

稜鏡光柵在分波光學系統中的應用

The Application of Grism on A Multi-Wavelength Optical System

施至柔、陸懋宏

Jyh-Rou Sze, Mao-Hong Lu

本文探討稜鏡光柵在多波長操作系統中的分波效應。稜鏡光柵是一種結合了傳統光學稜鏡與繞射式相位光柵的元件，其不但具有光柵高色散的特性，還利用光學稜鏡偏轉光束的特點使特定波長的光訊號沿著光軸傳播，這一特點將有助於光學系統中各光學元件間的對準與組裝；最後將討論稜鏡光柵各種製程誤差對其光學品質的影響。

The wavelength division effect of grism in a multi-wavelengths optical system is discussed, the grism consist of a traditional optical prism and a diffraction optical phase grating. A beam with designed wavelength passes through the grism will propagate along the optical axis, this property would be helpful for alignment and packaging of each component in an optical system. Finally, the influence of fabrication errors on its optical quality are discussed.

一、前言

光學光柵在分波或是分光的光學系統中扮演著舉足輕重的角色，相對於折射式光學稜鏡，繞射式光學光柵具有較高的色散能力 (dispersion power)，因此常被應用於高精度的波長解析儀器中，例如市面上一般常見的光學光譜儀。繞射光柵又可分為平面型反射式或是穿透式的光學光柵以及在一個光學曲面上刻有光柵條紋的反射式凹面型光柵，以上這幾種光學光柵都是基於繞射現象而具備較高的波長解析能力，在某個特定繞射級數上為了得到較高的繞射效率，一般會將光柵設計成閃耀光柵 (blazed grating) 的形式。在光柵的加工難易度方面，由於

平面型光學光柵比凹面型光柵較易加工，因此市面上大多屬於平面型光柵。在光學系統組裝方面，透射式光學光柵又比反射式光學光柵具有較高的組裝誤差容忍度，然而隨著光學光柵對波長解析度的提高，平面型光柵的繞射光與入射光的夾角也相對變大，這一現象在光學系統的組裝和使用上實為不便。有一種稱為稜鏡光柵 (grism) 的光學元件，其結合了穿透式光柵與光學稜鏡，現已應用在許多領域中⁽¹⁻⁴⁾，例如天文光譜攝像儀、極化光譜儀與分波解多工系統中⁽⁵⁾。

稜鏡光柵利用適當調整光學稜鏡的頂角可使繞射光束與入射光束同軸，這種光學元件具有高繞射效率、容易製作和易大量複製的優點，現今已有許

多方法被提出以製作這種高效率的稜鏡光柵。目前比較常用的方法是以高分子材料複製出閃耀光柵再貼附於高折射率的稜鏡表面。另外的方法是直接在稜鏡斜邊上刻劃出閃耀光柵的表面輪廓⁽⁶⁾，或以離子束傾斜蝕刻法來完成光柵的製作⁽⁷⁾。具有高折射率的稜鏡光柵只需一個較小的稜鏡頂角就可得到高階的繞射光束，使其具有較大的角色散能力，然而大部分高折射率的光學玻璃與晶體材料都太硬或太脆，很難以鑽石刀具刻劃出光柵溝槽。

KRS-5 是一種具有高折射率與高穿透率的紅外材料，且有低軟化點 (414.5 °C) 與低硬度等特性，適合以精密鑽石微加工技術 (plunge-cut diamond turning technology) 製作出所需的光學元件並適合以熱壓印 (thermal embossing) 技術大量複製此元件。本文利用光通訊用之分波解多工器說明稜鏡光柵在這一部分的功用，並以數值方法分析製程誤差對其光學特性的影響，以便有興趣的研究人員參考應用。

二、稜鏡光柵的設計理論

圖 1 為應用於分波解多工系統之稜鏡光柵示意圖，其含有單模輸入光纖、商用光束準直透鏡、稜鏡光柵、聚焦透鏡、光管陣列耦合裝置和商用多模光纖陣列。假設稜鏡光柵四周的介質為空氣，光束的入射角以逆時針方向為正，順時針方向為負，則繞射光束的繞射行為可以以光柵方程式作描述，即

$$n \sin(\theta_m) - n_s(\lambda_f) \sin(\beta - \alpha_2) = m \frac{\lambda_f}{d} \quad (1)$$

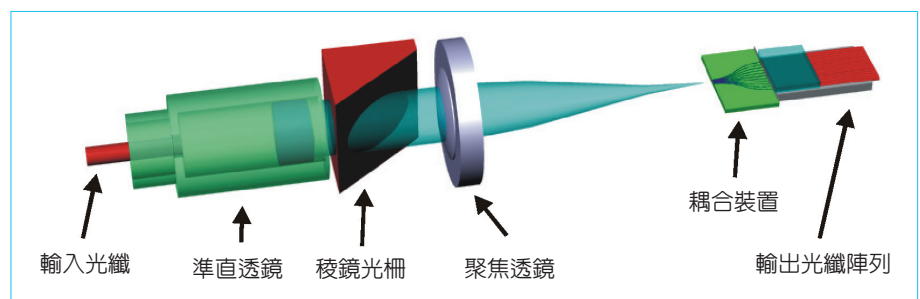
其中 m 為繞射光的繞射級數， d 為光柵週期， θ_m

為第 m 個繞射級數的繞射角，其角度計算是以光柵基準面的法線方向為基準， β 為光柵的閃耀角 (blazed angle)。 n 為稜鏡光柵所在的環境折射率，在本設計中為空氣，其值近似於 1.0， $n_s(\lambda_f)$ 為材料 KRS-5 在波長為 λ_f 時的折射率，當光柵輪廓符合閃耀條件 ($\theta_m = \beta - \alpha_1$) 時，在第 m 繞射級波長為 λ_f 的繞射光束將具有最大的繞射效率，經由 (1) 式可計算出光柵的閃耀角為

$$\sin \beta = \frac{m \lambda_f}{[\cos \alpha_1 - n_s(\lambda_f) \cos \alpha_2] d} \quad (2)$$

其中 α_1 為光束入射稜鏡光柵的入射角，所設計的光柵週期為 $d = 12 \mu\text{m}$ ，此值約比參考波長 ($\lambda_f = 1550.8 \text{ nm}$) 大八倍，因此繞射光的特性與入射光的極化方向無關，而適用純量繞射理論。由於稜鏡光柵的製作限制，故將繞射光束設計在第九繞射級數。當入射光束以垂直方向入射稜鏡光柵，則所對應的閃耀角 β 為 54.75° 。光柵的解析能力 (resolving power) 定義為繞射級數 m 乘上光柵的總條紋數 N ，因此要解析更小波長差的光訊號就必須使用更高的繞射級數與更多的光柵條紋數。由光柵公式可知， $|m\lambda/d|$ 的值域限制在 1.0 以內。當光柵週期選定後，能使用的繞射級數有最大值的限定，且光柵週期的選擇必須符合純量繞射理論的適用條件，光柵週期的值不可選用與操作波長太接近的值。此外，若提高光柵的總條紋數則會導致光柵的總面積過大，稜鏡光柵的體積也跟著增加，此一因素將不利於系統的微小化。綜合以上因素，一顆稜鏡光柵所能得到波長解析度是有限度的，要得到更高的波長解析度，唯有如圖 2 所示，串聯兩個稜鏡光柵才能完成。

圖 1. 應用稜鏡光柵結構實現分波解多工系統的示意圖。



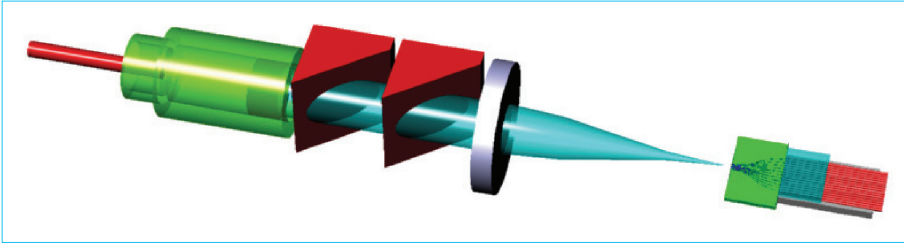


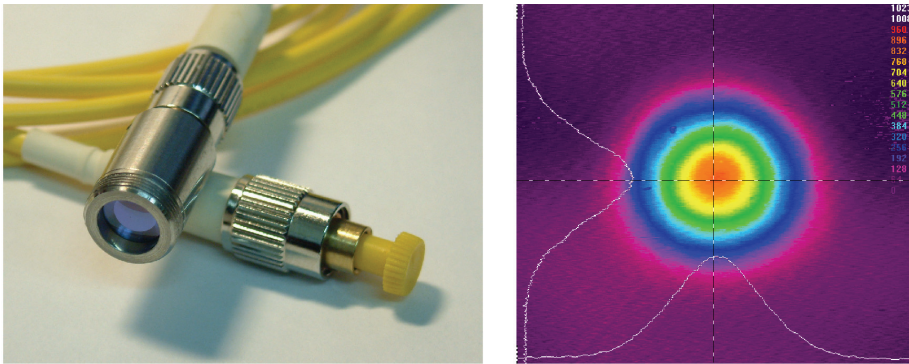
圖 2. 串聯兩塊稜鏡光柵的分波解多工系統示意圖。

三、稜鏡光柵的計算

我們所設計的分波解多工器包含有商用光束準直透鏡、稜鏡光柵和聚焦透鏡，由於每個元件對於整個系統的光學品質均有影響，因此必須小心檢視每個元件的特性。圖 3 為商用的光束準直透鏡，經由實際量測其光場為一個圓形高斯強度分布，高斯參數為 $w = 2.3 \text{ mm}$ ，發散角 (divergence angle) 為

6.13×10^{-3} 弧度。聚焦透鏡為一種高分子塑膠材料加工而成的平凸非球面透鏡，其焦距為 29.47 mm 。

圖 4 為經過稜鏡光柵後的光強度分布曲線圖，經過光柵繞射後的光強度依然是呈現高斯分佈。因為不同波長的輸入訊號在輸出平面產生了些許位移，三個波長非常接近且分辨角很小，彼此間不易分辨。圖 5 為這三個波長在稜鏡光柵輸出平面的相位分布曲線圖，從圖中可看出參考波長 (1550.8 nm)



(a)

(b)

圖 3. 商用光束準直透鏡，(a) 實體照片，(b) 輸出光強度的量測圖。

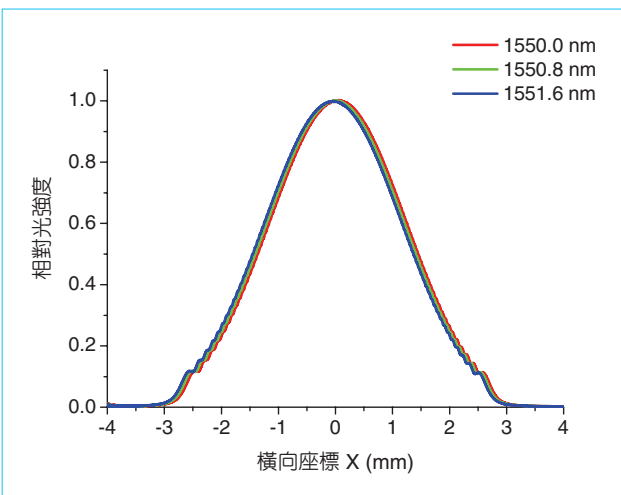


圖 4. 在聚焦透鏡前表面處部分通道中心波長的橫向光強度分布計算曲線圖。

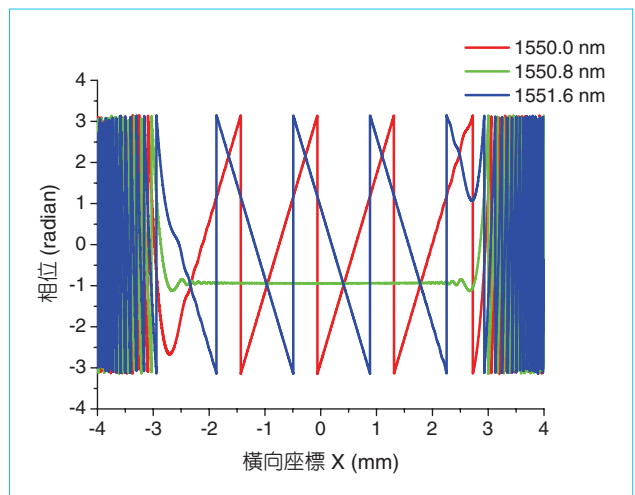


圖 5. 在聚焦透鏡前表面處部分通道中心波長的相位分布計算曲線圖。

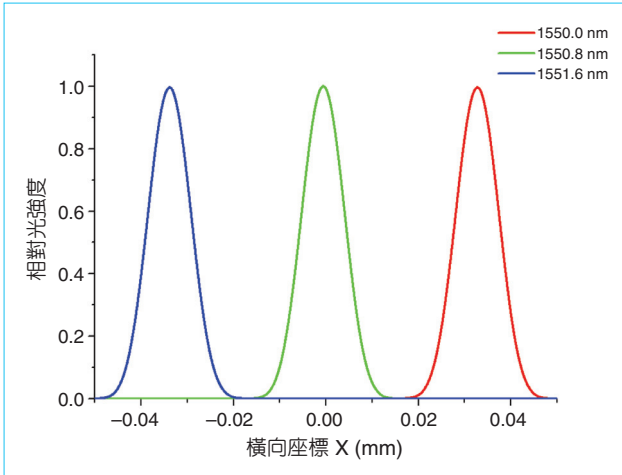


圖 6. 在焦平面處部分通道中心波長的橫向光強度分布計算曲線圖。

通過稜鏡光柵後相位並無變化，仍然維持高斯強度分布的平面波，並沿著光軸前進而無偏轉，波長為 1550.0 nm 的光束通過稜鏡光柵後向右偏折約 1.13×10^{-3} 弧度，波長為 1551.6 nm 的光束通過稜鏡光柵後向左偏折約 1.14×10^{-3} 弧度，在以外區域的 ± 3 mm 相位急速變化，乃是由於稜鏡光柵的孔徑效應所造成，因此在 ± 3 mm 以外的非訊號區產生這種現象。當這三個波長經聚焦透鏡將訊號聚焦在焦平面後，在輸出焦平面上各通道中心訊號波長的強度分布與所在位置的關係曲線如圖 6 所示，圖中各相鄰通道中心訊號波長差為 0.8 nm，由圖中曲線可知相鄰通道中心訊號波長的訊號峰值空間位置差約為 $32.57 \mu\text{m}$ ，參考波長在焦平面處束腰光點大小約為 $20.9 \mu\text{m}$ ，其強度分布依然是高斯分布。

四、稜鏡光柵光學特性檢測結果

利用精密鑽石微加工車床 (Machi NCAU-300E)

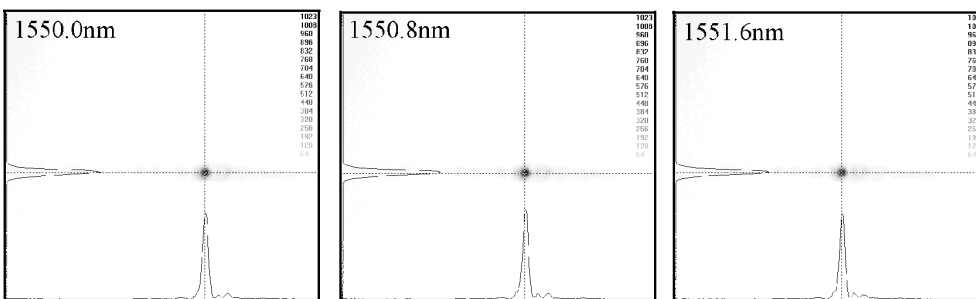


圖 8. 各通道中心波長在焦平面處的光場強度分布量測圖。

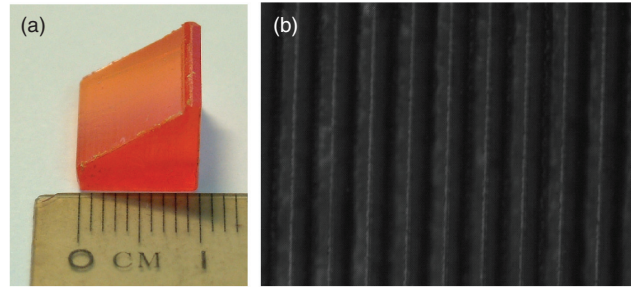


圖 7. 製作完成的稜鏡光柵，(a) 實體照片，(b) 部分光柵放大照片。

在紅外材料為 KRS-5 的稜鏡斜邊上直接刻劃出閃耀光柵。製作完成的稜鏡光柵照片如圖 7(a) 所示，利用光學顯微鏡觀測稜鏡光柵上的閃耀光柵結構並記錄下其部分影像如圖 7(b) 所示。利用可調波長雷射 (Anritsu MG9541A) 調制出每個通道中心波長的訊號光，所產生的訊號頻寬約為 0.2 nm，此訊號光經由單模光纖傳輸至商用光束準直透鏡，擴束準直後的光束經由稜鏡光柵傳播至聚焦透鏡而在焦平面處聚焦。將配有 20 倍顯微物鏡的紅外 CCD 偵測器 (ELECTROPHYSIC 7290A) 置於光學系統中固定不動，分別輸入各通道訊號波長，並記錄下每個通道中心訊號波長在焦平面處的影像，所擷取的三個通道中心訊號波長的影像如圖 8 所示。

在本設計中參考波長的光束為沿著光軸傳播，不會因稜鏡光柵而產生偏折，這一特點在光學對準上具有很大的便利性。由圖 8 的照片中可知各訊號光在焦平面處所產生的光點為近似圓對稱的高斯分布。為了能清楚看出其他通道中心波長的訊號光在焦平面處的強度分布，圖 9 中顯示出三個通道中心波長在焦平面處的橫向強度分布的量測結果。由圖中可知光點大小與相鄰訊號波長的分隔距離分別約為 $21.3 \mu\text{m}$ 與 $36.27 \mu\text{m}$ ，其中光點大小和相鄰訊號的分隔距離與所使用的聚焦透鏡的有效焦距有關。

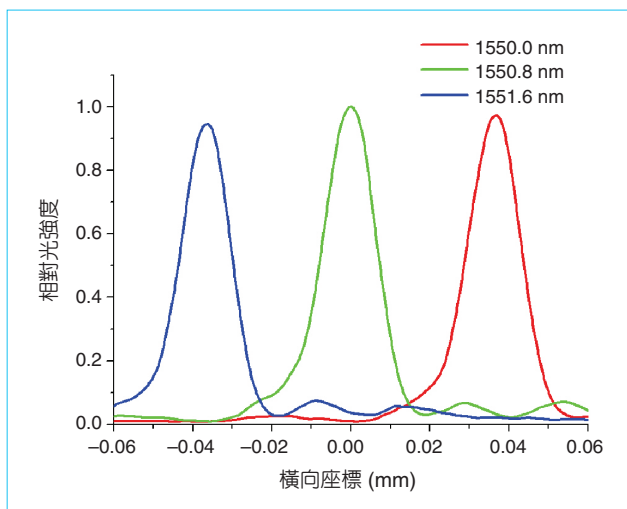


圖 9. 在焦平面處部分通道中心波長的橫向光強度分布量測曲線圖。

當使用較短有效焦距的透鏡時，雖可使整個系統的長度縮短，但使用較短焦距的單透鏡時為了能有效降低透鏡的像差，則需採用較高光學品質的透鏡，這會使整個系統的成本提高許多，權衡此因素我們採用適當焦距的平凸透鏡用於訊號光的會聚。為了估計所製作的稜鏡光柵系統的光學效率，我們定義出一個狹縫寬為 $24 \mu\text{m}$ 的範圍內作為量測依據，每個訊號波長在焦平面處所對應狹縫寬為 $24 \mu\text{m}$ 範圍內的光學效率的量測結果如圖 10 所示，在圖中我們也說明了帶有製程誤差的稜鏡光柵的計算結果。

五、製程誤差分析

由圖 8 的量測結果可知，在橫向發現有些雜點，這些雜點產生的原因可能是稜鏡光柵製程上深度與寬度的誤差與元件上殘留的雜屑所造成，為了確定這一觀點我們對稜鏡光柵作了製程深度與寬度的誤差分析。稜鏡光柵在製作的過程中難免存在一些製程誤差，使稜鏡光柵產生一些缺陷而影響稜鏡光柵的光學特性，如光柵週期誤差、閃耀角誤差與光柵表面的不平整等的現象產生。

在此引入誤差機率函數來描述製程誤差對稜鏡光柵在結構尺寸上的影響，根據這些誤差值計算出所對應的光學特性。所使用的稜鏡光柵係使用鑽石微加工技術作為製作方式，由於加工機台對稜鏡光

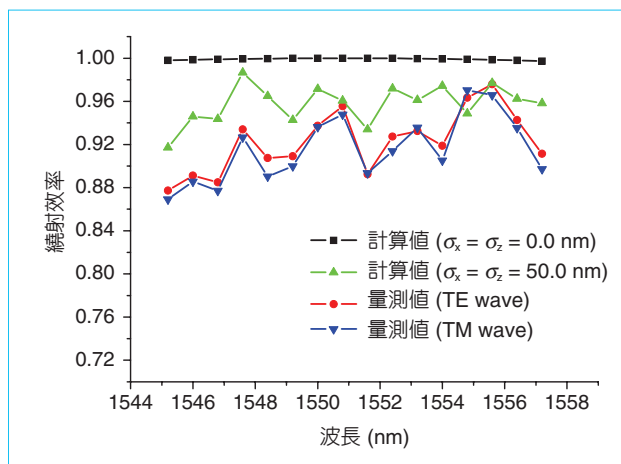


圖 10. 各通道中心波長繞射效率理論計算與實驗量測結果的比較。

柵的每一個光柵溝槽所產生的誤差量均為獨立不相關，因此可假設每個光柵溝槽的寬度 Δx 與深度 Δz 所對應的製程誤差值是獨立的，這些誤差量在統計上可以高斯機率密度函數⁽⁵⁾ 來描述，對於具有較大製程誤差的光柵溝槽的發生機率將隨高斯函數而遞減，可表示為：

$$f_G(\delta_{x,j}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(\delta_{x,j} - a_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (3)$$

$$f_G(\delta_{z,j}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}} \exp\left[-\frac{(\delta_{z,j} - a_z)^2}{2\sigma_z^2}\right], j = 1, 2, \dots, N_2 \quad (4)$$

其中 $\delta_{x,j}$ ($\delta_{z,j}$)、 a_x (a_z) 和 σ_x (σ_z) 分別代表光柵溝槽寬度 (深度) 的製程誤差值、誤差平均值和誤差變異值 (variance value)，下標 j 代表第 j 個光柵溝槽，對於包含有誤差值的每個光柵溝槽的新寬度 $\Delta x + \delta_{x,j}$ 和新高度 $\Delta z + \delta_{z,j}$ 可由 (3) 式與 (4) 式分別算出，再利用 Huygens-Fresnel 理論⁽⁸⁾ 計算出帶有製程誤差的光場分布。其中誤差平均值將決定光柵週期的平均偏移量，此參數將影響光柵的解析度與通道波長的飄移。在計算中假設製程誤差的平均值 a_x 與 a_z 均為 0，並分別計算出在不同的誤差變異量下對稜鏡光柵光學品質的影響。這些製程誤差變異量分別為 0 nm、25 nm、50 nm 與 100 nm。以參考波長為例，比較在各種製程誤差變異量下，在焦平面處的光強度分布如圖 11 所示。由此圖可看出當製程誤差

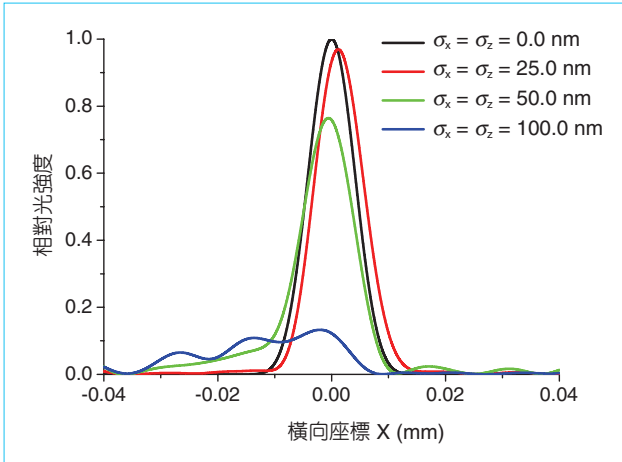


圖 11. 帶有不同製程誤差變異量的稜鏡光柵，在焦平面處參考波長的橫向光強度分布計算曲線圖。

變異量增加時，其主峰強度的能量會漸漸下降而次峰的數量與能量會漸增大，次峰的分布情況也並非左右對稱。圖 12 比較了訊號波長為 1550.8 nm 的量測結果與帶有變異量 $\delta_x = \delta_y = 0.05 \mu\text{m}$ 製程誤差的計算結果，根據曲線圖的比較發現計算與量測結果大致符合，這結果也驗證了稜鏡光柵的製程誤差對於其光學特性的影響。

六、結論

我們利用 KRS-5 的紅外材料研製了一個結合光學稜鏡與穿透式光柵的光學稜鏡，這種三維自由空間型的穿透式稜鏡光柵的優點如下：

- (1) 在於光學對準方面具有較大的誤差容忍度：當所設計的分波解多工系統為直視光學系統 (direct transmitting optics) 時，可利用調整稜鏡光柵的頂角使某一特定繞射光沿著光軸傳播。如果入射於稜鏡光柵的光束具有入射誤差角度為 $\delta\alpha_1$ 時，則入射於穿透式稜鏡光柵中的光柵入射角度將偏移 $\delta\alpha_2 = \delta\alpha_1 \cos(\alpha_1) / n_s \cos(\alpha_2)$ ，其中 n_s 為稜鏡光柵材料的折射率，對於穿透式稜鏡光柵而言， $\delta\alpha_2$ 小於 $\delta\alpha_1$ 。在相同的條件下，對於反射式光柵其偏差角 $\delta\alpha_2$ 等於 $\delta\alpha_1$ ，因此穿透式稜鏡光柵的傾斜誤差容忍度大於反射式光柵系統。
- (2) 無需更改原設計即可提升系統的波長解析度與產生更多通道數：由於所設計的結構為直視光學結構，因此可串聯兩個相同的稜鏡光柵以提

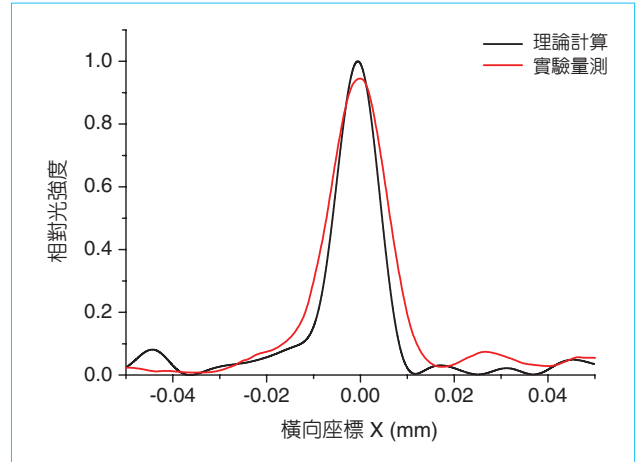


圖 12. 在焦平面處參考波長 $\lambda_r = 1550.8 \text{ nm}$ 的光場強度分布量測與計算結果的比較。

升波長的解析度，而無需重新製作元件，這一特點將有助於提升稜鏡光柵的應用範圍。

參考文獻

1. N. Ebizuka, M. Lye, and T. Sasaki, *Appl. Opt.*, **37** (7), 1236 (1998).
2. S. Kane and J. Squier, *J. Opt. Soc. Am. B*, **14** (3), 1661 (1997).
3. B. A. Richman, S. E. Bisson, R. Trebino, M. G. Mitchell, E. Sidick, and A. Jacobson, *Opt. Lett.*, **22** (16), 1223 (1997).
4. C. Pitris, B. E. Bouma, M. Shiskov, and G. J. Tearney, *Opt. Exp.*, **11** (2), 120 (2003).
5. Jyh-Rou Sze and Mao-Hong Lu, *Opt. Eng.*, **44** (2), 025006 (2005).
6. L. Weitzel, A. Krabbe, H. Kroker, N. Thatte, L. E. Tacconi-Garman, M. Cameron, and R. Genzel, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **119**, 531 (1996).
7. Y. Aoyagi and S. Namba, *Opt. Acta.*, **23**, 701 (1976).
8. S. Nonogaki, *J. J. Appl. Phys.*, **28** (5), 786 (1989).

- 施至柔先生為國立交通大學光電工程研究所博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
- 陸懋宏先生為國立交通大學光電工程研究所榮譽退休教授。
- Jyh-Rou Sze received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
- Mao-Hong Lu is an emeritus professor in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Chiao Tung University.