

超結構型光纖光柵之研製

劉文豐* 柏小松* 呂理維* 齊立平* 杜博仁** 傅明宇**

*逢甲大學電機工程學系

**國防大學中正理工學院電機工程學系

摘 要

本論文主要的內容是在說明超結構型光纖光柵的理論計算與實際製作之研究，探討分析超結構型光纖光柵在不同參數下的頻譜特性影響，比較理論計算與實際製作的差別，提供光纖光學領域上應用設計之參考。

關鍵詞：光纖光柵，超結構型光纖光柵，多通道

The Implementation of a Superstructure Fiber Grating

Wen-Fung Liu*, Sheau-Shong Bor*, Li-Wei Lu*, Li-Pin Chi*
Po-Jen Tu** and Ming-Yue Fu**

*Department of Electrical Engineering, Feng Chia University

**Department of Electrical Engineering, Chung Cheng Institute of Technology,
National Defense University

ABSTRACT

The content of this paper is to describe the theoretical calculation and practical fabrication of a superstructure fiber bragg grating as well as to analyze its spectrum characteristics in different design parameters. With the utilization of the comparison between theoretical calculation and the practical writing, it will provide a design reference in the applications of fiber optics.

Keywords: fiber gratings, superstructure fiber grating, multichannel

一、前言

在現今的二十一世紀，為了因應網際網路、多媒體的實際需要，寬頻與大容量、高速的網路系統已成為必然趨勢，而光纖將在其中扮演極重要的角色，因其具有質量輕、低傳輸損耗、不受電磁干擾以及寬廣的頻寬等特性，其將成為全光寬頻高速網路中最適當的傳輸媒介，而光纖光柵又為全光網路中非常重要的光纖被動元件之一。光纖光柵的功能就好比是光纖裡面的反射鏡，能將特定波長的信號反射回入射方向，其主要寫製技術是利用一束紫外雷射光透過分光鏡或相位光罩產生兩光束，此兩束紫外光產生干涉條紋，使光纖核心成週期性的折射率變化[1]。一般而言，光纖光柵可區分為均勻型和非均勻型兩種基本型態[2]，

結構型光纖光柵為本文探討的主體，其應用範圍甚廣可包含光纖雷射（DBR）的反射元件[4][5]、WDM 系統的多波道分波存取[6-8]以及光纖感測[9]等。本文將探討超結構型光纖光柵之理論計算與實際製作。

二、理論分析

所謂的超結構型光纖光柵（SFBG）[10]，如圖 1 所示，就是利用 UV 雷射光在光纖上寫製一段有布拉格光柵、一段沒有布拉格光柵相互間隔而成的結構，而這一段有、無的週期大約介於幾十到幾百微米的範圍，SFBG 可視為結合了布拉格光纖光柵（FBG）和長週期光纖光柵（LPG）的合型體，其反射率的強或弱是由布拉格光柵的耦合係數決定（正比於折射率

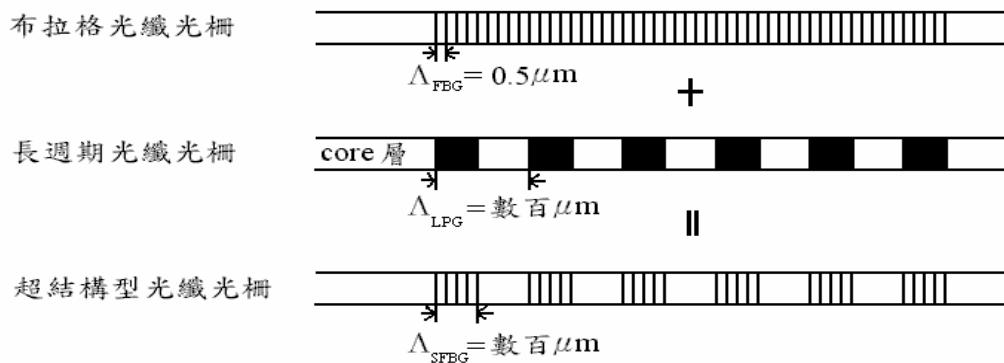


圖 1. 超結構型光纖光柵架構圖。

由於均勻型的光纖光柵發展已相當成熟，而非均勻型的光纖光柵也被廣泛的探討，如週期漸變型（chirped）、高斯無足型（Gaussian apodized）、移相位型（phase shift）、超結構型（superstructure）[3]等，其應用方面也有所不同，像是週期漸變型的光纖光柵可用來做為光脈波的色散補償、高斯無足型的光纖光柵則可用來作為高密度分波多工器（DWDM）。而超

調變量）。至於 SFBG 的週期與強度可應需要而設計，因 SFBG 反射波道間的距離可由 LPG 週期決定，其將影響 C-band（1530-1565nm）範圍的總波道數。

耦合模態理論一般較常被用來作為光纖光柵的理論分析，但對於非均勻型光纖光柵，可由轉換矩陣法[11]來解決，所謂轉換矩陣法就是將整段非均勻光柵分割成多段均勻光

柵，再將其每段分隔的均勻光柵之轉換矩陣相乘，就會形成整體光柵的架構，均勻型的光纖光柵其傳導波方程式可以用矩陣的方式來表示：

$$\begin{bmatrix} R_L \\ T_L \end{bmatrix} = F_k \begin{bmatrix} R_0 \\ T_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中假設光纖軸向為 z 軸與光柵長度為 L，再利用邊界條件求出為 z = 0 之反射與穿透能量 (R₀ T₀)，及 z = L 時的反射與穿透能量 (R_k T_L)，

$$F_k = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) - i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sinh(\gamma L) & -i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma L) \\ i \frac{\kappa}{\gamma} \sinh(\gamma L) & \cosh(\gamma L) + i \frac{\hat{\sigma}}{\gamma} \sinh(\gamma L) \end{bmatrix} \quad (2)$$

而 κ ($\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda}$) 為光柵的耦合係數，其他參數

$$\hat{\sigma} = \beta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad \sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{eff}$$

$\beta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$ ， $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}$ ，然而超結構型光纖光柵是由一小段均勻光柵 (d₁) 與一小段無光柵 (d₂) 相間組合而成，有光柵區可用 (2) 式表示，無光柵區則可用移相位型矩陣 (phase-shift matrix) G_k 來表示：

$$G_k = \begin{bmatrix} \exp\left(\frac{-i\phi_k}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(\frac{i\phi_k}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $\frac{\phi_k}{2} = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} d_2$ ， ϕ_k 是無光柵區之相位變化。結合 (2) 與 (3) 兩式，超結構型光纖光柵可化簡為

$$\begin{bmatrix} R_L \\ T_L \end{bmatrix} = F_n \cdot \prod_{i=1}^{n-1} F_i \cdot G_i \begin{bmatrix} R_0 \\ T_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

又因每段光柵區長度均相等，且無光柵區長度也相等，所以

$$F_1 = F_2 = \dots = F_k = \dots = F_{n-1} = F_n \\ G_1 = G_2 = \dots = G_k = \dots = G_{n-1} \quad (5)$$

最後就形成：

$$\begin{bmatrix} R_L \\ T_L \end{bmatrix} = F_n \cdot (G_k \cdot F_k)^{n-1} \begin{bmatrix} R_0 \\ T_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

至於波道與波道間的距離 ($\Delta \lambda$) 相依於每一小段光柵的長度，其理論值的推導可依 Fabry-Perot 原理而得，由於光在兩小段光柵間來回進行共振 (好比是個共振腔)，因此就會產生建設性干涉以及破壞性干涉，而形成建設性干涉的條件是： $2 n d \cos \theta = m \lambda$ ，其中 n 為共振區域之折射率，d 為每一小段共振腔之長度，又因為入射光是垂直進入光柵，所以 θ 為 0 度，而如果層數變多的話並且成週期性的變化，產生光的多重干涉而形成干涉效果就會非常明顯，因此對於波長的選擇性便非常敏銳，而建設性干涉的條件便可改寫為： $2 (n_1 d_1 + n_2 d_2) = m \lambda$ ，最後波道間的距離可推導為

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_c^2}{2(n_1 d_1 + n_2 d_2)}$$

如果平均有效折射率 $n_{eff} = \frac{n_1 d_1 + n_2 d_2}{\Lambda}$ ，就形成另一種公式

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_c^2}{2n_{eff} \Lambda} \quad (7)$$

三、模擬分析

我們是利用 OPTIWAVE 公司所製作的光學波導軟體 IFO_Gratings 對 SFBG 進行光譜理論計算與分析，決定 SFBG 的型態依理論可

由下列幾項參數來訂定：(一)有、無小段光柵的長度比例(二)串接有、無小段光柵的數目(三)無足化參數。

(一)有、無小段光柵的長度比例

在圖 2 與圖 3 中，我們先假設總長度為兩公分的光柵進行模擬，折射率調變量設為 5×10^{-4} ， d_1 為一小段均勻光柵的長度， d_2 為一小段無光柵的長度，而在圖 2 中 d_1 與 d_2 分別為 $200 \mu\text{m}$ 與 $280 \mu\text{m}$ ，週期 $\Lambda = d_1 + d_2 = 480 \mu\text{m}$ ；在圖 3 中 d_1 與 d_2 分別為 $200 \mu\text{m}$ 與 $400 \mu\text{m}$ ，週期 $\Lambda = d_1 + d_2 = 600 \mu\text{m}$ 。由此可知，固定 d_1 而增加 d_2 ，將造成光在兩小段光柵間的來回共振頻率增高，造成波長在 $1544\text{nm} \sim 1556\text{nm}$

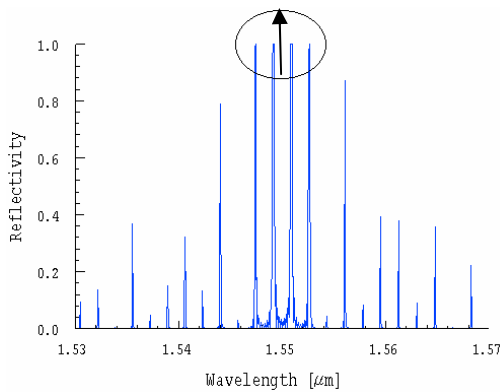


圖 2. d_1 與 d_2 分別為 $200 \mu\text{m}$ 與 $280 \mu\text{m}$ 的超結構型光纖光柵之反射頻譜。

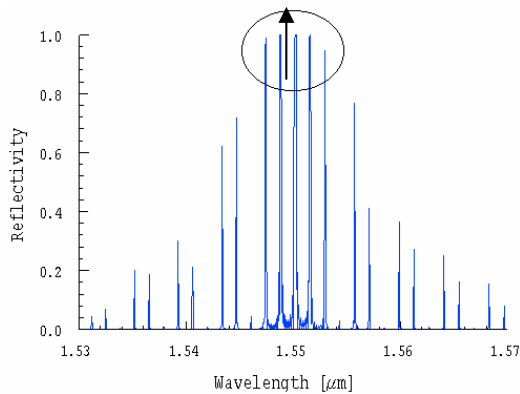


圖 3 d_1 與 d_2 分別為 $200 \mu\text{m}$ 與 $400 \mu\text{m}$ 的超結構型光纖光柵之反射頻譜。

範圍內的高反射率之波道數為之增加。

(二)串接有、無小段光柵的數目

串接數目的多寡影響到單一波道的反射率大小以及波道數，從圖 4 與圖 6 中可知，隨著串接數目的增加反射率逐漸增加、波道數量也顯著增加。圖 4 至圖 6 分別說明 5 段 $480 \mu\text{m}$ 、10 段 $480 \mu\text{m}$ 、15 段 $480 \mu\text{m}$ 的 SFBG 之反射頻譜圖形。其中我們設定 d_1 與 d_2 分別為 $200 \mu\text{m}$ 與 $280 \mu\text{m}$ ，折射率調變量為 5×10^{-4} 。

(三)無足化參數

無足化的 SFBG 其折射率的調變量大小

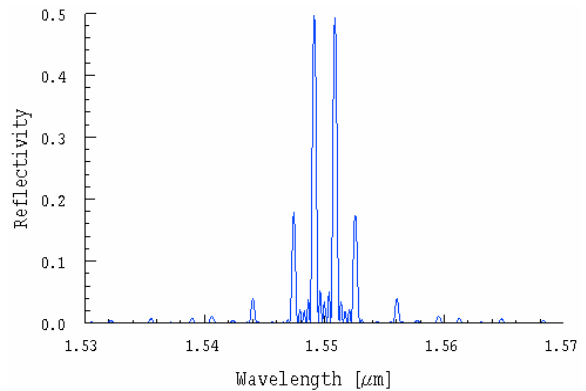


圖 4. d_1 與 d_2 為 $200 \mu\text{m}$ 與 $280 \mu\text{m}$ 五段長週期的超結構型光纖光柵之反射頻譜。

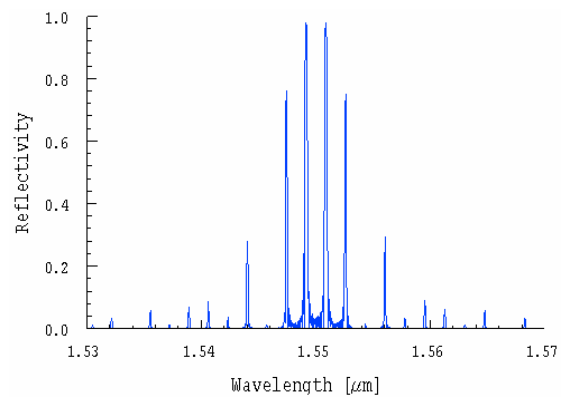


圖 5. d_1 與 d_2 為 $200 \mu\text{m}$ 與 $280 \mu\text{m}$ 十段長週期的超結構型光纖光柵之反射頻譜。

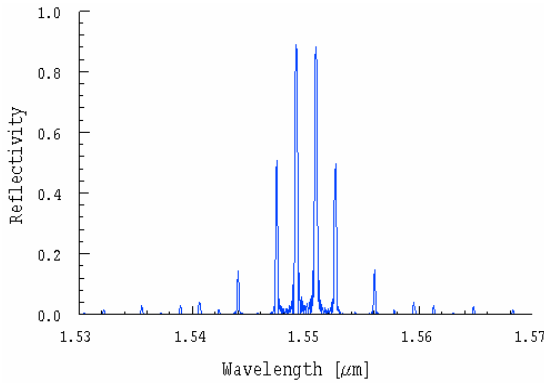


圖 6. d_1 與 d_2 為 $200 \mu\text{m}$ 與 $280 \mu\text{m}$ 十五段長週期的超結構型光纖光柵之反射頻譜。

為非均勻型態，如圖 7 所示，與其均勻型 SFBG，如圖 8 所示，最大不同處，就在於本身的反射頻譜可以抑制旁波的產生。而我們的無足化是採高斯分佈函數。

$$A(z) = \exp\left\{-\ln 2 \cdot \left[\frac{2 \cdot (z - L/2)}{s \cdot L}\right]^2\right\} \quad (8)$$

其中 s ($s = \frac{FWHM}{L}$) 就是所謂的無足化參數， L 為光柵的總長度，FWHM 為光柵折射率調變量圖形的半高寬，當 $s \rightarrow \infty$ 時，其折射率調變量的圖形為均勻型態；當 $s < 1$ 且逐漸變小時，其折射率調變量的圖形就會形成高斯分佈，而且高斯分佈圖形的 FWHM 也會逐漸變窄。而參數 s 設定的主要目的，是為了維持主波道的高反射率與抑制旁波道的反射率至 5% 以下，但參數 s 的值可以從 0.1~1 這段範圍來決定，如圖 9、10 所示，而在圖 9 中，我們採用 100 個 LPG，以 $d_1 = 200 \mu\text{m}$ ， $d_2 = 80 \mu\text{m}$ 的比例，配合折射率調變量 (Δn) 為 5×10^{-4} 而形成 2.8cm 的超結構型光纖光柵；在圖 10 中，我們採用 80 個 LPG，以 $d_1 = 200 \mu\text{m}$ ， $d_2 = 480 \mu\text{m}$ 的比例，配合折射率調變量為 5×10^{-4} 而形成總長度為 5.44cm 的超結構型

光纖光柵。依理論計算結果，我們獲得 s 的最佳值為 0.7，因 $s > 0.7$ 旁波道又會逐漸升起，而 $s < 0.7$ 的話，又產生太多波道，以致於每個波道的反射率太小。在 $s = 0.7$ 的條件下，我們利用改變超結構型光纖光柵的週期 (Λ) 與總長度 (L) 來獲得四個波道與八個波道的超結構型光纖光柵之反射頻譜，其分別如圖 9(b) 與圖 10(b) 所示。

綜合上述，所謂最佳化的 SFBG 就是讓主波道能明顯的獨立出來，並且能使每一個波道的獨立能量都能達到 90% 以上，達到波道間

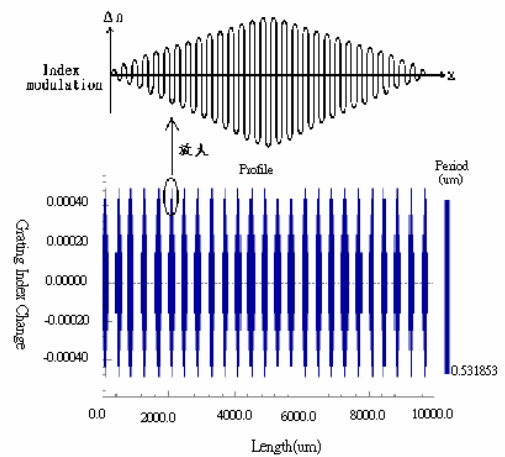


圖 7. 無足化超結構型光纖光柵之折射率調變量。

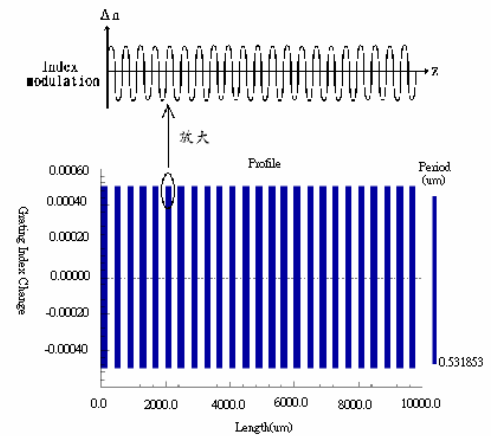
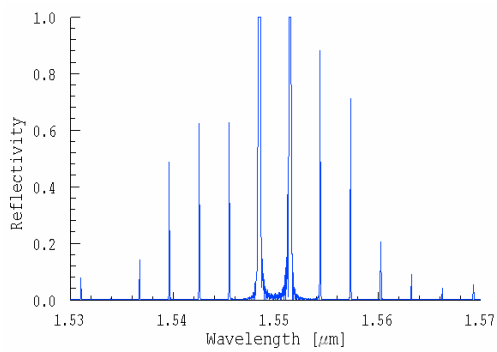
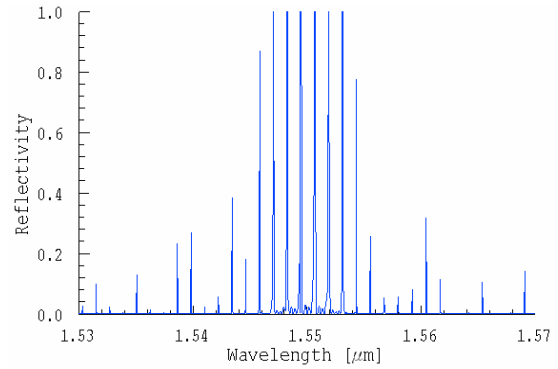


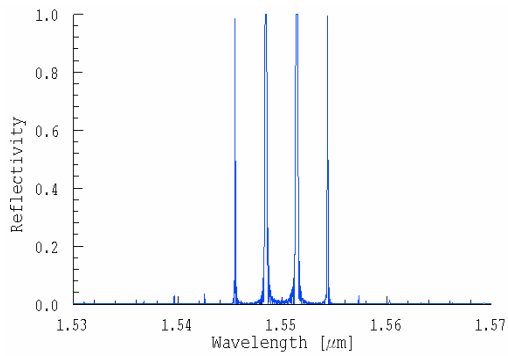
圖 8. 均勻型超結構型光纖光柵之折射率調變量。



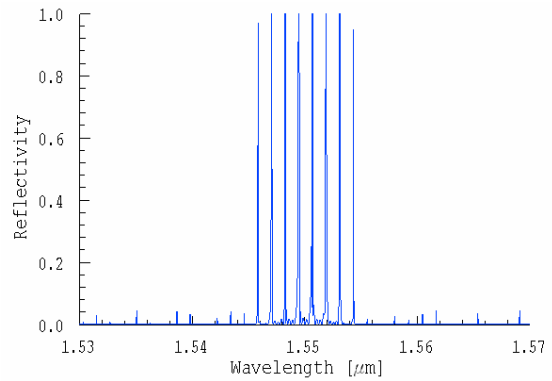
(a)



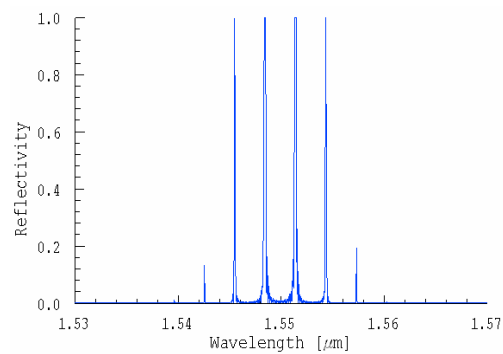
(a)



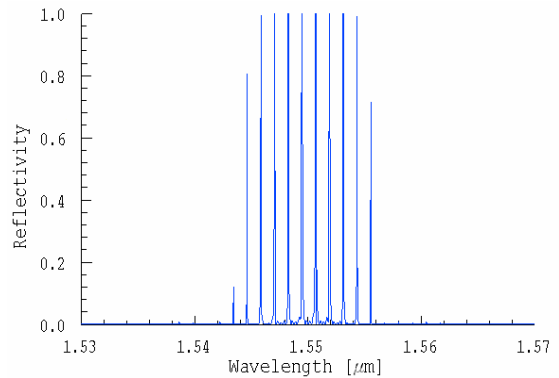
(b)



(b)



(c)



(c)

圖 9. (a) ($s=0.9$) 無足化超結構型光纖光柵之反射頻譜。

(b) ($s=0.7$) 四個波道的最佳無足超結構型光纖光柵之反射頻譜。

(c) ($s=0.5$) 無足化超結構型光纖光柵之反射頻譜。

圖 10. (a) ($s=0.9$) 無足化超結構型光纖光柵之反射頻譜。

(b) ($s=0.7$) 八個波道的最佳無足超結構型光纖光柵之反射頻譜。

(c) ($s=0.5$) 無足化超結構型光纖光柵之反射頻譜。

訊號功率的相等，而旁波道都能被抑制至 5% 以下，好讓兩者能完全區隔。因此，先求出系統所需波道數的多寡，配合有、無光柵區域的比例、光柵的長度以及折射率調變量，最後再加上無足化的參數 $s = 0.7$ ，使主波道的能量達到 90% 以上，旁波道降至 5% 以下，這樣就能實現最佳化的 SFBG。

四、實際製作

我們是利用波長 193nm ArF 的準分子雷射來寫製光柵，準分子雷射的能量調整約在 100mJ，由於它是以激發脈波方式輸出，頻率設為 10Hz。超結構型光纖光柵的寫製裝置，主要是利用相位光罩以及振幅光罩的結合，將

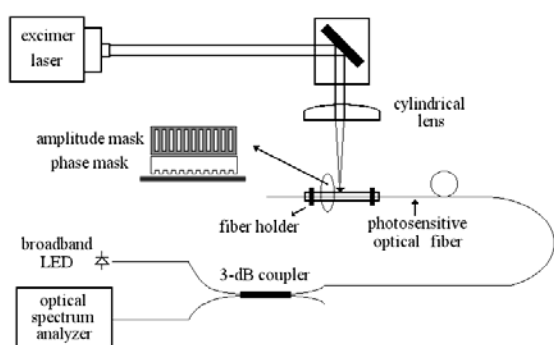


圖 11. 寫製超結構型光纖光柵之實驗裝置圖。

光感性的光纖緊貼於後相位光罩後，經準分子雷射的曝照而完成超結構型光纖光柵的寫製工作，在寫製過程中我們還使用寬頻 LED、3dB 的耦合器與光譜分析儀同時量測 SFBG 的反射或穿透頻譜，以監控光柵成長過程以及當光柵成長之所需規格時關掉雷射，取出光柵。實驗之架構如圖 11 所示，在圖 12、圖 13 分別為兩個波道及三個波道 SFBG 的實際製作與理論計算反射頻譜之比較圖。

圖 12 為長 12mm 兩個波道 SFBG 的反射

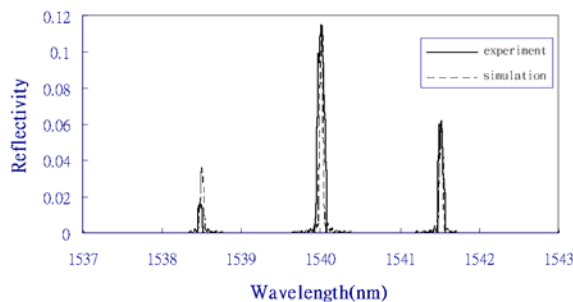


圖 13. 長 15mm 和耦合係數 $\kappa = 0.05/\text{mm}$ ($\Delta n = 2.5 \times 10^{-5}$) 的超結構型光纖光柵。

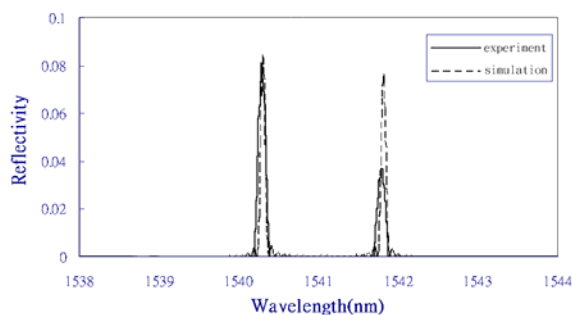


圖 12. 長 12mm 和耦合係數 $\kappa = 0.052/\text{mm}$ ($\Delta n = 2.6 \times 10^{-5}$) 的超結構型光纖光柵。

頻譜圖。經由實際量測所得與理論計算光譜圖相比較，發現實驗與理論值近乎吻合，估計耦合係數為 $0.052/\text{mm}$ ($\Delta n = 2.6 \times 10^{-5}$)，單一通道的頻寬為 0.12nm，反射率大小為 0.085，經由模擬軟體 IFO_Gratings 的協助更可以得知有、無光柵區之比為 $360 \mu\text{m} : 180 \mu\text{m}$ ，以及波道與波道間的距離 ($\Delta \lambda$) 為 1.52nm，其與由 (7) 式的理論計算值非常一致。圖 13 為長 15mm 三個波道的 SFBG，經由實際量測所得與理論計算光頻譜圖相比較，發現實驗與理論值也近乎吻合，估計耦合係數為 $0.05/\text{mm}$ ($\Delta n = 2.5 \times 10^{-5}$)，每一通道的頻寬為 0.1nm，反射率大小為 0.115，也經由模擬軟體 IFO_Gratings 的協助可以得知有、無小段光柵之比為 $270 \mu\text{m} : 270 \mu\text{m}$ ，以及波道與波道間的距離 ($\Delta \lambda$) 為 1.52nm。寫製圖 12 及圖 13 之 SFBG 所使

用之光感光纖為英國 fiber-core 公司生產製造，由於光纖未經載氫，因此反射率較小，若欲增加光纖的光感度、縮短光柵寫製時間，則需在室溫下載氫 5-7 天。

五、結論

經由超結構型光纖光柵的理論分析、模擬與實際的製作量測之分析比較，可以讓我們更清楚的瞭解到超結構型光纖光柵的特性，而在其特性中，超結構型光纖光柵的多波道特性不但可完成需串接多個各別寫製的光柵才能形成的多波道，同時也簡化了寫製時的複雜度，也能根據系統的需要而設計出符合系統規格的超結構型光纖光柵，如反射能量的多少、波道的數目、波道間距離為何等。換言之，依實際需求而設計出最佳化的超結構型光纖光柵，而在實際用途上也相當廣泛，像是我們可利用超結構型光纖光柵光頻譜圖形的波長與反射率之偏移量，來完成可同時量測溫度與應變的感測器元件；或是可利用超結構型光纖光柵的多波道時間延遲的特性應用在相位陣列天線，以簡化相位陣列天線時間延遲設計的複雜度及改善相位陣列天線系統的性能。因此，利用超結構型光纖光柵的特有特性與優點，可在實際應用上發揮其性能或簡化系統的複雜度。

六、參考文獻

- [1] Hill, K. O. and Meltz, G., "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1263-1276, August 1997.
- [2] Redogan, T., "Fiber Grating Spectra," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1277-1294, August 1997.
- [3] Sterke, C. M. De, Eggleton, B. J., and Krug P. A., "High-Intensity Pulse Propagation in uniform Gratings and Grating Superstructures", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 1494-1502, August 1997.
- [4] Jayaraman, V., Cohen, D., and Coldren, L., "Demonstration of broadband tunability in a semiconductor laser using sampled gratings," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60, No. 19, pp. 2321, 1992.
- [5] Ishii, H., Tohmori, Y., Yamamoto, M., Tamamura, T. and Yoshikuni, Y., "Modified multiple-phase-shift superstructure-grating DBR lasers for broad wavelength tuning," *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 14, pp. 1141-1142, 1994.
- [6] Eggleton, B. J., Krug, P. A., Poladian, L. and Ouellette, F., "Long Periodic Superstructure Bragg Gratings in Optical Fibers," *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 9, pp. 1620-1622, 1994.
- [7] Ortega, B., Capmany, J., Pastor, D., Ibsen, M., "Full low-cost Characterization of Long Periodic Superstructure Fibre Bragg Gratings," *Micro. Optical Technology Letter*, Vol. 23, No. 4, November 20, 1999.
- [8] Ortega, B., Capmany, J., Pastor, D., Ibsen, M., "Full Characterization of Long Periodic Superstructure Fibre Bragg Gratings in Multichannel Devices," *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, LEOS '98, IEEE*, Vol. 2, pp. 354-355, 1998.
- [9] Ahuja, A. K., Steinvurzel, P. E., Eggleton, B.

- J. , Rogers, J. A., "Tunable single phase-shifted and superstructure gratings using microfabricated on-fiber thin film heaters," *Optical Communications*, Vol. 184, pp. 119-125, October 2000.
- [10] Broderick, N. G. R. and Sterke, C. M. De, "Theory of grating superstructures," *Phys. Rev. E*, Vol. 55, pp. 3634-3646, 1997.
- [11] Yamada, M., and Sakuda, K., "Analysis of almost periodic distributed feedback slab waveguide via a fundamental matrix approach," *Appl. Opt.*, Vol. 26, No. 16, pp. 3474-3478, 1987.