

# 凹面型微光柵分光元件之設計與應用

## Design and Application of a Micro-Concave-Grating Demultiplexer

林暉雄、林俊廷、林宇仁、傅同龍、林郁欣、陸懋宏

Hui-Hsiung Lin, Jung Tim Lin, Yu-Jen Lin, Tong-Long Fu, Yu-Hsin Lin, Mao-Hong Lu

本文運用羅倫圓的觀念設計凹面型微光柵，使其同時具備平面型微光柵和凹面鏡（或聚焦透鏡）之特性，進而實現單一元件同時具備波長分光與聚焦成像之功能。利用光程展開法、光程追跡法、惠更斯積分法和嚴格耦合波理論等方法進行設計與分析該微光柵元件之分光特性，成功地設計出通訊用紅外光波段：81 通道、頻寬 (FWHM) 為 0.181 nm、頻道間距小於 0.39 nm，與生醫用可見光波段：380 nm - 780 nm、解析度為 0.18 nm - 0.40 nm，頻道間距為 1 nm 等分光元件，並經 ICP 側壁鏡面深蝕刻技術製作出垂直度小於  $\pm 1^\circ$  度與側壁平均粗糙度小於 5 nm 之高密度波長分波元件。

In this paper a novel micro-concave-grating that combines the both function of a micro-plano-grating and a concave mirror (or focusing lens) is designed with the Rowland circle concept. Consequently, the wavelength division and the focusing on image plane can be simultaneously realized with such a device. The approach of expanding the light-path-function, ray tracing, Huygens diffraction integral, and rigorous coupled wave theory are used in designing the micro-concave-grating and analyzing its beam diffraction characteristics. A device used for the wave division demultiplexing of fiber communication with 81 channels about 0.181nm FWHM, and less than 0.39nm channel spacing has been successfully carried out. This micro-concave-grating for DWDM was fabricated by ICP-RIE advanced silicon etching (ASE) technique with a sidewall perpendicularity of  $90 \pm 1^\circ$  and an average surface roughness of less than 5nm. Besides, a micro-concave-grating working in the visible wavelength range 380 - 780 nm with resolution of 0.18 - 0.40nm and channel spacing of about 1nm for biomedical applications is also presented.

### 一、前言

西元 1882 年 H. R. Rowland 提出凹面光柵波長分光元件，120 年來已經發展出各種不同之應用，尤其在光譜分析儀與光通訊用途之波長多工 / 解多

工器的系統中凹面光柵已經扮演重要角色。

近年來上述之光電系統都已經微小化、積體化成微光譜儀與高密度波長多工解 / 多工器。微光譜儀依適用波長區分為深紫外光譜儀、紫外 - 可見 - 近紅外光譜儀及中紅外光譜儀。常用於生化檢驗、

血液分析、顏色量測、水質分析、食品加工分析、藥品製程監測、環保氣體分析等等用途。這種微型儀器具備波長可變性、非破壞性、非侵入性、高靈敏度、高化學鑑別度及快速數據分析等優點。而高密度波長分波元件之設計技術目前可以分為四種：一、光學濾光片（採用多層鍍膜技術），二、光纖光柵，三、光纖耦合器，四、光波導元件。前三種技術皆有商品化之規格推出，而光波導型波長分波元件除了低通道數已有少量商品化以外，大都仍在實驗室研發階段，甚少有商品化，但卻是未來最被看好的技術。光波導型元件很容易製作 90 個以上之波長，非常適合長途之通訊與數據網路。光波導型波長分波元件一般又可分成兩類：一、凹面型微光柵 (micro concave gratings, MCG)<sup>(1,2)</sup>，二、陣列型波導光柵 (arrayed waveguide grating, AWG)<sup>(3)</sup>。以元件結構而言，AWG 的陣列波導數甚少於 MCG 的光柵齒數，因而限制了自由空間頻譜區 (free spectral range, FSR) 的波長頻道數目，更侷限了元件往高密度發展之趨勢<sup>(4)</sup>。

波導式凹面型微光柵元件已經有很多應用，如單晶積體化後可形成波長解多工器<sup>(4,5)</sup>，再結合光感測器則形成光柵型微光譜分析儀<sup>(6)</sup>，或結合主動增益材料則形成可調波長雷射<sup>(7)</sup>等。

凹面型微光柵元件當今最關鍵之技術課題有二：一、目前尚無商用軟體可供模擬設計，必須自行編碼進行數值計算；二、要求具備高品質的平坦度與垂直度之側壁深蝕刻製程。文獻上<sup>(4)</sup>已發表之微光柵側壁鏡面深蝕刻製程包括有化學輔助離子束

蝕刻 (CAIBE)、反應離子蝕刻 (RIE)，或聚焦式離子束製程技術 (FIB) 等技術。我們在旁軸近似下運用光程展開法、光程追跡法、惠更斯積分法和嚴格耦合波理論等進行設計與分析該元件之分光特性及光場分布，並成功地開發出凹面型微光柵元件之分析設計技術與高品質之感應耦合電漿 (ICP) 側壁鏡面製程技術<sup>(8)</sup>。

## 二、光柵之分類與工作原理

依據工作原理的不同光柵可分為五類：全像型 (holographic) 光柵、閃耀型 (blaze) 光柵、echelette<sup>(9)</sup> 型光柵、薄層型 (echelon<sup>(10)</sup>/ lamellar) 光柵、階梯型 (echelle<sup>(11)</sup>) 光柵等。全像型光柵與閃耀型光柵屬於較一般常見到之光柵結構，其繞射階數在 1 - 5 之間，光柵頻率很高，尤其是全像型光柵元件。Echelette 型光柵是於 1937 年由 Wood 所提出，其工作原理介於傳統型與薄層型光柵之間，主要特徵是光柵齒數較少，其工作波段最適合於紅外光譜儀。薄層型光柵是 Michelson 於 1898 年利用許多相同的薄層平行玻璃板堆疊成階梯狀，光束從側面平行入射，可獲得非常高解析度之光柵，主要工作波段在紫外光波段。階梯光柵是 Harrison 於 1949 年所提出，主要特徵為具有既寬且淺之光柵齒形，其入射光大於 45 度，此種光柵通常操作繞射級數於 1000 級，具有  $10^6 - 10^7$  超高之解析本領，通常使用於研究 Zeeman 效應或同位數結構譜線分析。各類型光柵之特徵請參考表 1。

表 1. 依據不同的工作原理所衍生之光柵類型。

光柵類型	一般光柵		Wood 光柵	Michelson 光柵	Harrison 光柵
	Holographic 型	Blazed 型	Echelette 型	Echelon 型	Echelle 型
繞射階數 (diffraction orders)	約 1 - 5	約 1 - 2	約 15 - 30	約 2000	約 1000 以上
光柵頻率 (groove frequencies)	約 1200 - 3600 grooves/mm	約 500 - 1200 grooves/mm	約 80 - 120 grooves/mm	約 4 grooves/mm 以上	約 20 - 316 grooves/mm
工作波段 (spectral regions)	紫外 - 可見 - 紅外	紫外 - 可見 - 紅外	紅外	紫外	紫外 - 可見 - 紅外
光柵齒形 (Groove's form)	正弦曲線	三角形	三角形	薄層形	三角形
解析本領 (resolving power)	約 $10^4$	約 $10^4$	約 $10^5$	約 $10^5 - 10^6$	約 $10^6 - 10^7$

若以光柵外型來分類，又可分為平面型（反射或透射）光柵，凹面型（反射）光柵，凸面型（透射）光柵。其中凹面型光柵具有平面型光柵和凹面鏡（或聚焦透鏡）之特性，可達成單一元件同時具備波長分光與聚焦成像之功能。近年來若干文獻報導<sup>(1,2,12)</sup>在半導體材料上設計中低階數之階梯光柵在凹面波導上，或設計全像型凹面光柵在自由空間中傳播<sup>(13)</sup>，並使其工作波段在光通訊的 C 或 L 波段，形成高密度波長多工解 / 多工器，該關鍵性元件儼然已經成為下一世代光通訊 DWDM 系統的最佳解決方案。

本文運用羅倫圓 (Rowland's circle) 觀念設計兩種凹面型微光柵波長分光元件，分別為波長區間 380 nm - 780 nm、解析度為 0.18 nm - 0.40 nm、應用於生醫晶片之閃耀式凹面型微光柵，與 81 通道、頻寬 (FWHM) 為 0.181 nm、頻道間距小於 0.39 nm、應用於高密度波長多工 / 解多工器之準階梯式凹面型微光柵。

### 三、凹面型微光柵之設計原理<sup>(14)</sup>

凹面型微光柵的結構結合了光柵分光和凹面鏡成像的功能，在一般平面微光柵分光時，入射光及繞射光均為平面波，因此通常在光學系統中需要額外加兩個凹面鏡進行聚焦與分光的功能，若設計成凹面型微光柵，則只需要一個元件即可達成相同

目標，不但可減少在反射過程中光能量的損耗，更大幅減少所佔用之空間，此對於光學系統而言，因減少所需的元件數量，而降低了系統對準組裝之複雜性。

考慮一典型的凹面型微光柵分光元件之光路圖如圖 1，C 點為凹面型微光柵的曲率中心，P 點為一入射點（光源），繞射光（聚焦）在 Q 點。若光柵的曲率滿足旁軸近似，可以將 A 點附近的光柵視為平面光柵，CA 為此平面光柵的法線，所以其入射角和繞射角分別為  $\alpha$ 、 $\beta$ ，若想要獲得第  $m$  階干涉條紋，則光柵方程式：

$$p(\sin\alpha + \sin\beta) = m\lambda \quad (1)$$

$p$  為光柵的週期。因入射光為一點光源，所以必須知道在入射角度變動時對此光柵的繞射角度之影響，對 (1) 式微分可以得到其關係式：

$$\cos\alpha\delta\alpha + \cos\beta\delta\beta = 0 \quad (2)$$

同理，於光柵上另一點 B 點時，此點附近的光柵亦視為平面光柵，CB 為此平面光柵的法線，則此時的入射角和反射角分別為  $\alpha + \delta\alpha$ 、 $\beta + \delta\beta$ 。再從三角形 ACX 和三角形 PBX 來看，因為其具有對頂角的關係，所以我們可以得到：

$$\alpha + \delta\gamma = \alpha + \delta\alpha + \delta\sigma \Rightarrow \delta\alpha = \delta\gamma - \delta\sigma \quad (3)$$

其中， $\delta\sigma$  為入射點光源張角。同理可以得到：

$$\delta\beta = \delta\gamma - \delta\rho \quad (4)$$

其中， $\delta\rho$  為繞射光波匯聚角。若考慮  $\delta\alpha$ 、 $\delta\beta$ 、 $\delta\gamma$ 、 $\delta\sigma$ 、 $\delta\rho$  皆滿足近軸近似，則由幾何關係可以得到：

$$\delta\gamma = \frac{\overline{AB}}{R}, \quad \delta\sigma = \frac{\overline{AB}\cos\alpha}{r}, \quad \delta\rho = \frac{\overline{AB}\cos\beta}{r_1} \quad (5)$$

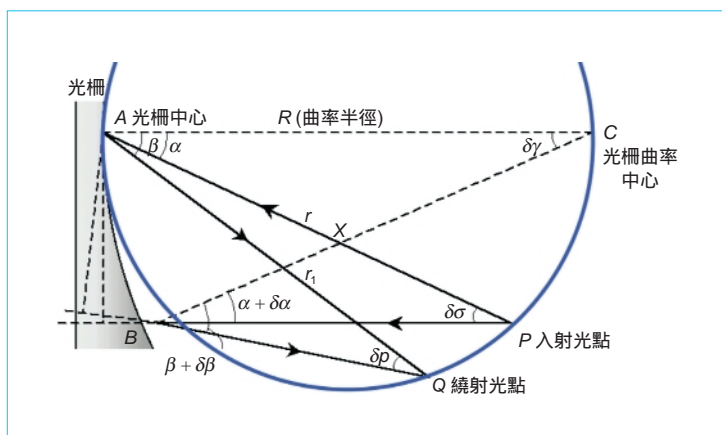


圖 1. 典型的凹面型微光柵元件之光路圖。

其中， $R$  為  $\overline{AC}$  的長度且為光柵之曲率半徑， $r$  為  $\overline{AP}$  的長度即入射點至  $A$  點之距離， $r_1$  為  $AQ$  的長度即從  $A$  點到繞射點  $Q$  的距離。將式 (3) 式、(4) 式、(5) 式代入 (2) 式，即可以得到凹面光柵方程式：

$$\frac{\cos \alpha}{R} - \frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos \beta}{R} - \frac{\cos^2 \beta}{r_1} = 0 \quad (6)$$

若要求解入射角  $\alpha$  和繞射角  $\beta$ ，最方便的方法是將前兩項和後兩項各自取為零，即可以得到：

$$\frac{\cos \alpha}{R} = \frac{\cos^2 \alpha}{r}, \quad \frac{\cos \beta}{R} = \frac{\cos^2 \beta}{r_1} \quad (7)$$

所以，可以得到入射光點與繞射光點的位置關係如下：

$$r = R \cos \alpha, \quad r_1 = R \cos \beta \quad (8)$$

此特殊解的意義為其入射點和繞射點位置皆落於直徑為  $R$  的圓上，此即著名的羅倫圓 (Rowland's circle)；其中， $R$  亦為凹面型微光柵的曲率半徑。

要解此特殊解，則必須以小角度入射並選取合理的近似條件，即入射光張角  $\delta\sigma$  判據所對應的弧長可以用其割線來取代，以作為近似可用範圍之參考<sup>(15)</sup>：

$$f(\delta\theta) = \frac{2R \cdot \cos\left(\frac{\pi - \delta\theta}{2}\right)}{\delta\theta} - \frac{R}{\delta\theta} \quad (9)$$

當角度小於 8 度時，兩者間之誤差在 0.1% 以下，於此條件下羅倫圓之近似分析方法方可適用。微光柵曲面之張角愈小則所設計之微光柵精確度愈高。

考慮自由光譜範圍 (free spectral range, FSR)，其意義是指繞射 (或干涉) 圖樣中相鄰兩繞射級間所包含的波長 (或頻率) 範圍，可表示為：

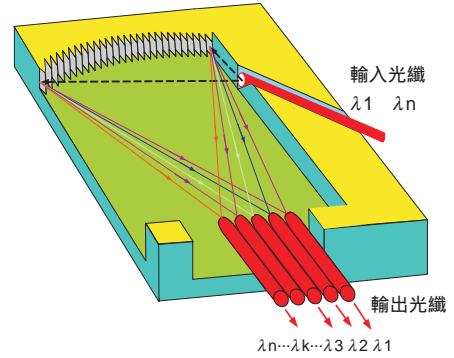


圖 2. 凹面型微光柵之結構示意圖。

$$FSR_\lambda = \lambda/m = N \times \Delta\lambda = N \times \Delta\nu \quad (10a)$$

$$FSR_\nu = \nu/m = N \times \Delta\nu \quad (10b)$$

其中  $\Delta\lambda$  為波長間距， $\Delta\nu$  為頻道間距， $m$  為繞射級數， $N$  為兩繞射級間距內所包含的頻道數 (波長或頻率)。而解析本領 (resolving power, RP) 定義為： $RP \equiv \lambda/\Delta\lambda = \nu/\Delta\nu$ ，或  $RP = m \times M$ ，其中  $M$  為光柵刻痕齒數 (number of grating grooves)。所以，對干涉條紋而言，由可得  $RP = m \times N$ 。其中  $N$  又稱為反射細度 (reflecting finesse)。

本文所設計之凹面型微光柵結構，係在羅倫圓上設計具有閃耀斜角 (blazed angle) 之可見光波段的凹面型微光柵與準階梯型 (echelle-like type) 之光通訊  $C$  波段的凹面型微光柵，且光束在自由空間中傳播，其光柵結構示意圖，參考圖 2。

#### 四、繞射光場與像差分析

凹面型微光柵是結合凹面鏡和光柵的功能，故無需額外之凹面鏡 (或凸透鏡)。假設考慮和平面光柵一樣的條件下，其中  $\theta_b$  為光柵齒形的傾斜角， $\theta_i$  為入射光的角度， $\theta_m$  為繞射 (反射) 角度，首先定義  $p$  為光柵的週期 (條紋間距)，而  $b$  為單一週期內有效反射面的大小在水平面上的投影，參考圖 3，則可以表示為：

$$b \cong \frac{p \cos \theta_i \cos \theta_m}{\cos(\theta_i - \theta_m)} \quad (11)$$

由光柵各週期的頂點所發出之光波到輸出面上之總相位差可以表示：

$$\begin{aligned}
 & k(\Lambda + \Delta) \quad (12) \\
 = & k \left\{ \left[ (R \cos \theta_i \sin \theta_i - jp)^2 + \right. \right. \\
 & \left. \left. \left( R \cos^2 \theta_i - R + \sqrt{R^2 - (jp)^2} - p \tan \theta_b \right)^2 \right]^{1/2} + \right. \\
 & \left. \left[ (R \cos \theta_m \sin \theta_m - jp)^2 + \right. \right. \\
 & \left. \left. \left( R \cos^2 \theta_m - R + \sqrt{R^2 - (jp)^2} - p \tan \theta_b \right)^2 \right]^{1/2} - \right. \\
 & \left. R(\cos \theta_i + \sin \theta_m) \right\}
 \end{aligned}$$

其中  $j$  為變數，其值從 1 到  $n/2$ ， $n$  為光柵的總條紋數， $\Delta$  為在頂點時入射光因  $\theta_i$  所引起之光程差， $\Lambda$  為在頂點時繞射光因  $\theta_m$  所引起之光程差。每一光柵週期內，反射面上每一個點光源相對於頂點點光源的總相位差可以表示為  $k\delta$ ，其中  $\delta$  隨著光柵張角與光柵齒形位置而改變。最後利用惠更斯積分法 (Huygens diffraction integral formula) 計算在成像面的光場強度分布，此時可得到某一點光柵的繞射光場分布  $dE_R$ ：

$$\begin{aligned}
 dE_R &= dE_0 \exp[jk(\Delta + \Lambda - \delta) - i\omega t] \quad (13) \\
 dE_0 &= dE_i \cdot ds
 \end{aligned}$$

其中  $E_i$  為入射光強度， $ds$  為有效光柵區間。所以整個光柵的繞射光場強度之分布可以表示為 (14) 式：

$$\begin{aligned}
 E_R &= E_L \exp \left\{ -ik \left[ R(\cos \theta_i + \cos \theta_m) - \beta \right] \right\} \cdot b \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right) \quad (14) \\
 & \sum_{j=1}^{n/2} \left\{ \exp \left\{ ik \left[ \sqrt{(R \cos \theta_i \sin \theta_i + jp)^2 + \left( R \cos^2 \theta_i - R + \sqrt{R^2 - (j-1)^2 p^2} - p \tan \theta_b \right)^2} + \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \sqrt{(R \cos \theta_m \sin \theta_m + jp)^2 + \left( R \cos^2 \theta_m - R + \sqrt{R^2 - (j-1)^2 p^2} - p \tan \theta_b \right)^2} \right] \right\} + \\
 & \exp \left\{ ik \left[ \sqrt{(R \cos \theta_i \sin \theta_i - jp)^2 + \left( R \cos^2 \theta_i - R + \sqrt{R^2 - (jp)^2} - p \tan \theta_b \right)^2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \sqrt{(R \cos \theta_m \sin \theta_m + jp)^2 + \left( R \cos^2 \theta_m - R + \sqrt{R^2 - (jp)^2} - p \tan \theta_b \right)^2} \right] \right\} \left. \right\}
 \end{aligned}$$

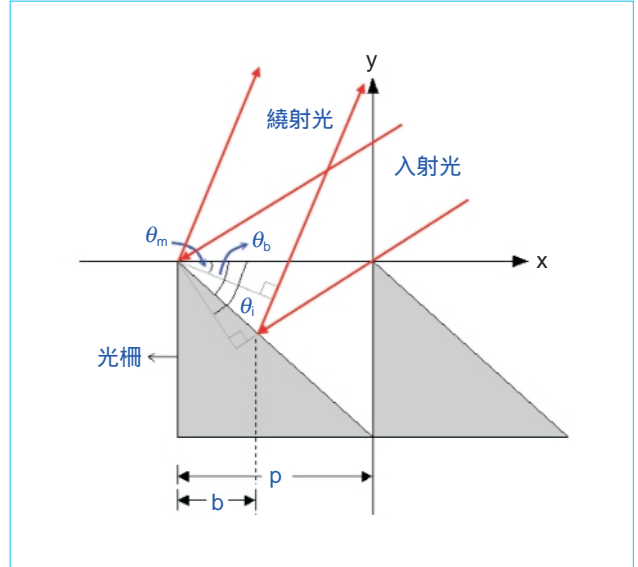


圖 3. 微光柵單一週期內有效反射面示意圖。

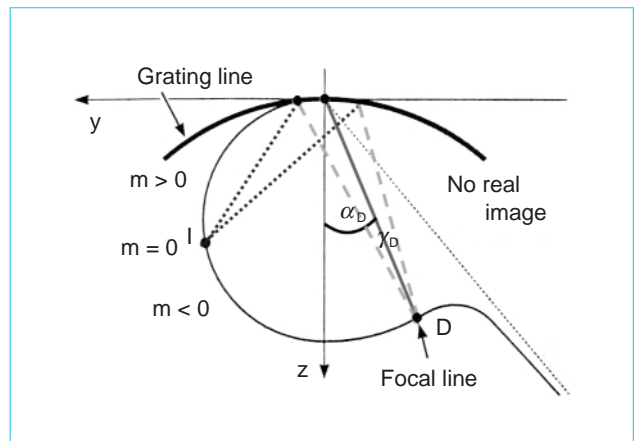


圖 4. 凹面型微光柵之光柵曲線示意圖。

其中， $\beta = \frac{1}{2}k \frac{b}{\cos\theta_b} [\sin(\theta_b - \theta_m) - \sin(\theta_i - \theta_b)]$ 。

(14) 式表示對所有的有效範圍作積分，所得凹面型微光柵於成像處之繞射光場分布與繞射效率的結果。

分析凹面型微光柵元件之像差 (aberration) 時，考慮光柵曲線 (grating line)  $Z_a(y)$ ，參考圖 4。假設入射光點位於光柵曲線左側  $I$  點上， $O$  為光柵曲線中心， $D$  為觀察點，所以凹面型微光柵的光程函數 (light-path-function) 表示為：

$$F(y) = \overline{IP} + \overline{PD} - (\overline{IO} + \overline{OD}) + m\lambda G(y) \quad (15)$$

其中  $\overline{IP}$  與  $\overline{IO}$  為入射光程，而  $\overline{PD}$  與  $\overline{OD}$  為繞射光程， $m\lambda G(y)$  為光柵週期性結構之有效光程差 (effective path difference)， $G(y)$  為光柵齒形函數。

經由 (15) 式說明了若要獲得完美的無像差 (aberrationfree) 之凹面光柵時，沿著整條光柵曲線之  $F(y)$  必須為零，此時觀察點  $D$  即形成無像散點 (stigmatic point)。為了分析像差，我們對光程函數  $F(y)$  作四階的泰勒級數展開：

$$\begin{aligned} F'(0) &= F'_I(0) + \sin\alpha_D + m\lambda G'(0) & (16) \\ F''(0) &= F''_I(0) + F''_D(0) + m\lambda G''(0) \\ F'''(0) &= F'''_I(0) + F'''_D(0) + m\lambda G'''(0) \\ F^{(IV)}(0) &= F^{(IV)}_I(0) + F^{(IV)}_D(0) + m\lambda G^{(IV)}(0) \end{aligned}$$

其中  $F_I(y) = \overline{IP} - \overline{IO}$ ， $F'_D(0) = \sin\alpha_D$ ，而且  $F'''(0)$  即代表彗差 (coma aberration)， $F^{(IV)}(0)$  即代表球差 (spherical aberration)。在整個光譜區域中要設計出既無彗差又無球差是不可能之事，只有羅倫圓的凹面光柵具有無彗差，即  $F'''(0) = 0$ 。經由泰勒級數展開凹面光柵之光程函數後，可精確地分析其像差，得以設計出最佳化的光柵曲線。

為了更嚴謹、更有效率來模擬計算凹面型微光柵元件之光學特性，我們再引用嚴格耦合波理論 (rigorous coupled wave theory, RCWT)<sup>(16)</sup> 來計算各繞射級數之效率，並進一步設計分析光柵齒形之最佳結構。後面將運用上述之分析理論實際設計四組元件：應用於生醫晶片之分光元件與光通訊用途之高密度波長分波元件。

## 五、應用於生醫晶片之凹面型微光柵分光元件

第一組凹面型微光柵分光元件所設計之自由光譜範圍 (FSR) 為 580 nm，繞射級數設計在 +1 級，波長工作區間為 380 nm - 780 nm，因此可考慮此光柵之結構為閃耀型光柵。為了考量此光柵與線形 CCD (1024 × 7.8 μm) 組裝問題，特別設計中心波長之繞射角度在零度附近，光柵的設計參數為：中心波長為 580 nm，光柵週期為 1 μm，光柵高度為 0.32139 μm、閃耀斜角 (blaze angle) 為 17.7299 度，羅倫圓直徑為 7800 μm，光柵長度為 2170 μm，中心波長繞射角為 -0.040276 度，光柵分光頻寬 (FWHM) 約為 0.18 nm - 0.40 nm，頻道間距 (channel spacing) 小於 1 nm。

經分析其各階繞射效率分布狀況，參考圖 5，可明顯看出最強之譜線都落在第一級上，但是在閃

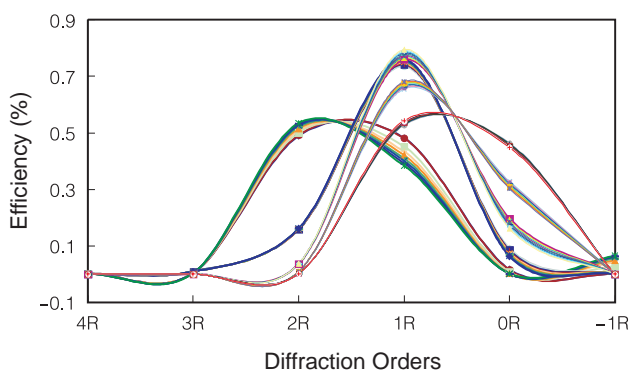


圖 5. 分析第一組參數所設計之光柵參數各階繞射效率分布狀況。

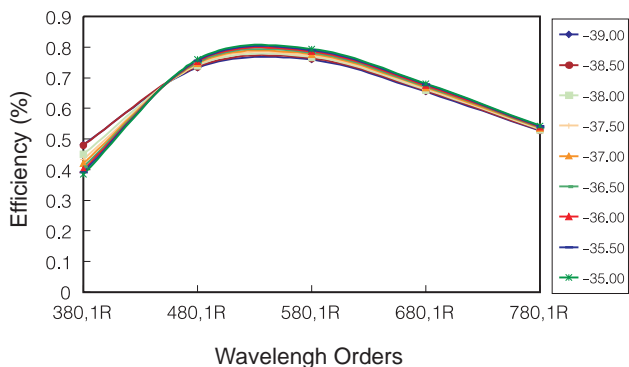


圖 6. 第一組參數微調光柵齒型結構，使其滿足所需的 FSR 有均勻的常態分布。

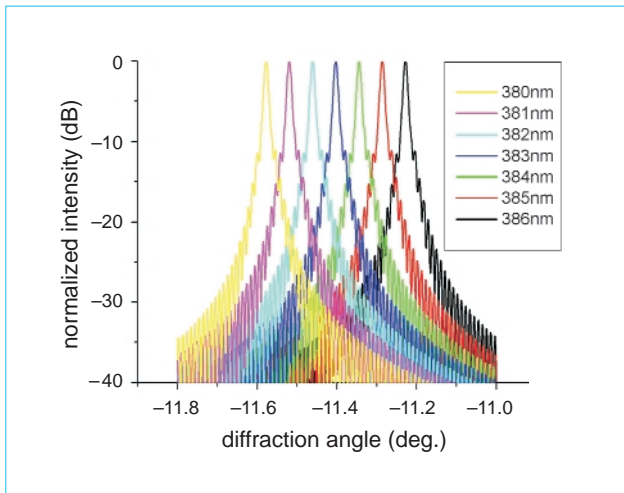


圖 7. 波長 380 nm 附近輸出頻譜之光場強度分布情形，串音程度約 -23 dB。

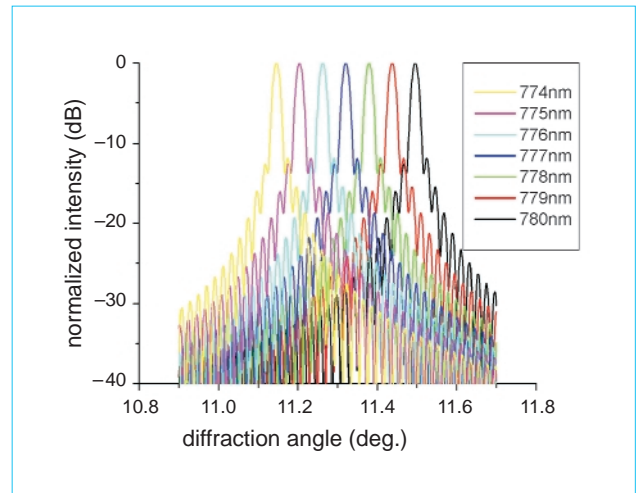


圖 9. 波長 780 nm 附近輸出頻譜之光場強度分布情形，串音程度較高，約 -18 dB。

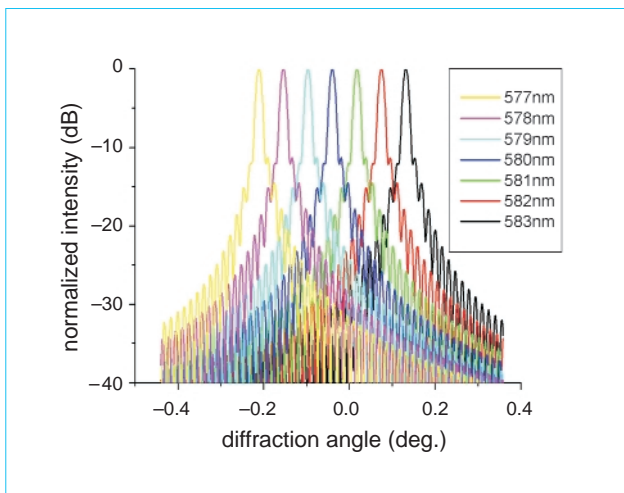


圖 8. 波長 580 nm 附近輸出頻譜之光場強度分布情形，串音程度較高，約 -20 dB。

耀斜角上的頻譜強度分布除了中心波長是最強外，並無法保證整個 FSR 有常態分布，亦即無法兼顧短 (380 nm)、中 (580 nm)、長 (780 nm) 等各波段有相當之光場效率分布，於是進行光柵齒型微調，最後獲得閃耀斜角為 20 度，使其滿足所需的 FSR 有均勻的常態分布，參考圖 6。

於微調光柵結構時，同時進行計算各個入射角微量變化對繞射角 (反射角) 與繞射效率之影響，進而設計出一組最佳化之凹面型微光柵參數，參考

表 2。經由表 2 可獲知，當入射角為 -35.5 度時可獲得反射角為 -0.040276 度，相當準確地落在光柵曲線的法線上，而且所設定之光譜範圍皆有很好的效率分布。

接著再計算入射光經凹面光柵分光後在成像處繞射光場分布情形，利用惠更斯積分法將上述所設計之光柵參數代入 (14) 式後可計算出其光場分布情形，包括 380 nm、580 nm 與 780 nm 等前中後三光譜區於成像處之光場強度分布圖，參考圖 7 - 9 所示。由輸出頻譜圖可清楚觀察出 380 nm 波段相鄰兩頻譜之串音 (crosstalk) 程度約 -23 dB，580 nm 波段相鄰兩頻譜之串音程度較高，約 -20 dB，而 780 nm 波段相鄰兩頻譜之串音程度又再高一些，約 -18 dB。

## 六、光通訊用途之高密度波長分波元件<sup>(17,18)</sup>

第二組凹面型微光柵分光元件所設計之自由光譜範圍 (FSR) 為 103.3 nm，設計繞射級數在 +6 級，波長工作區間為 ITU 規範下之 C 波段 (1528.77 nm - 1560.61 nm)，因此可考慮此光柵之結構為閃耀型光柵。光柵的設計參數為：中心波長為 1550 nm，週期為 15  $\mu\text{m}$ ，光柵高度為 4.8  $\mu\text{m}$ ，光柵齒

$\theta_i$	380,1R	480,1R	580,1R	680,1R	780,1R	反射角
-39.00	0.481379	0.733558	0.759368	0.654686	0.526637	-2.8269972
-38.50	0.480626	0.737031	0.764107	0.658286	0.529085	-2.4366437
-38.00	0.451283	0.740462	0.768746	0.661811	0.531447	-2.0436854
-37.50	0.433565	0.743851	0.773284	0.665262	0.533718	-1.6481358
-37.00	0.420729	0.747198	0.777722	0.668637	0.535896	-1.2500079
-36.50	0.410037	0.7505	0.782059	0.671935	0.537972	-0.8493142
-36.00	0.400633	0.753756	0.786294	0.675154	0.539937	-0.4460666
-35.50	0.39212	0.75696	0.790428	0.678294	0.541776	-0.0402764
-35.00	0.38428	0.760106	0.794458	0.681354	0.54346	0.36804562

表 2.

計算第一組參數各入射角微量變化對繞射角 (反射角) 與繞射效率之影響。

形頂角為直角，斜角為 19.48 度，羅倫圓半徑為 76.92 mm，光柵長度為 21.39 mm，中心波長繞射角為 -0.1441 度。共 81 通道，頻寬 (FWHM) 約為 0.181 nm，頻道間距 (channel spacing) 小於 0.39 nm。

經分析其各階繞射效率分布狀況，參考圖 10，可明顯看出最強之譜線都落在第六級上，再分析所設計之頻譜範圍內之光效率分布曲線後，可獲得各波長對光柵高度之效率分布圖。

同理經由最佳化分析後，同時計算各個入射角微量變化對繞射角 (反射角) 與繞射效率之影響，進而設計出一組最佳化之凹面型微光柵參數，參考表 3。經由表 3 可獲知，當入射角為 -38.5 度時可獲得反射角為 -0.1441 度，相當準確地落在光柵曲線的法線附近上，而且所設定之光譜範圍皆有很好的效率分布，其中中心波長附近入射角對繞射效率之影響，參考圖 11。數據中明顯指出最強之光效率

皆集中在光柵高度為 4.8  $\mu\text{m}$ ，繞射級數為 +6 級之參數上，且此時所有的 FSR 均有常態分布。最佳化後之光柵閃耀斜角為 19.48 度，入射角與光柵高度微量變化對繞射效率之影響，參考圖 12。

雖然第二組參數有很高之繞射效率 (約 76%)，且反射角也在光柵法線處，但是其羅倫圓直徑有點大，較不利於元件製程，因此再設計第三組凹面型微光柵分光元件。第三組所設計之自由光譜範圍 (FSR) 為 155 nm，繞射級數設計在 +10 級，波長工作區間同為 1528.77 nm - 1560.61 nm，因此可考慮此光柵之結構為閃耀型光柵。光柵的設計參數為：中心波長為 1550 nm，光柵週期為 10  $\mu\text{m}$ ，光柵高度為 13.6662  $\mu\text{m}$ ，頂角為銳角，閃耀斜角 (blaze angle) 為 53.8059 度，羅倫圓半徑為 30767  $\mu\text{m}$ ，光柵長度為 8560  $\mu\text{m}$ ，中心波長繞射角為 37.6117 度。共 81 通道，頻寬約為 0.181 nm，頻道間距小於 0.39 nm。

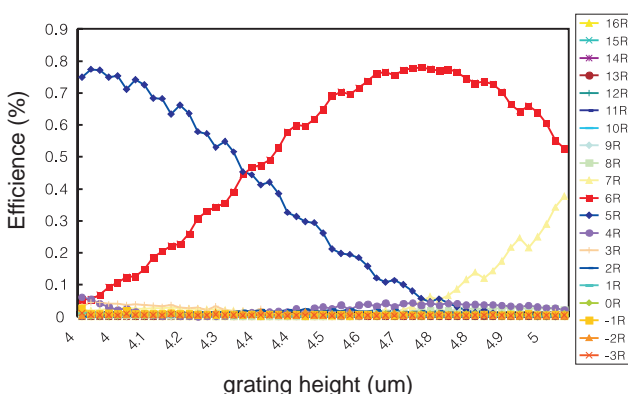


圖 10. 分析第二組參數所設計之光柵參數各階繞射效率分布狀況。

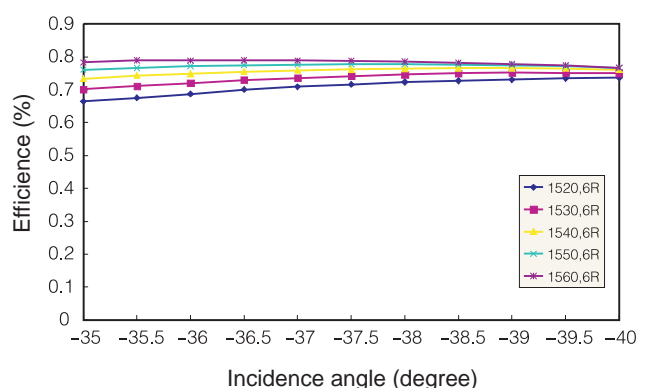


圖 11. 第二組參數其中心波長附近入射角對繞射效率之影響分布圖。



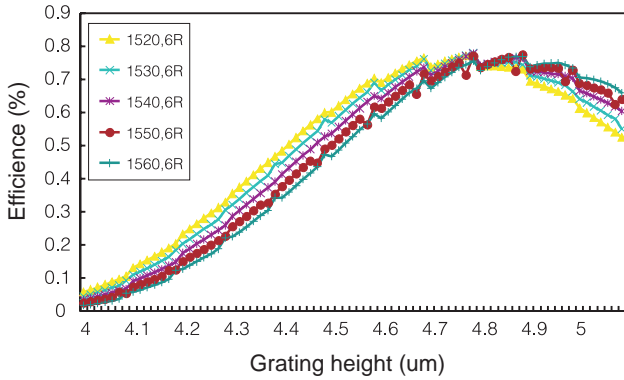


圖 12. 第二組參數入射角與光柵高度微量變化對繞射效率之影響分布圖。

如同前述步驟，分析其各階繞射效率分布狀況，可明顯看出最強之譜線皆落在第十級上，而且其他級繞射光強度都相對地小很多，再分析所設計之頻譜範圍內之光效率分布曲線後，可獲得各波長對光柵高度之效率分布圖，參考圖 13。

接著微調光柵結構，同時進行計算各個入射角微量變化對繞射角（反射角）與繞射效率之影響，此步驟可設計出一組最佳化之凹面型微光柵參數，參考表 4。經由表 4 可獲知，當入射角為  $-70$  度時可獲得反射角為  $37.6117$  度，與入射光同側而且所設定之光譜範圍皆有很好的效率分布，參考圖 14。

為了計算入射光經凹面光柵分光後在成像處繞射光場分布情形，我們同樣運用惠更斯積分法將上述所設計之光柵參數代入 (14) 式後可分析出其光場分布情形，參考圖 15 - 16 所示。經由圖中輸出

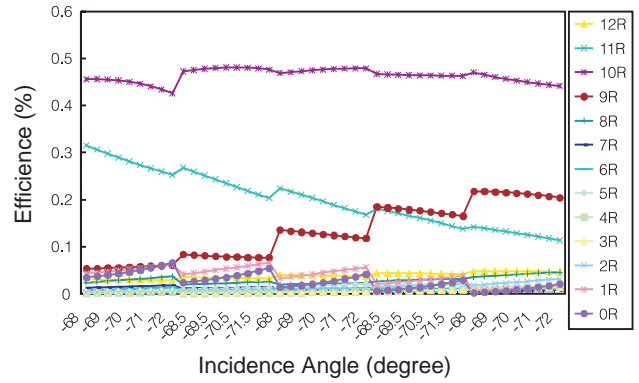


圖 13. 分析第三組參數所設計之光柵參數各階繞射效率分布狀況。

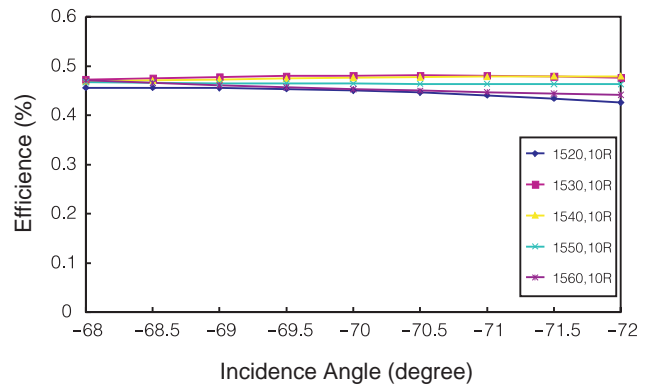


圖 14. 第三組參數其中心波長附近入射角對繞射效率之影響分布圖。

之頻譜圖可清楚觀察出  $1550$  nm 波段相鄰兩頻譜之串音程度約  $-10$  dB，由於頂角為銳角之光柵齒形結構，其尖端部分已經超過黃光製程極限，圖案容

表 3. 計算第二組參數各入射角與光柵高度微量變化對繞射角（反射角）與繞射效率之影響。

$\theta_i$	1520,6R	1530,6R	1540,6R	1550,6R	1560,6R	平均效率	反射角
-35	0.664587	0.701511	0.733905	0.761142	0.783068	0.7288426	2.6608306
-35.5	0.675786	0.710995	0.743884	0.766512	0.789876	0.7374106	2.2521347
-36	0.687447	0.720426	0.748648	0.772052	0.788863	0.7434872	1.8460885
-36.5	0.701039	0.730259	0.755118	0.774547	0.789808	0.7501542	1.4427005
-37	0.709173	0.735674	0.759246	0.776782	0.789388	0.7540526	1.0419799
-37.5	0.716732	0.74201	0.762359	0.777812	0.788229	0.7574284	0.6439362
-38	0.72338	0.746458	0.764619	0.777765	0.786104	0.7596652	0.2485799
-38.5	0.727513	0.749905	0.765829	0.77685	0.782968	0.760613	-0.1440782
-39	0.730966	0.752122	0.765948	0.77477	0.77877	0.7605152	-0.5340268
-39.5	0.734369	0.751378	0.764825	0.771534	0.774742	0.7593696	-0.9212539
-40	0.737082	0.750724	0.761464	0.767048	0.766972	0.756658	-1.3057469

$\theta_i$	1520,10R	1530,10R	1540,10R	1550,10R	1560,10R	反射角
-68.00	0.455847	0.472575	0.468945	0.467046	0.470441	38.522077
-68.50	0.456152	0.47545	0.470868	0.465857	0.465416	38.285648
-69.00	0.4554	0.477805	0.47279	0.465011	0.460886	38.055142
-69.50	0.453524	0.479542	0.474611	0.46443	0.456808	37.830516
-70.00	0.450469	0.480574	0.476235	0.464035	0.45313	37.611732
-70.50	0.446192	0.480822	0.477571	0.463747	0.449802	37.39875
-71.00	0.440662	0.480215	0.478531	0.463487	0.446767	37.191535
-71.50	0.433856	0.478696	0.479035	0.463177	0.443966	36.990052
-72.00	0.425762	0.476216	0.479007	0.46274	0.441339	36.794268

表 4.

計算第三組參數各入射角與光柵高度微量變化對繞射角 (反射角) 與繞射效率之影響。

易變形，因此再模擬一組相同參數但是其光柵齒形之頂角結構為直角，同樣分析其中心波長 1550 nm 波段相鄰兩頻譜分布情況，發現其串音程度提高約 -7 dB。由此可見直角齒形微光柵其光譜雜訊較銳角齒形微光柵之光譜雜訊還要高 3 dB。

## 七、元件實現與特性檢測分析<sup>(17,18)</sup>

本設計元件之實作是在 STS Multiplex 感應耦合電漿離子蝕刻系統中進行，該系統之規格如表 5 所示。

感應耦合電漿離子蝕刻中的蝕刻機制 advanced silicon etch (ASE) 是由 Larmer and Schilp<sup>(19,20)</sup> 所提

出，並利用 Bosch 的交替蝕刻與高分子鈍化 (alternating etch and polymerization) 專利，使側壁鈍化方法來進行矽深蝕刻。蝕刻製程參數中，如氣體流量、反應蝕刻的時間、週期、製程腔體的壓力及上下電極的大小，都是影響本實驗的重要因素<sup>(9,21,22)</sup>。經過不斷重複 ICP 之 Bosch 蝕刻製程步驟後，可製作出深 50  $\mu\text{m}$  以上之側壁鏡面結構。

將上述第六節所分析設計之數據，進行光罩繪製，選用光阻 AZ-6112 (厚度 0.847  $\mu\text{m}$ )，經 405 nm 之汞燈曝光，再將定義好遮罩之矽晶片放置於感應耦合電漿蝕刻機中，進行蝕刻實驗。本實驗第一步驟是利用 ASE 蝕刻機制，進行非等向性向下蝕刻，第二步驟則只通入  $\text{C}_4\text{F}_8$  鈍化保護氣體，以

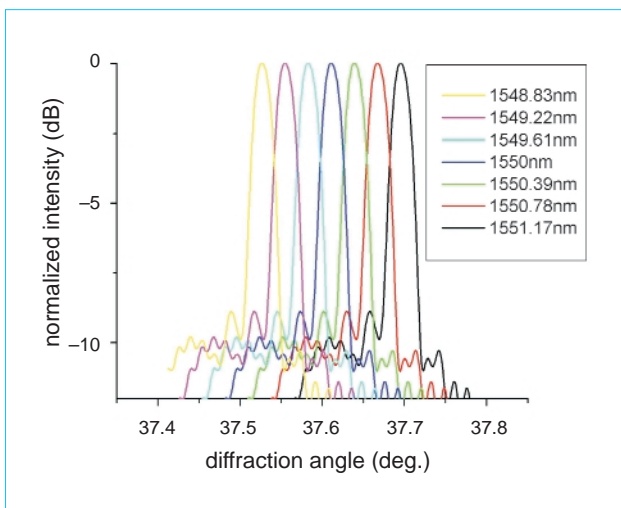


圖 15. 光柵齒形為銳角時，波長 1550 nm 附近輸出頻譜之光場強度分布情形，串音程度較高約 -10 dB。

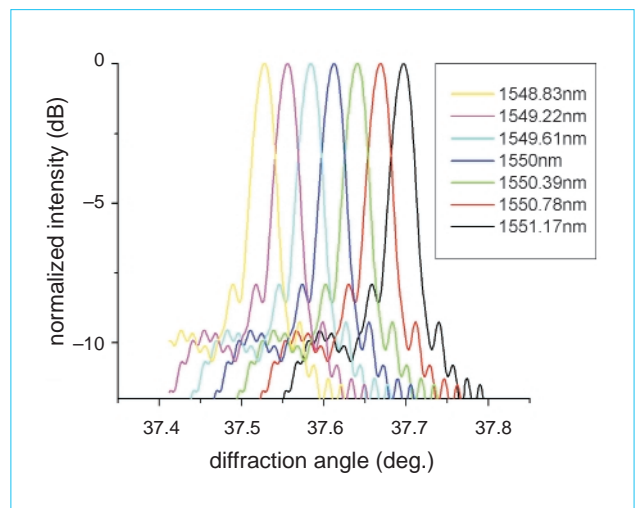


圖 16. 光柵齒形為直角時，波長 1550 nm 附近輸出頻譜之光場強度分布情形，串音程度較高約 -7 dB。

表 5. 感應耦合電漿離子蝕刻系統之規格。

上電極	1000 W
上電極射頻之頻率	13.56 MHz
下電極	300 W
下電極射頻之頻率	13.56 MHz
晶片冷卻方式	背面氦氣冷卻法
固定晶片之方式	機械夾持式
通入之蝕刻氣體	SF <sub>6</sub>
鈍化保護氣體	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>

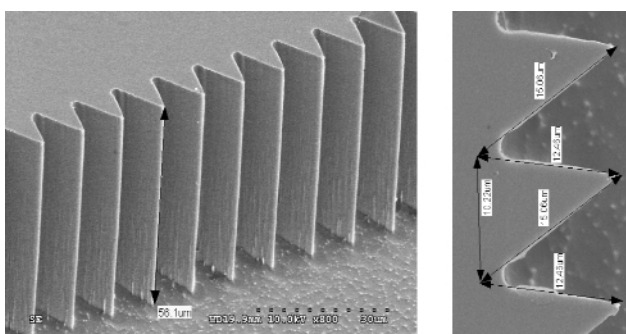
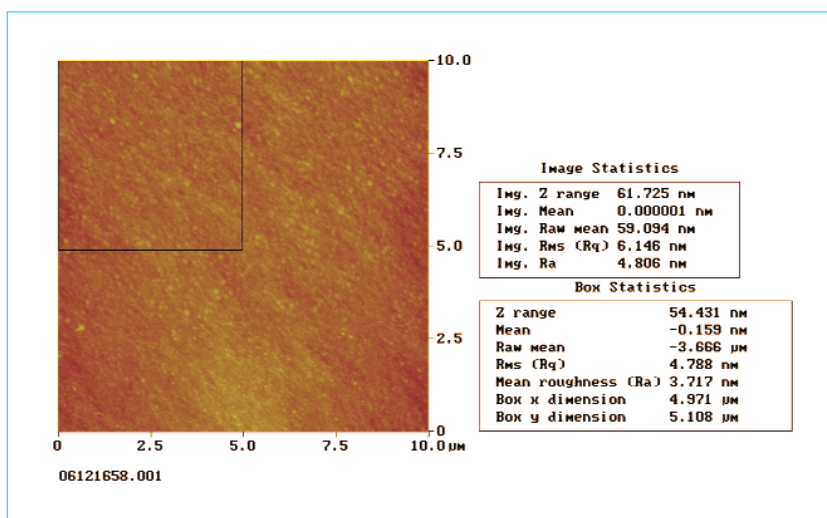


圖 17. 利用 ICP 側壁鏡面蝕刻製程所完成之凹面型微光柵元件的 SEM 攝影圖。

形成較厚的高分子聚合物薄膜 C<sub>x</sub>F<sub>y</sub>，此步驟之目的在於獲得側壁保護層，使得結構之側壁不會被蝕刻，再進行第一步驟將結構底部之高分子聚合物薄膜打掉，使矽暴露出來，而後，再重複上述第二步

圖 18. 凹面型微光柵元件鍍上金反射膜層後，利用 AFM 量測其反射面的粗糙度。



驟，如此不斷地重複一、二步驟，直到蝕刻出微光柵所需要之深度為止。

所完成製作之凹面型微光柵元件為第三組設計參數，經由的 SEM 攝影，可明顯觀察出閃耀型微光柵清晰的輪廓。量測得光柵側壁鏡面的高度大約是 56 μm，參考圖 17。該元件經鍍上金膜反射層後，利用原子顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 量測其反射面的粗糙度，其掃描的區域為 10 μm × 10 μm，鍍上金的平均粗糙度 (R<sub>a</sub>) 為 4.81 nm，參考圖 18。

我們利用寬頻 (amplified spontaneous emission, ASE) 光源 (C + L band)，光譜分析儀 (OSA: accuracy 0.02 nm - 0.04 nm) 等周邊儀器及若干紅外光學器件，架設一套光纖自動對準被動元件檢測系統，如圖 19 所示。

由元件輸出端 (分別為單模單埠光纖與單模陣列光纖 (間距 250 μm)) 接收光訊號後進入光譜分析儀，可測量得頻道之輸出頻譜圖，參考圖 20 及 21。

我們運用前幾節所設計之各種光柵參數，目前已經完成其中一組元件之製程與檢測，該結果與設計之各項參數相當吻合 (插入損耗較大，已經著手進行設計波導型結構，可克服此缺點)，也達到當初所要求之規格，為了更進一步驗證將凹面型微光柵元件應用於生醫晶片，我們正持續進行其他設計參數之微光柵製程與相關之光學特性檢測。

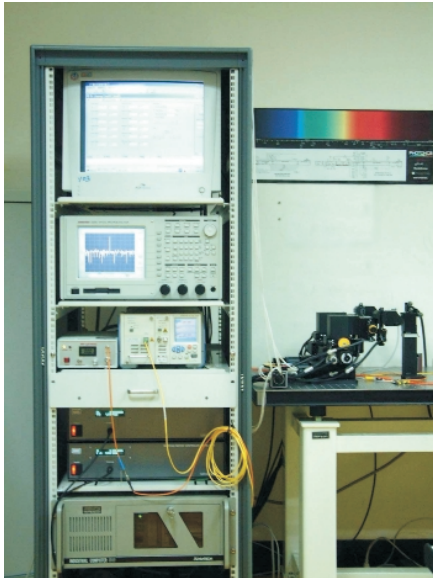


圖 19. 光纖自動對準被動元件檢測系統。

## 八、結論

當通訊頻道朝向高頻道數發展時，AWG 元件尺寸會快速膨脹因而不宜安置於晶圓中，且其良率易受表面不均勻性影響；相對地，凹面型微光柵元件由於元件尺寸小，晶圓表面不均勻性對元件良率之影響很小，又可輕易地達到超過 160 個高頻道數，而且頻道間距更窄，堪稱為下一代之主流<sup>(4)</sup>。我們克服兩個關鍵性技術，成功地開發出凹面型微光柵元件之設計技術與高品質 ICP 側壁鏡面製程技術。所完成設計之元件有應用於光通訊 DWDM 之 81 通道，頻寬約為 0.181 nm，頻道間距

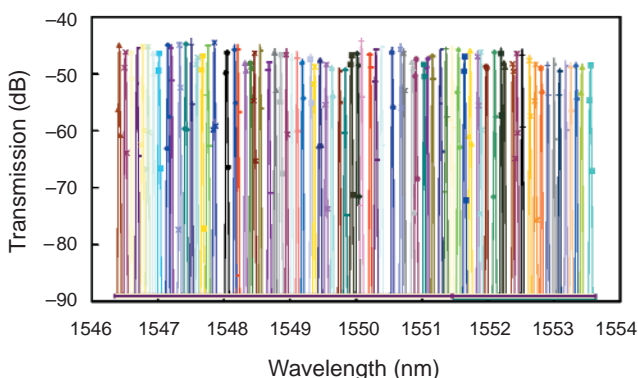


圖 20. 元件輸出端為單埠光纖，測量得其 81 通道之頻譜特性圖。

優於 0.39 nm，以及應用於生醫晶片之可見光波段：380 nm - 780 nm，解析度約為 0.18 nm - 0.40 nm，頻道間距約為 1 nm 等分光元件，並具備側壁垂直度  $< \pm 1^\circ$  與側壁平均粗糙度  $< 5$  nm。

由於本設計採用自由空間傳播，以致於有很大的插入損耗，整體元件效率較低，而其他相關之損耗數據將持續進行檢測，以驗證其可靠度。除此之外，目前我們正進行將此凹面型微光柵元件設計成波導型結構，並結合陣列光纖或線型光感測器，分析設計其相關特性與其他應用。未來該關鍵性技術元件除了可提供下一代光通訊 DWDM 系統的解決方案以外，另可廣泛地用於生醫微機電系統（微光譜儀）等。

## 參考文獻

1. C. Cremer, N. Emeis, M. Schier, G. Heise, G. Ebbinghaus, and L. Stool, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 108 (1992).
2. R. Marz, *Integrated Optics: Design and Modeling*. Norwood, MA: Artech House (1994).
3. K. Okamoto, K. Moriwaki, and S. Suzuki, *Electron. Lett.*, **31** (3), 184 (1995).
4. J.-J. He, B. Lamontagne, A. Delage, L. Erickson, M. Davies, and E. S. Koteles, *Journal of Lightwave Technology*, **16** (4), 631 (1998).
5. B. Anderer, W. Ehrfeld, and D. Munchmeyer, *SPIE*, **1014**, 17 (1988).
6. C. Muller, J. Mohr, *Interdisciplinary Science Reviews*, **18** (3), 273 (1993).
7. J. B. D. Soole, K. R. Poguntke, A. Scherer, H. P. LeBlanc, C. Chang-Hasnain, J. R. Hayes, C. Caneau, R. Bhat, and M. A. Koza, *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 2750 (1992).

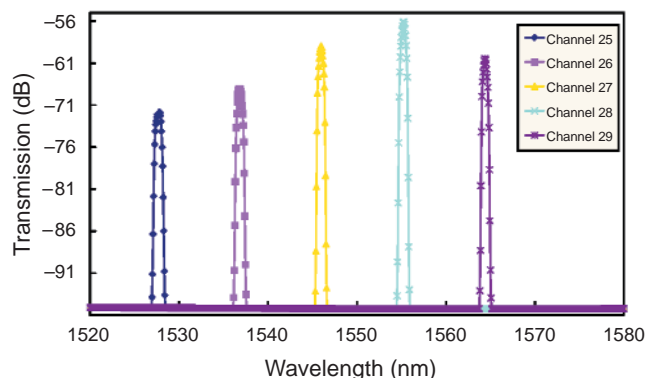


圖 21. 利用陣列光纖，測量其中相鄰五埠光纖（間格 250  $\mu\text{m}$ ）所得通道之頻譜特性圖。

8. 林郁欣, 徐永裕, 劉祥麒, 郭文凱, 周正三, 感應耦合電漿 (ICP) 深矽蝕刻技術, 第七屆微系統科技協會年會暨微機電研討會論文集, 172 (2001).
9. R. W. Wood, *J. Opt. Soc. Amer.*, **34**, 504 (1944).
10. A. A. Michelson, *Astrophys. J.*, **8**, 37 (1898).
11. G. R. Harrison, *J. Opt. Soc. Amer.*, **39**, 522 (1949).
12. E. Loewen, D. Maystre, E. Popov, and L. Tsonev, *Applied Optics*, **34** (10), 1707 (1995).
13. E. G. Churin and P. Bayvel, *IEEE Photonics Technology Letters*, **11** (2), 221 (1999).
14. M. C. Hutley, *Diffraction Gratings*, National Physical Laboratory (1982).
15. 林俊廷, 林烜輝, 周正三, 張哲璋, 林暉雄, 微凹面型光柵分光元件的分析與應用, 2001 台灣光電科技研討會 (2001).
16. M. G. Moharam, et. al., *JOSA*, **12** (5), 1077 (1995).
17. 林暉雄, 林俊廷, 傅同龍, 林宇仁, 周曉宇, 凹面型微光柵波長分波元件之設計與實現, 第六屆奈米工程暨微系統技術研討會, 4B-1 (2002).
18. 林暉雄, 林俊廷, 傅同龍, 林宇仁, 楊宗勳, 周曉宇, 陸懋宏, 側壁凹面型微光柵在光通訊上之應用與研究, 2002 台灣光電科技研討會 (2002).
19. F. L. Armer, A. Schilp, *German Patent DE4241045C1, USA Patents 4855017 and 4784720*.
20. A. M. Hynes, H. Ashraf, J. K. Bhardwaj, J. Hopkins, I. Johnston, J. N. Shepherd, *Sensors and Actuators* (1999).
21. 林郁欣, 殷宏林, 徐永裕, 胡一君, 楊宗勳, 周曉宇, 深矽蝕刻之可動微結構感應耦合電漿離子蝕刻, 第六屆奈米工程暨微系統研討會 (2002).
22. M. Chabloz, Y. Sakai, T. Matsuura, and K. Tsutsumi, *Microsystem Technologies*, **6**, 86 (2000).

---

林暉雄先生為國立交通大學光電工程研究所博士候選人, 現任國科會精密儀器發展中心助理工程師。

林俊廷先生為國立交通大學電子物理研究所碩士, 現就讀於國立交通大學光電工程研究所博士班。

林宇仁先生為國立中央大學光電科學研究所碩士, 現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

傅同龍先生為國立成功大學物理研究所碩士, 現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

林郁欣先生為國立交通大學機械工程研究所碩士, 現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。

陸懋宏先生為國立交通大學光電工程研究所教授。

Hui-Hsiung Lin is a Ph.D. candidate in the institute of electro-optical engineering at National Chiao-Tung University. He is currently an assistant engineer in Precision Instrument Development Center, National Science Council.

Jung Tim Lin received his M.S. in electrophysics from National Chiao-Tung University. He is currently a Ph.D. candidate in the institute of electro-optical engineering at National Chiao-Tung University.

Yu-Jen Lin received his M.S. in optics science from National Central University. He is currently an assistant researcher in Precision Instrument Development Center, National Science Council.

Tong-Long Fu received his M.S. in physics from National Cheng Kung University. He is currently an assistant researcher in Precision Instrument Development Center, National Science Council.

Yu-Hsin Lin received his M.S. in mechanical engineering from National Chiao-Tung University. He is currently an associate researcher in Precision Instrument Development Center, National Science Council.

Mao-Hong Lu is currently a professor in the institute of electro-optical engineering of National Chiao-Tung University.