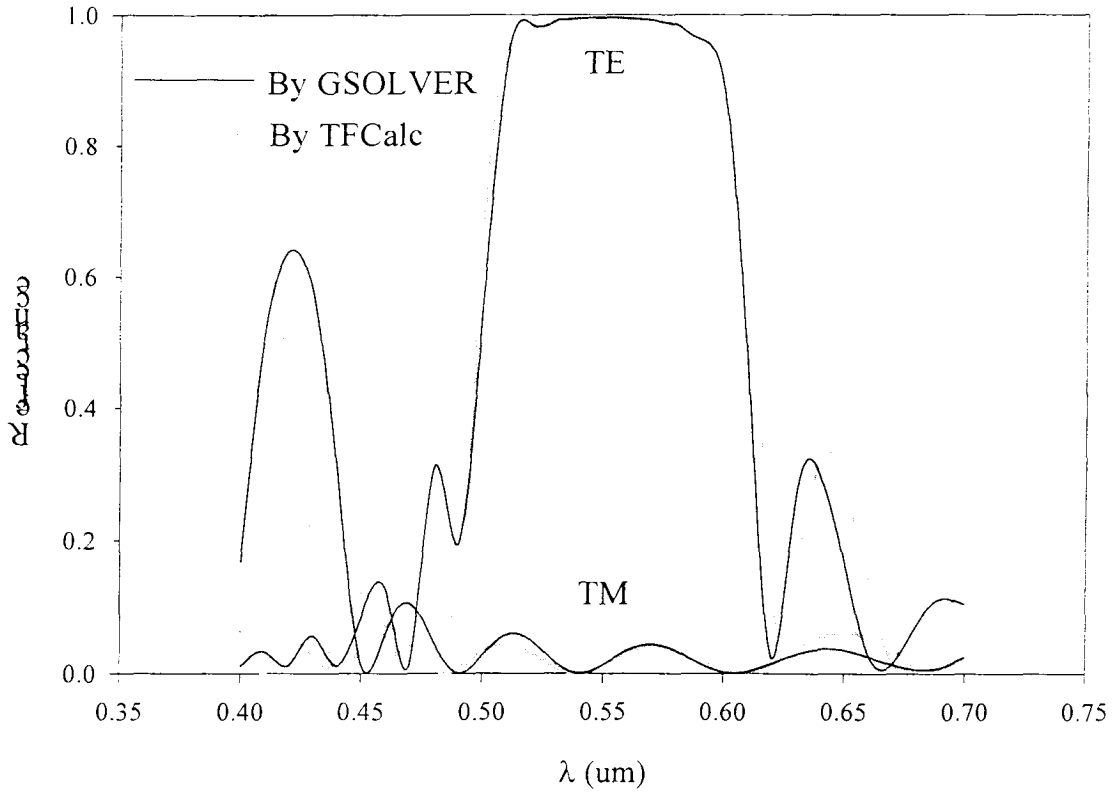
為了達到上述的光學特性，首先 $n_{1,TE}$ 必須等於 1.5 倍的 $n_{1,TM}$ ，由 (7) 和 (10) 可以算出在 $f = 0.5$ 時， n_1 等於 2.618。其次 $n_{2,TM}$ 小於 n_s ，最好要接近 $(n_0 n_s)^{1/2}$ 以降低 TM wave 的反射率。

3. 模擬結果

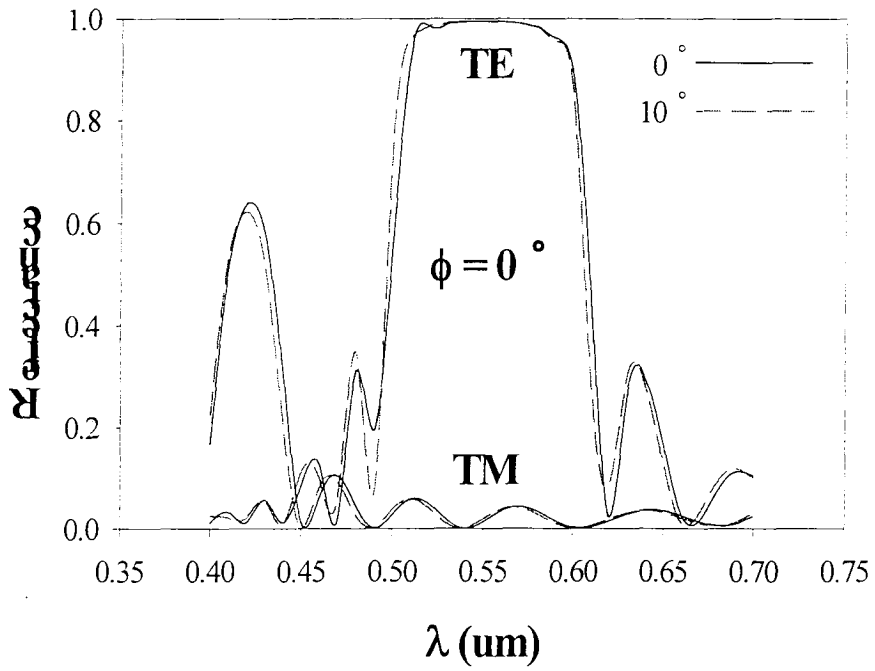
針對波長為 550 nm 的可見光我們設計了以下的多層膜次波長光柵。其光柵參數如下：

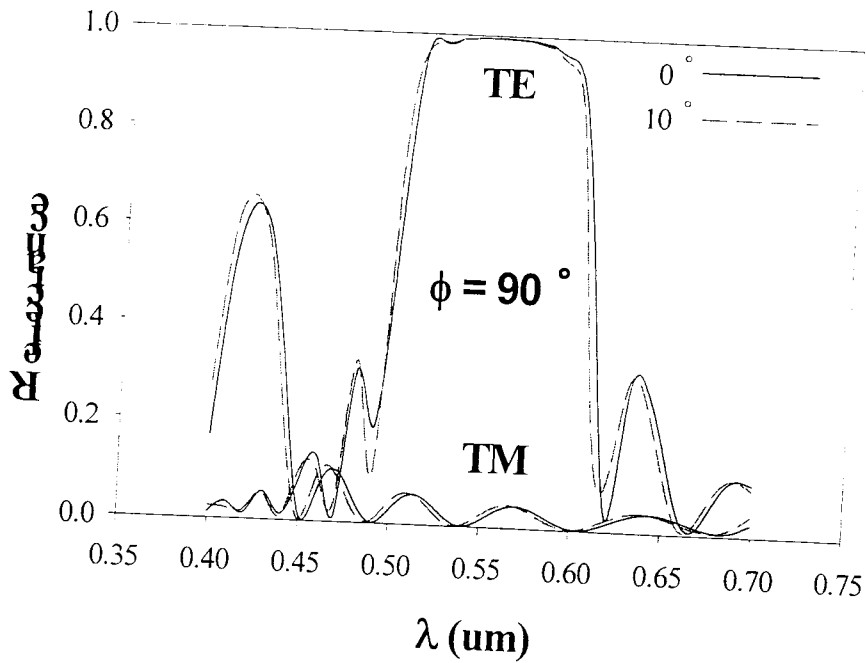
$$\begin{array}{llll} n_1 = 2.73 \text{ (TiO}_2\text{)} & & d_1 = 187 \text{ nm} & \\ n_2 = 1.38 \text{ (MgF}_2\text{)} & & d_2 = 138 \text{ nm} & \\ n_s = 1.48 \text{ (SiO}_2\text{)} & f = 0.5 & p = 0.12 \text{ nm} & N = 5 \end{array}$$

由 GSolver 模擬的結果如圖八。可看出 TE wave 的反射率在 97%，而 TM wave 的反射率隨波長變化呈現一類正弦波，保持在 4% 以下。TE、TM 的光學特性可說完全符合設計。此外，我們也將等效折射率帶入一薄膜軟體 TFCalc。由圖九可以看到其結果和 GSolver 大致相同。



圖八 由 GSolver 和 TFCalc 模擬的次波長光柵光學特性。





圖九 次波長光柵在 0° 與 90° 兩個入射光平面的斜向入射特性。

由於次波長光柵的等效折射率在小角度內變化不大，因此利用次波長柵設計的偏極分光器具有相當大的入射張角容忍度。如圖九所示，不論是 0° 或 90° 兩個入射光平面， 10° 入射角其光學特性大致和正向入射相同。

4. 偏極分光器之頻寬

多層膜次波長光柵的頻寬主要受限於使用四分之三波長光學厚度的薄膜。這點我們可以由表一所計算的頻寬和模擬結果來作比較。我們可以看到模擬結果和由 $\frac{3\lambda}{4n_{H,TE}} / \frac{3\lambda}{4n_{L,TE}}$ 雙層膜所組成的介電質反射鏡頻寬較為相近。

表一 不同組態的介電質反射鏡的頻寬

d_H	d_L	$\Delta g = g - 1 \quad g = \frac{\lambda_0}{\lambda}$	Bandwidth (um)
$\frac{\lambda}{4n_{H,TE}}$	$\frac{\lambda}{4n_{L,TE}}$	$\frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_{H,TE} - n_{L,TE}}{n_{H,TE} + n_{L,TE}} \right)$	0.469 ~ 0.665

$\frac{3\lambda}{4n_{H,TE}}$	$\frac{3\lambda}{4n_{L,TE}}$	$\frac{2}{3\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n_{H,TE} - n_{L,TE}}{n_{H,TE} + n_{L,TE}} \right)$	0.520 ~ 0.584
$\frac{3\lambda}{4n_{H,TE}}$	$\frac{\lambda}{4n_{L,TE}}$		0.501 ~ 0.590

為了避免使用四分之三波長光學厚度的薄膜，有關 TM wave 的抗反射組態要重新設計。我們發現在某些特定波長和薄膜組態下，一個多層膜的反射率並不會隨著雙層膜重複的次數而增加，此時反射率大約為基板的反射率。我們可利用這個性質來應用於一些低反射率的基板上。由薄膜光學可知，要反射率並不會隨著雙層膜重複的次數而增加，薄膜的參數要符合下面這個式子：

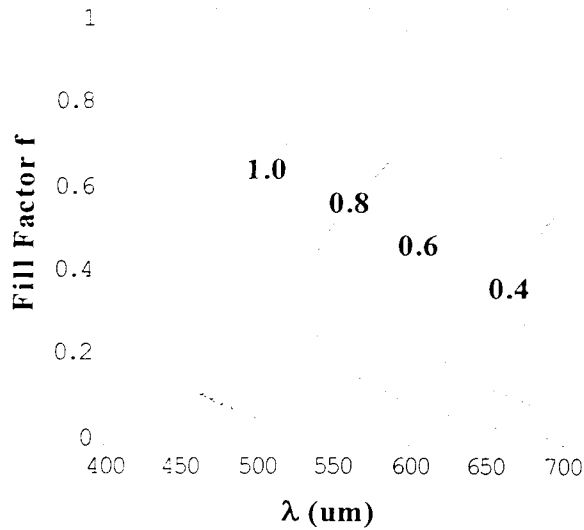
$$\left| \cos \delta_H \cos \delta_L - \frac{1}{2} \left(\frac{n_H}{n_L} + \frac{n_L}{n_H} \right) \sin \delta_H \sin \delta_L \right| < 1 \quad (35)$$

$$\delta_H = \frac{2\pi}{\lambda} n_H d_H \quad \delta_L = \frac{2\pi}{\lambda} n_L d_L \quad (36)$$

將 n_H , n_L 分別以等效折射率 $n_{H,TM}$, $n_{L,TM}$ 代入，以及 $d_H = \frac{\lambda_0}{4n_{H,TE}}$ 、

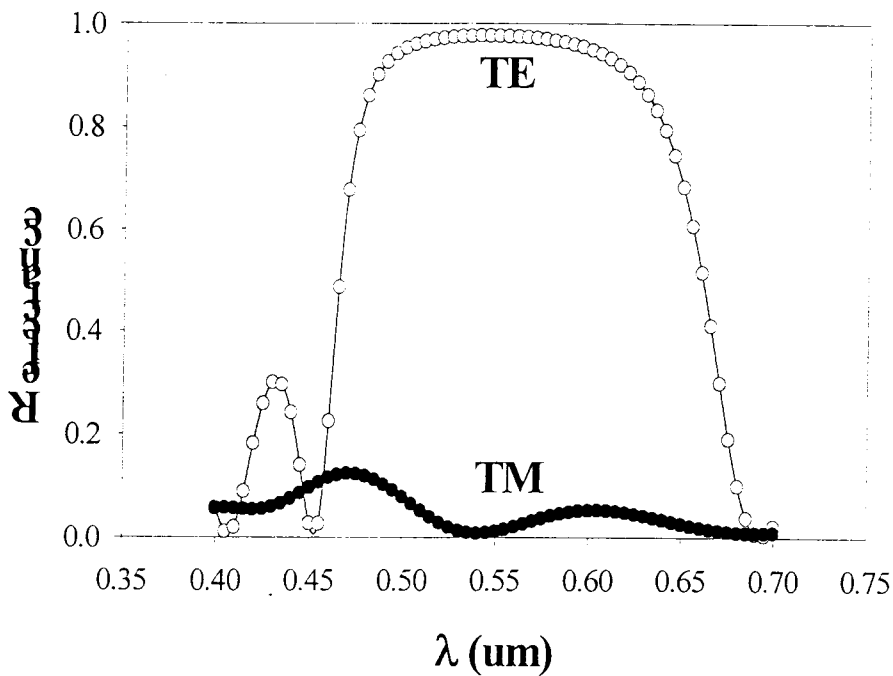
$d_L = \frac{\lambda_0}{4n_{L,TE}}$ 可以得到一等高線圖圖十。在使用相同的材料下，可

以看到低反射率最大的頻寬發生在 $f = 0.3$ 。



圖十 公式(35)對 f 和 λ 的等高線圖。

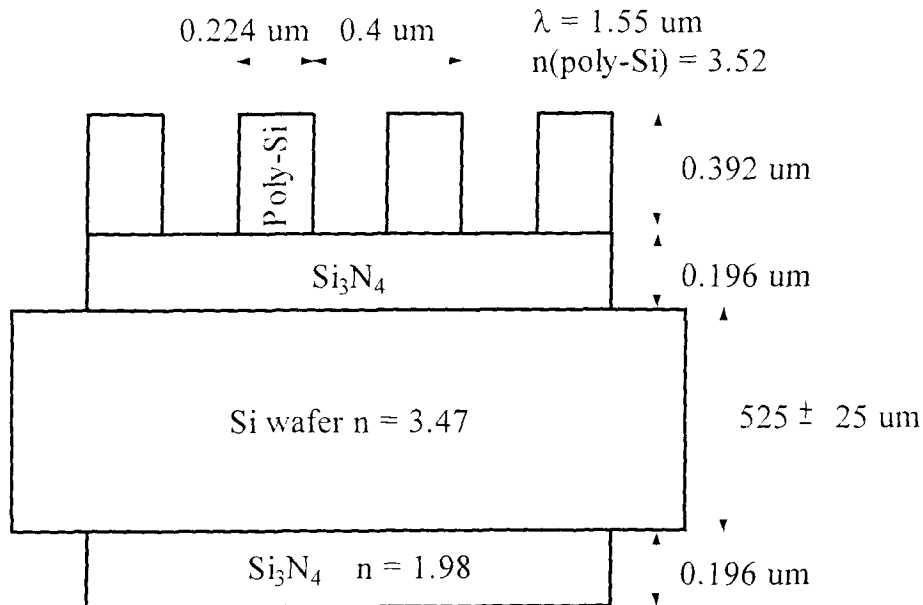
模擬的結果驗證了之前的想法。如圖十一所示，次波長光柵的頻寬增加為原來的 1.5 倍。在操作波段內，TE wave 的平均反射率為 95 %，而 TM wave 的反射率皆在 5 % 以下。唯一和等高線預估不合的是在 0.47 um 附近，TM wave 的反射率會隨雙層膜重複的次數而增加。這是因為之前所代入的等效折射率公式是由平均加權法得來，因此有些微的誤差。若代以布拉格解法相信可以得到更準確的等高線圖。



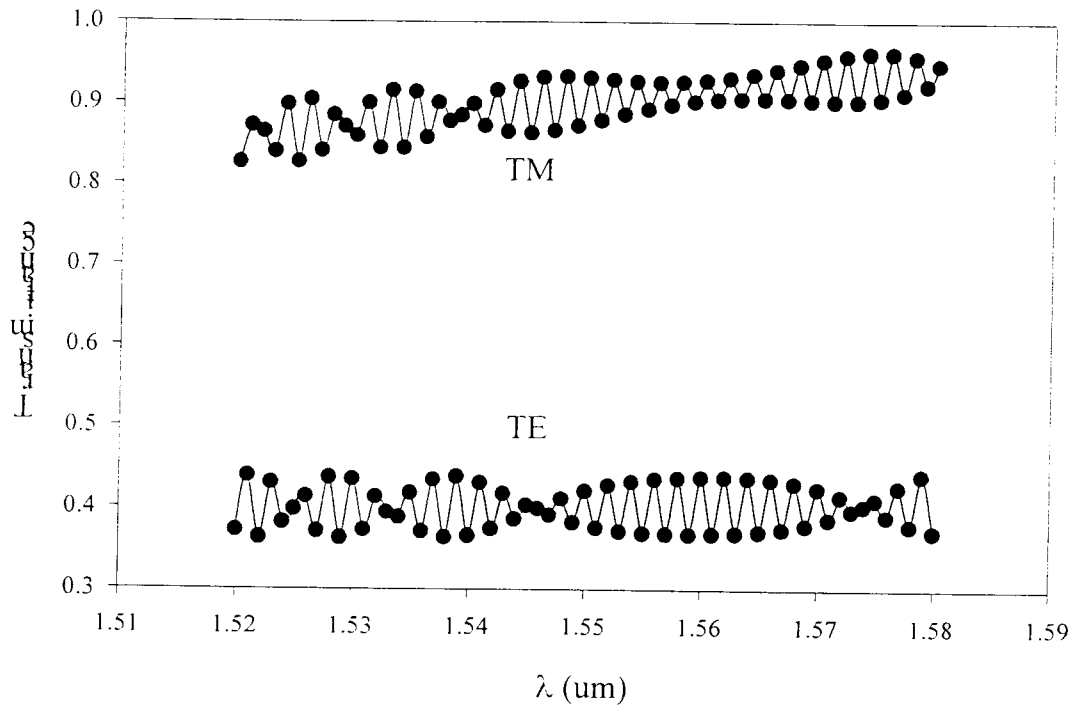
圖十一 改善頻寬之後的次波長光柵光譜圖。

5. 元件製作

為了配合半導體製程的要求，我們將光柵的規格作了一些改變。首先，由於之前操作於可見光波長的光柵其最小線寬為 0.065 μm ，這對現今的半導體技術而言相當的困難。因此我們改變設計改作近紅外線 1.55 μm 的偏極分光器。其次，由於半導體製程機台潔淨度的要求，所用的基板和薄膜材料要符合標準製程，同時這些材料要在近紅外線下為透明的。我們選用了單晶矽作基板，薄膜材料選用 Si_3N_4 和 poly-silicon。第三，為了減少光柵蝕刻深度，我們只使用了一層雙層膜。第四，為了降低基板背面的反射，我們在矽基板背面鍍了一層四分之一波長光學厚度的 Si_3N_4 。光柵的參數和模擬結果分別為圖十二與圖十三。



圖十二 光柵參數圖



圖十三 紅外線偏極分光器光譜模擬結果。

光柵的製作主要分為三個部分：首先利用低壓化學氣相沉積 (L.P.CVD) 在矽晶片上長薄膜。第二是在 poly-silicon 上上光阻，利用 e-beam writer 將光柵的圖樣寫在光阻上。第三，利用活性離子蝕刻系統將光阻上的圖樣蝕刻到 poly-silicon 上，之後將光阻去除便完成了。

有關鍍膜製程的步驟詳列於下

- (1) 以 RCA Clean Process 清洗矽口晶片。
- (2) 利用 L.P.CVD 鍍上 Silicon nitride. 鍍膜條件為
 - Measured Temperature: 800 °C
 - Deposition Pressure: 140 mTorr
 - Flow Rate of NH_3 : 105 sccm
 - Flow Rate of SiH_2Cl_2 : 35 sccm
 - Deposition time: 12 min
- (3) 利用 L.P.CVD 鍍上 polysilicon. 鍍膜條件為
 - Measured Temperature: 620 °C
 - Deposition Pressure: 100 mTorr
 - Flow Rate of SiH_4 : 40 sccm

Deposition time: 39 min

(4) 上正光阻 FH-6400

(a) a layer of H.M.D.S. (Hexamethyldisilazance) is coated on the wafer as an adhesive layer.

(b) FH-6400 is spin-coated on H.M.D.S.

(c) The photoresist is developed by HMD-1.

(d) The wafer is hardbaked to 120 °C for 600 sec.

(5) 為了去除背面的 polysilicon，將晶片浸在一溶液內。溶液配方為



(6) 利用丙酮 (acetone) 去除光阻

由於在第二部分的 e-beam writer 現今仍未修好，使得實驗被迫在中止於第一階段。

(三)、研究結果與討論

對於等效介電質理論本計劃第一部分所推導的布拉格解法，克服了平均加權法所得的 n_{TE} 和 n_{TM} 只適用於 $p \ll \lambda$ 的光柵的缺點，以更加嚴謹的方法來推導 n_{TE} 和 n_{TM} ，並使其能適用於 p 接近 $\lambda / (n_0 \sin \theta_0 + n_s)$ 。

而本計劃亦以等效介電質理論的布拉格解法為基礎發展出一套次波長光柵設計程式，可以經由輸入所期望的光柵特性，提供次波長光柵設計時所需要的重要參數，簡化了光柵設計流程。

在次波長光柵的設計上，當光柵的週期小於入射光的波長時，光柵的特性近似一個具有高雙折射係數的單軸晶體，其雙折射係數可藉由填充係數來加以控制，因此可由入射光的 TE wave 波長及 TM wave 波長以設計出適當的光柵週期，再利用抗反射鍍模技術來製作次波長之偏極光分光器。

本計劃所製作之多層膜次波長偏極光分光器的頻寬由 0.51 至 0.59 μm 。平均分光效率可達 97%，且入射光範圍在 ± 10 度之間，故此偏極光分光器可用於平板式的 pre-polarizer。

若以 $\frac{\lambda}{4n_{H,TE}} / \frac{\lambda}{4n_{L,TE}}$ 來取代原本的 $\frac{3\lambda}{4n_{H,TE}} / \frac{\lambda}{4n_{L,TE}}$ 之 dielectric mirror，則可使偏極光分光器的頻寬增加，藉由之前推導的公式可以算出適當的填充係數，以得到低反射高頻寬之分光器模型。

(四)、參考資料

1. Daniel H. Raguin and G. Michael Morris, "Structured surfaced mimic coating performance" **Laser Focus World**, P.113, April 1997.
2. Carlos R. A. Lima, Leandro L. Soares, and Lucila Cescato, "Reflecting polarizing beam splitter" **Optics Letters**, Vol.22, No.4, February, 1997
3. Daniel H. Raguin and G. Michael Morris, "Subwavelength Structured surfaced and their Applications" **NASA Conference Publication 3227, Conference on Binary Optics**, 32-25, 2, 1993, P.87.
4. Eric B. Grann, M. G. Noharam, and Drew A. Pommet, "Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two-dimensional subwavelength binary gratings", *J.Opt. Soc. Am. A*, Vol.11, No.10, October 1994, P.2695.
5. Rong-Chung Tyan, "Design, fabrication, and characterization of form-birefringent multiplayer polarization beam splitter", *J.Opt. Soc. Am. A*, Vol.14, No.7, July 1997, P.1627
6. 謝章仁,「Fresnel 及 Binary 非傳統透鏡陣列光學元件的設計製作技術研究」, 國立交通大學, 碩士論文, 民國 84 年。
7. 張勝羽,「中紅外二元式 Fresnel 微小光學元件的設計與製作」, 國立交通大學, 碩士論文, 民國 85 年。
8. 謝漢萍,「液晶顯示影像最佳化及光效率提升」, 工業技術研究院委託學術機構研究報告, E86011, 1997。
9. H. P. D Shieh, K. W. Lin, J. C.Yoo, M. J. Liaw, C. M. Chang, F. J. Ko, J. F. wong, "Optical Components for High Throughput Projection Display". *SID '97*, 923. 1997.