

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫七-新型 DWDM 光纖式元件之研究(3/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2215-E-009-007-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學光電工程學系(所)

計畫主持人：賴暎杰

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

中 華 民 國 93 年 12 月 24 日

【中文摘要】

光纖式 DWDM 光通訊元件具有元件成本低及可達到很窄頻道間距的優點，但是在設計及製作上需滿足嚴格的要求，技術門檻較高，所以是很好的研究題目，一旦有成也將可產生很大的經濟效益。本計畫的目標即是要來發展新型的 DWDM 光纖式元件，希望結合光纖光柵 (FIBER GRATING) 技術、精密光纖熔接耦合技術、及特殊光纖的設計及製作技術等來發展出一系列的新型 DWDM 光纖式元件。在這三年的研究中，我們的研究成果主要如下：

- (1) 發展出光纖光柵元件的最佳化設計方法，並設計出新型之 LPG EDFA Gain flattening filter 以及新型之無色散 FBG 元件。
- (2) 發展出光纖光柵元件的新型製作方法並實際製作出無色散 FBG 元件。
- (3) 建立新型光纖光柵色散特性量測技術。
- (4) 發展出新型飛秒級高重複率鎖模光纖雷射。
- (5) 發展出光纖光柵光固子的量子理論。
- (6) 發展出 tapered fiber device 及晶體光纖的有限元素法模擬分析程式。

這些結果有些已經發表在國際期刊或國外會議之上，顯示我們的成果已受到國際上的肯定。

關鍵詞：全光纖式元件、高密度波長多工、光纖光柵

[Abstract]

All-fiber DWDM devices have the advantages of being low cost and being able to achieve very narrow channel spacing. However, it also needs very careful design and very accurate fabrication. Because of these, this type of devices is very suitable for research studies and it should be able to produce substantial impacts if the research is successful. The aim of this project is thus to develop novel types of DWDM fiber devices by combining the fiber grating technology, the precision fiber fusion technology, and the technology for designing and fabricating special fibers. Within the three years of our studies, we have achieved the following results:

- (1) We develop new optimization inverse design methods for designing advanced fiber gratings. We have also demonstrated the design of new LPG EDFA gain flattening filters and dispersionless FBG filters.
- (2) We have developed new fabrication methods for fabricating advanced fiber gratings and have demonstrated the practical fabrication of dispersionless FBG filters.
- (3) We have developed a new method for measuring the dispersion properties of FBG devices.
- (4) We have developed new high repetition-rate modelocked fiber lasers with several hundred femtosecond output pulsewidth.
- (5) We have developed a quantum theory of fiber Bragg grating solitons.
- (6) We have developed simulation programs for tapered fiber devices and photonic crystal fibers based on the finite element method.

Some of these results have been published on international journals or international conferences. It shows that our achievements have been recognized by international researchers.

Keywords: All-fiber devices, DWDM, Fiber grating

【目錄】

1. 前言-----	4
2. 研究目的-----	4
3. 文獻探討-----	4
4. 研究方法-----	5
5. 結果與討論-----	6
6. 論文發表-----	16
7. 計畫成果自評-----	17
8. 可供推廣之研發成果資料表-----	18

1. 前言

近年來光纖科技的進步已經在許多研究領域造成很大的進展，幾個最重要的光纖技術包括光纖光柵技術、光纖雷射技術、及特殊光纖技術（包括光晶體光纖）等，都已經受到很大的重視。光纖相關技術的最大優勢之一是其與光纖通訊系統的相容性，藉著簡單之光纖熔接即可達到積體化的連結，沒有一般光學元件或系統所需特別注意的光學對光問題，其他的可能優點包括成本便宜、光學特性優異、及性能多樣性等等也都是發展上的主要著眼點。我們過去三年來在新型 DWDM 光纖式元件之相關研究上已經建立很好的研究基礎，主要的成果包括：

- (1) 發展出光纖光柵元件的最佳化設計方法，並設計出新型之 LPG EDFA Gain flattening filter 以及新型之無色散 FBG 元件。
- (2) 發展出光纖光柵元件的新型製作方法並實際製作出無色散 FBG 元件。
- (3) 建立新型光纖光柵色散特性量測技術。
- (4) 發展出新型飛秒級高重複率鎖模光纖雷射。
- (5) 發展出光纖光柵光固子的量子理論。
- (6) 發展出 tapered fiber device 及晶體光纖的有限元素法模擬分析程式。

在以下的報告中我們就來詳述這些研究成果。

2. 研究目的

我們過去幾年在光纖光學相關學術研究與技術研發上已經建立很好的基礎，在本計畫中我們立基於這基礎上來進一步研發更先進之 DWDM 光纖式元件相關技術，特別是在光纖光柵技術與鎖模摻鉀光纖雷射技術等方面。本計畫的主要研究目的即是希望透過這三年來之計畫執行，讓我們繼續在這些光纖科技研究領域上進行前瞻性的學術研究與技術開發，並持續在這些研究領域有所貢獻。

3. 文獻探討

DWDM 光纖式元件或更廣之光纖科技相關研究的內容事實上非常多樣，不過仍可簡略摘要如下。過去幾年光纖光柵技術的發展主要包括：(1) 各種光纖光柵之逆向設計[1-2]；(2) 各種複雜光纖光柵元件之製作[3-4]；(3) 各種光纖光柵元件在光通訊、光感測等方面之應用[5]。過去幾年光纖雷射技術的發展則主要包括：(1) 各種單模連續波光纖雷射及其應用[6-7]；(2) 各種鎖模光纖雷射及其應用[8-9]；(3) 各種高功率光纖雷射及其應用[10]。過去幾年特殊光纖技術[11]的發展則主要包括：(1) 各種增益光纖；(2) 各種不同色散光纖；(3) 各種高非線性光纖；(4) 各種光晶體光纖[12-14]。

至於相關的研究機構，在國外方面，發展光纖光柵、光纖雷射、及特殊光纖技術最有成效的國家應該是英國，像是 Univ. of Southampton 便是這方面相當著名的研究重鎮，University of Bath 則以光晶體光纖之研究而著名。其他像美國 3M 在長光纖光柵的製作上有其獨到之處，MIT 則以在鎖模光纖雷射上的研究而知名。日本方面 NTT 及 Tohoku University 等在光纖光柵、鎖模光纖雷射、及光晶體光纖方面都有很好的研究成果。澳洲方面也有幾個地方有很好的研究成績。在國內方面，包括台大、台科大、交大、逢甲、成大、中正等校皆有在進行光纖光柵之研究，交大有兩位老師在進行鎖模光纖雷射之研究，台大則有幾位老師已開始光晶體光纖之研究。

【參考文獻】

- [1] J. Skaar, L. Wang, and T. Erdogan, "On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling," IEEE J. Quantum Electron. 37, 165-173 (2001).
- [2] C.-L. Lee and Y. Lai, "Evolutionary Programming Synthesis of Optimal Long-Period Fiber Grating Filters for EDFA Gain-Flattening," IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.14, No.11, 1557

- (2002).
- [3] I. Petermann, B. Sahlgren, S. Helmfrid, A. T. Friberg, and P.-Y. Fonjallaz, "Fabrication of advanced fiber Bragg gratings by use of sequential writing with a continuous-wave ultraviolet laser source," *Appl. Opt.*, vol. 41, pp. 1051-1056, 2002.
 - [4] J. B. Jensen, M. Plougmann, H. -J. Deyerl, P. Varming, J. Hubner, and M. Kristensen, "Polarization control method for ultraviolet writing of advanced Bragg gratings," *Opt. Lett.*, vol. 27, pp. 1004-1006, 2002.
 - [5] Kalle Yla-Jarkko, Mikhail N.Zervas, Michael K. Durkin, Ian Barry, A. B. Grudinin, "Power penalties due to In-Band and Out-of-Band dispersion in FBG cascades," *J. Lightwave Technology*, vol.21, 506-510 (2003).
 - [6] M. Ibsen, S. Y. Set, G. S. Goh, and K. Kikuchi, "Broad-band continuously tunable all-fiber DFB lasers", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol.14, pp.21 -23, 2002.
 - [7] H. Chen, F. Babin, M. Leblanc, and G. W. Schinn, "Widely tunable single-frequency Erbium-doped fiber lasers DFB", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, Vol.15, pp.185 -187, 2003.
 - [8] C.X. Yu, H.A. Haus, and E.P. Ippen, "Gigahertz-repetition-rate mode-locked fiber laser for continuum generation", *Opt. Lett.*, Vol. 25, pp.1418-1420, 2000.
 - [9] T. Yamamoto, K. R. Tamura, and M. Nakazawa, "1.28 Tbit/s-70-km OTDM femtosecond-pulse transmission using third- and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator", *Electron. Comm. Jpn. Part1*, Vol. 86, pp.68-79, 2003.
 - [10] G. Bouwmans, R. M. Percival, W. J. Wadsworth, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, "High-power Er:Yb fiber laser with very high numerical aperture pump-cladding waveguide", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, pp.817-818, 2003.
 - [11] Gordon A. Thomas, Boris I. Shraiman, Paul F. Glodis, and Michael J. Stephen, "Towards the clarity limit in optical fibre", *Nature* vol. 404, pp. 262-264, 2000.
 - [12] Philip Russell, "Photonic Crystal Fibers", *Nature*, vol. 299, pp. 358-362, 2003.
 - [13] Albert Ferrando, Enrique Silvestre, Pedro Andr'es, Juan J. Miret, and Miguel V. Andr'es, "Designing the properties of dispersion-flattened photonic crystal fibers", *Opt. Express*, vol. 9, pp. 687-697 2001.
 - [14] K. Saitoh, M. Koshiba, T. Hasegawa, and E. Sasaoka , "Chromatic dispersion control in photonic crystal fibers: application to ultra-flattened dispersion", *Opt. Express*, vol. 11, pp. 843-852, 2003.

4. 研究方法

本計畫的研究方向及所採用的方法主要如下：

- A. DWDM 光纖光柵元件設計技術：發展利用 Evolutionary Programming 的方法來設計最佳化的長週期 (long-period) 及布拉格 (Bragg) 光纖光柵。
- B. DWDM 光纖光柵元件製作技術：建立可以逐段曝製精密光纖光柵的工作平台，並發展可以在一次掃描中製作出 dc-折射係數平坦化 (true apodization) 與任意 ac-折射係數振幅及相位之光纖光柵的新方法，最終實際製作出窄頻無色散 (dispersionless) 光纖光柵，可應用於 DWDM OADM 來達到較大的頻譜可利用率。
- C. 新型光纖光柵色散特性量測技術：利用寬頻光源干涉式光相位量測方法來量測光纖光柵反射光相位頻譜，從而可得出光纖光柵之色散頻譜。
- D. 新型鎖模光纖雷射技術：利用非同步調變之混合鎖模技術，證明有可能在 10GHz 之高重複率下直接由光纖雷射輸出幾百飛秒的脈衝序列，不需要再經過腔外脈衝壓縮才能達到飛秒級的脈衝寬度。
- E. 光纖光柵光固子的量子理論：發展 1-D 布拉格光纖光柵光固子之量子理論，來研究布拉格光纖光柵光固子的量子效應。

F. 特殊光纖模擬分析程式：發展針對 tapered fiber device 及晶體光纖的有限元素法模擬分析程式

5. 結果與討論

本計畫的各項研究成果及討論可分述如下：

A. DWDM 光纖光柵元件設計技術：

【說明】

我們發展出利用 Evolutionary Programming 的方法來設計最佳化的長週期 (long-period) 及布拉格 (Bragg) 光纖光柵，也以實際應用的設計例子首次證明可以利用最佳化的設計方法設計出較一般 Layer-Peeling 逆向設計方法更好的結果。

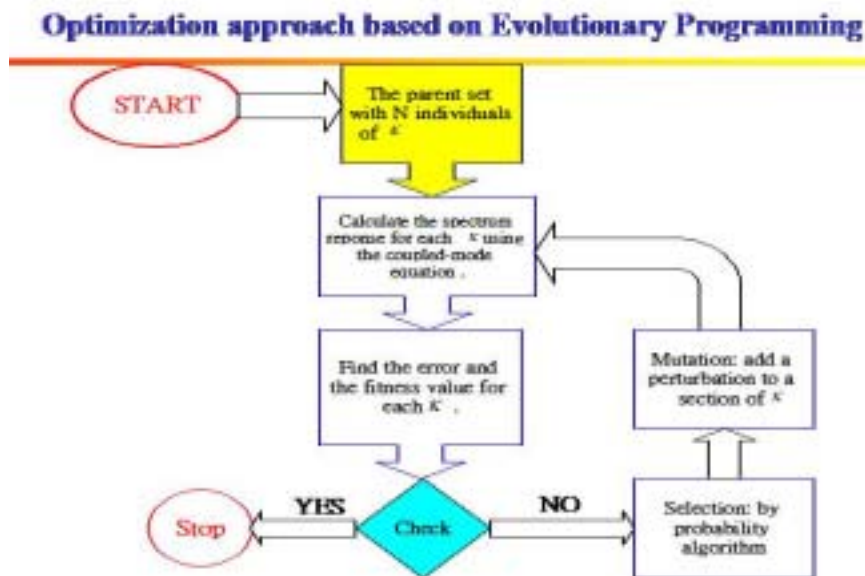


Fig.1: Flow chart for Evolutionary Programming

Design of Optimal Dispersionless Fiber Bragg Grating

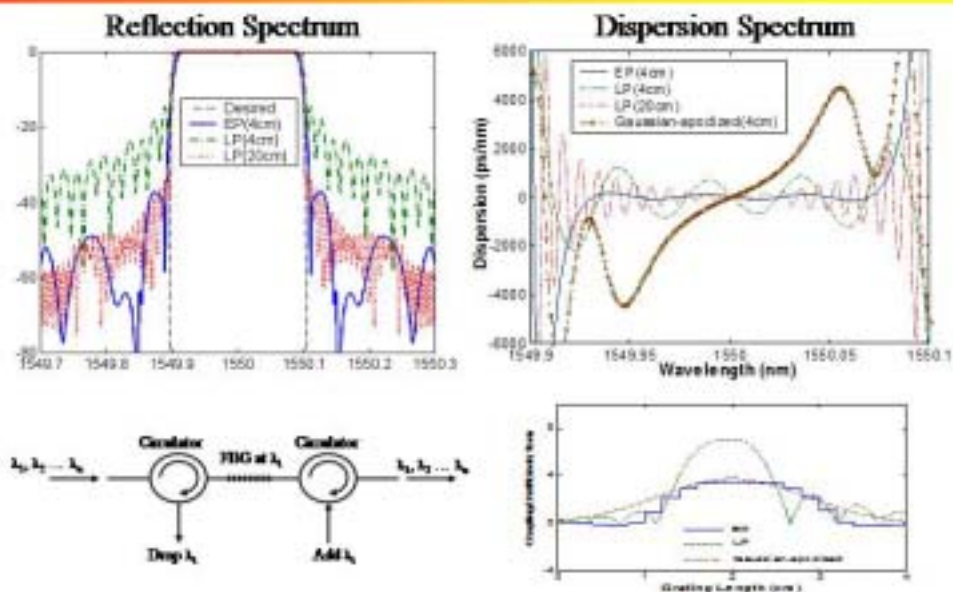
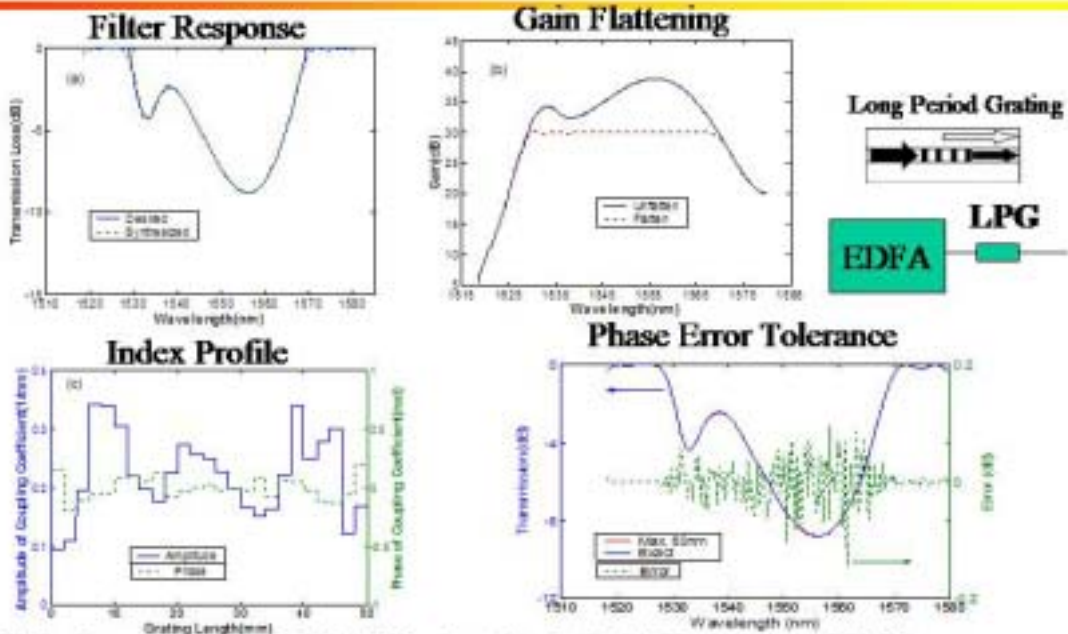


Fig.2: Dispersion FBG designed by Evolutionary Programming

Design of Optimal Gain Flattening Long Period Grating



(C.-L. Lee and Y. Lai, IEEE Photon. Tech. Lett, November, 2002.)

Fig.3: LPG Gain-flattening filter designed by Evolutionary Programming

B. DWDM 光纖光柵元件製作技術：

【說明】

過去幾年我們在實驗室中已建立如下圖中所示之精密光纖光柵逐段曝照系統：

Step-Scan Exposure

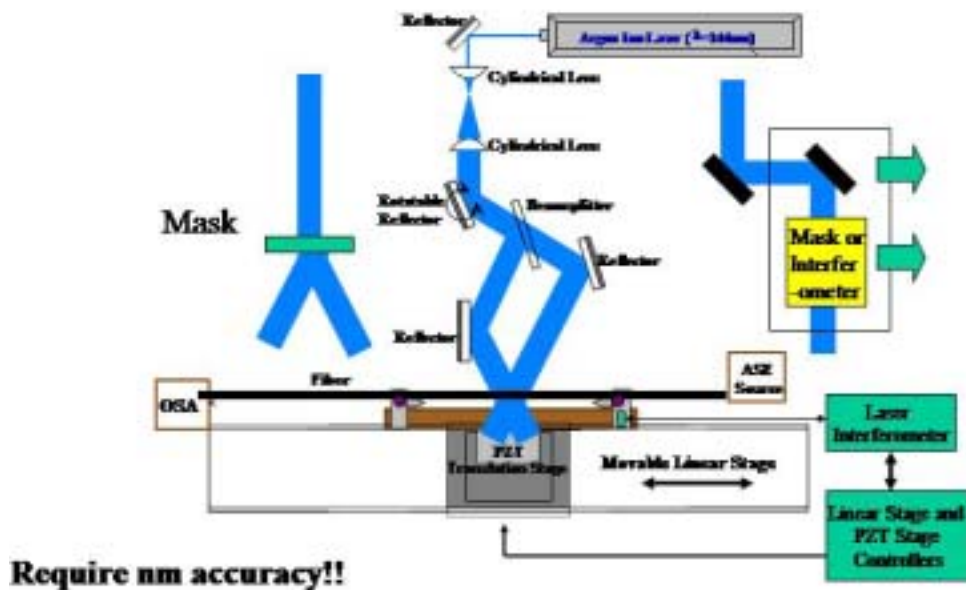


Fig. 4: Step-scan FBG exposure setup

也研發出兩種可以在一次掃描中製作出 dc-折射係數平坦化 (true apodization) 與任意 ac-折射係數振幅及相位之光纖光柵的新方法，以及利用 side-diffraction 來作位置監控的技術，並實際製作出 DWDM OADM 模組中所需之窄頻無色散 (dispersionless) 光纖光柵：

New dc-flattening method: two beam interference

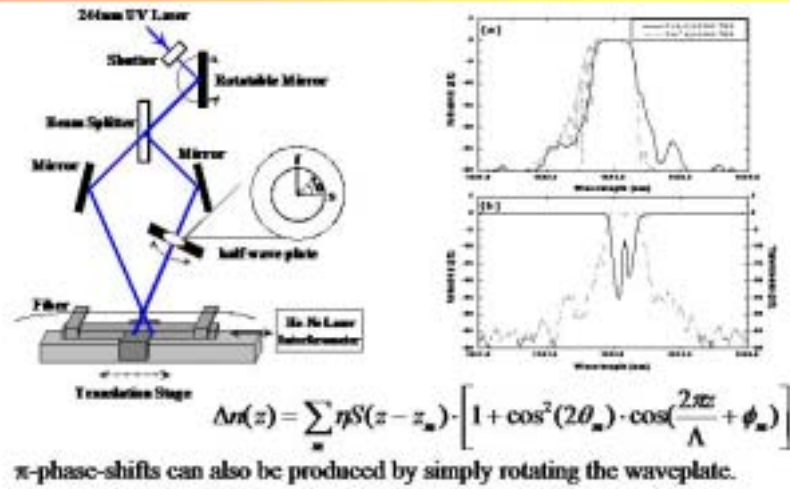


Fig. 5: New FBG exposure scheme 1

New dc-flattening method: phase mask

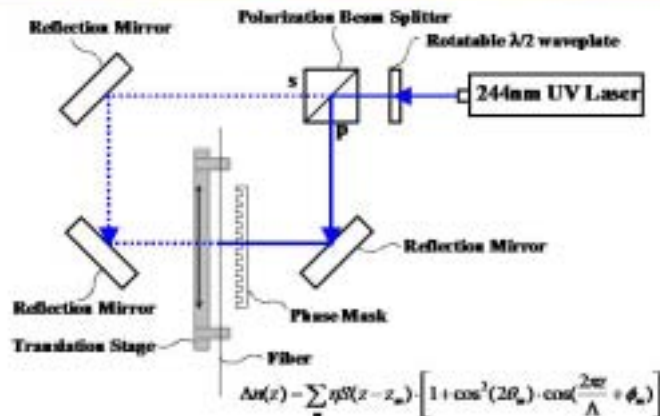


Fig. 6: New FBG exposure scheme 2

Grating phase monitoring by side-diffraction

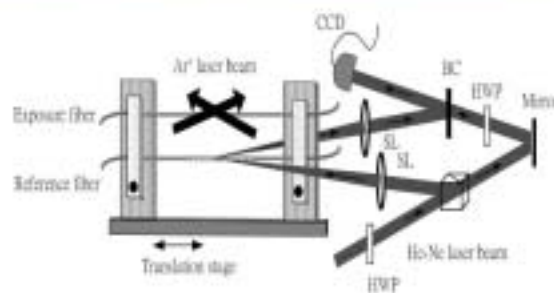


Fig. 7: Side-diffraction position monitoring scheme

Fabricated Dispersionless FBG

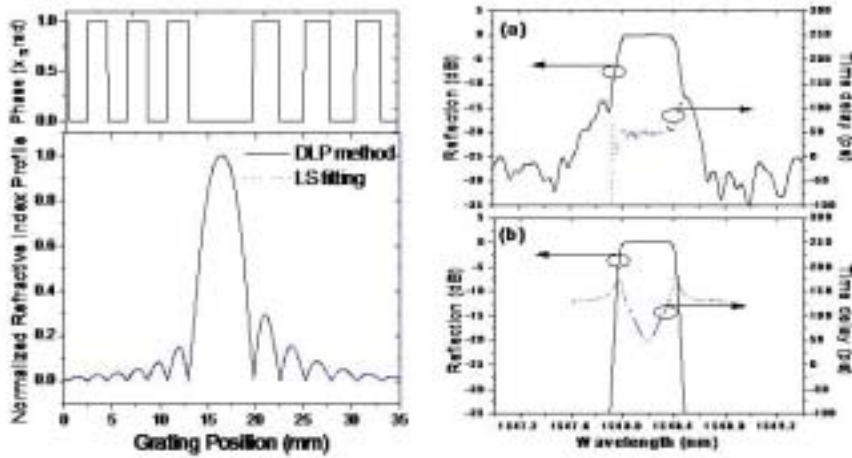


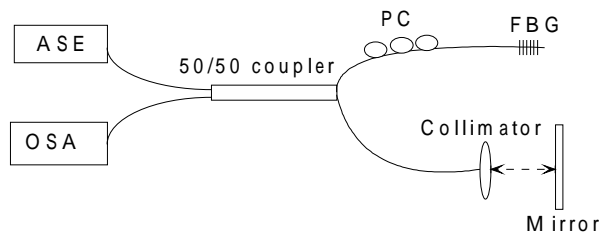
Fig.8: Fabricated dispersionless FBG

- C. 新型光纖光柵色散特性量測技術：利用寬頻光源干涉式光相位量測方法來量測光纖光柵反射光相位頻譜，從而可得出光纖光柵之色散頻譜。

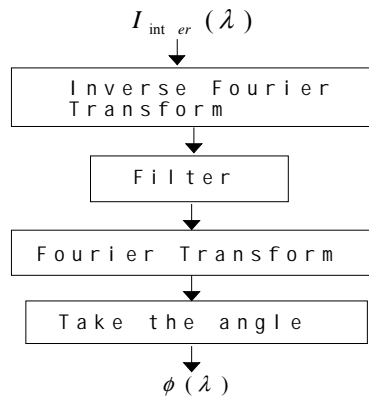
【說明】

我們建立了如下圖(a)之色散特性量測實驗架構，使用白光干涉頻譜量測技術及下圖(b)之新型信號處理技術來取出欲量測的相位頻譜資訊，最後由此相位頻譜資訊即可得出所要之 group delay 或 dispersion 頻譜資訊。針對一個光纖光柵的量測結果如下圖(c)之所示，重複測量的驗證可以證明我們的 group delay 量測準確度大約是在 5ps 以內。和商用雷射調變量測設備的量測結果下圖(d)比較也顯示我們的方法有很好的準確性。

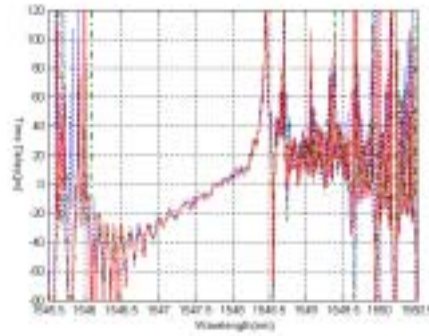
(a)



(b)



(C)



(d)

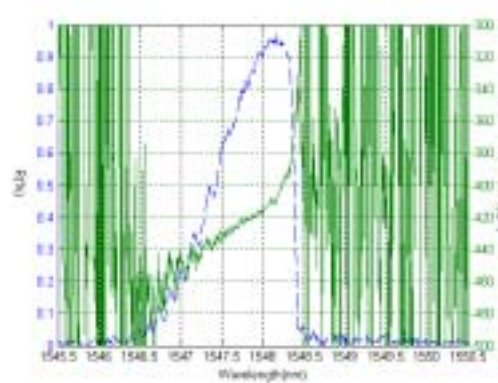


Fig.9: FBG dispersion measurement and results

D. 新型鎖模光纖雷射技術：

【說明】

我們在實驗室中已建立如下圖的混合式鎖模光纖雷射系統：

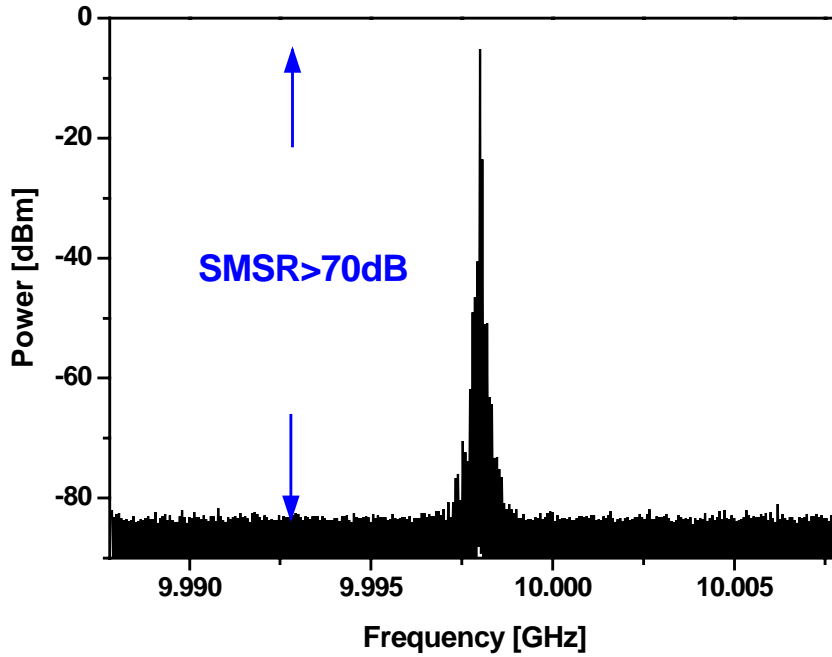


Fig.12: RF spectrum of the output pulses

一般而言，在 10GHz 及更高重複率的鎖模光纖雷射其直接由雷射輸出的脈寬大都為 ps 的等級，很難直接得到 sub-ps 或 fs 等級之輸出，必須藉助於額外的腔外脈寬壓縮才能得到 fs 等級之輸出。我們的雷射目前已經可以在 10GHz 直接有 fs 等級之輸出，穩定度也很好。此雷射的 RF 頻譜有如下圖的調變頻率分量，將可用來作為進一步穩定雷射腔長之用。

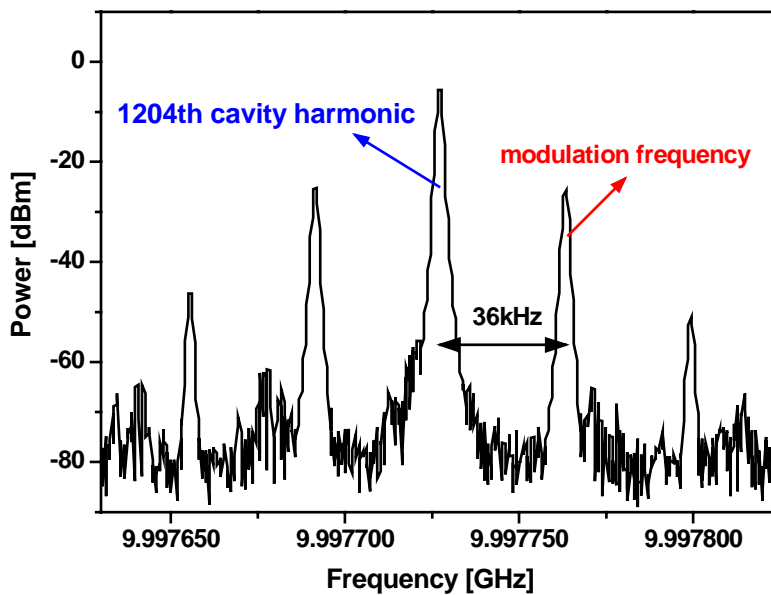


Fig.13: RF spectrum of the output pulses (expanded view)

- E. 光纖光柵光固子的量子理論：發展 1-D 布拉格光纖光柵光固子之量子理論，來研究布拉格光纖光柵光固子的量子效應。

【說明】

光纖中的三次非線性光學效應加上光纖光柵的效應可產生很多有趣的現象，其中之一即是 Bragg grating soliton。因為有三次非線性效應，如果入射光的強度夠強，即使入射光的波長以進入光柵的 bandgap，仍有可能可以在光柵中傳播，此即 Bragg grating soliton 及 gap soliton 現象。過去這種 Bragg grating soliton 的現象已被實際觀測到，不過因所需的光強度甚大 ($> \text{GW}/\text{cm}^2$, several tens ps pulsewidth)，需大型雷射才能進行實驗（見下圖）。最近我們也發展出一套有關 Bragg grating soliton 問題的量子理論，預測了利用布拉格光纖光柵光固子將可觀測到量子振幅壓縮 (amplitude squeezing) 的現象。這些古典及量子非線性現象都非常有趣，有可能可以應用於全光信號處理及量子光學實驗等方面。

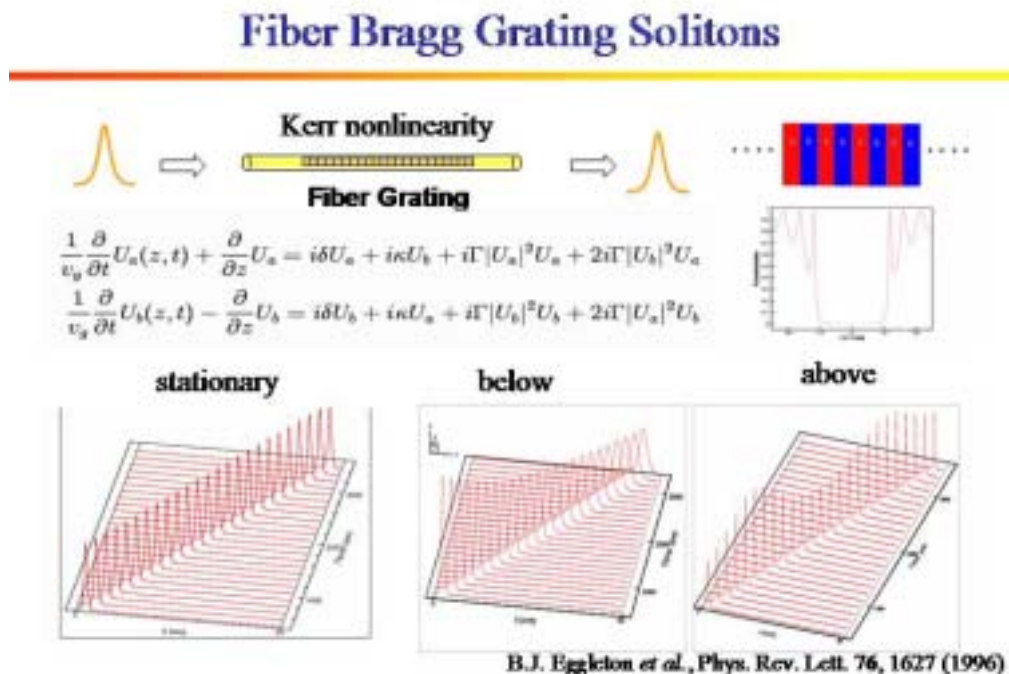


Fig.14: FBG solitons: simulation

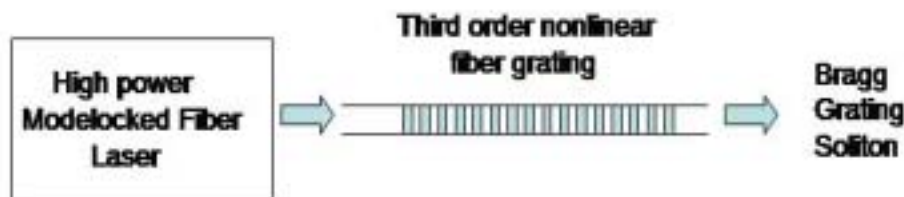


Fig.15: Generation of FBG solitons

Amplitude squeezing of fiber Bragg grating solitons

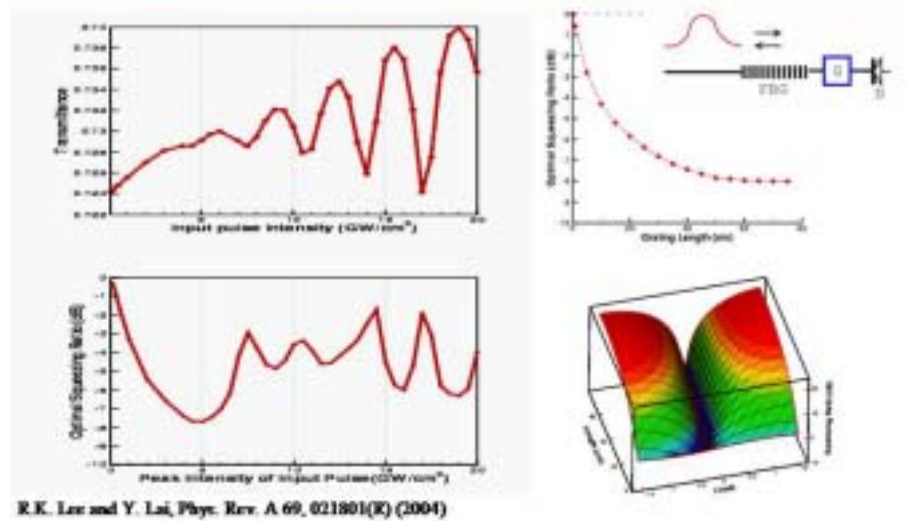
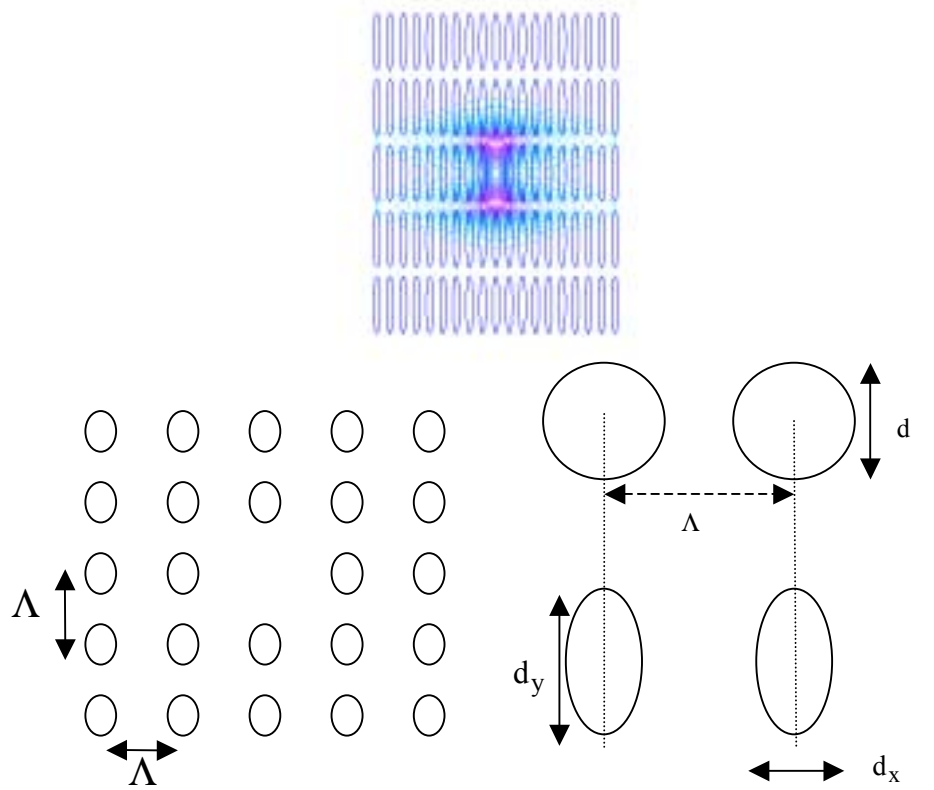


Fig.16: Amplitude squeezed FBG solitons

F. 特殊光纖模擬分析程式：

【說明】

我們發展出針對 tapered fiber device 及晶體光纖的有限元素法模擬分析程式，下圖即為針對 Square- and Rectangular-Lattice Holey Fibers with Elliptical Air Holes 的一些模擬結果。



(a) The structure of the square-lattice HF with elliptical air holes.

(b) Illustration of the structure parameters.

(c) The birefringence for the cases with $\Lambda = 1 \mu\text{m}$, $a=0.6$.

(d) The propagation loss for the cases with $\Lambda = 2.32 \mu\text{m}$, $a=0.5$, and $s=0.52$.

Fig.17: Simulation of photonic crystal fibers.

以上即是本計畫的一些主要成果，這些成果有許多以發表在國際期刊文獻或國內外會議之上，並且仍繼續發展深入當中。

6. 論文發表

本計畫主要的論文發表成果可簡述如下：

(1) 光纖光柵元件之設計

1. C.-L. Lee and Y. Lai, "Evolutionary Programming Synthesis of Optimal Long-Period Fiber Grating Filters for EDFA Gain-Flattening," IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.14, No.11, 1557 (2002).
2. L.-G. Sheu, K.-P. Chuang, and Y. Lai, "Fiber Bragg grating dispersion compensator by single-period overlap-step-scan exposure", IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.15, No.7, 1557 (2003)
3. C.-L. Lee and Y. Lai, "Synthesis of long-period fiber gratings using evolutionary programming", Fiber & Integrated Optics, Volume 23.4., (2004)
4. C.-L. Lee and Y. Lai, "Optimal dispersionless fiber Bragg grating filter with shorter grating length and smoother dispersion profile", Optics Communications 235, pp.99-106, (2004).
5. C.-L. Lee and Y. Lai, "Evolutionary programming synthesis of advanced fiber grating devices", CLEO 2003, USA.

(2) 光纖光柵元件之製作

1. K.-P. Chuang, L.-G. Sheu, and Y. Lai, "Pure apodized phase-shifted fiber Bragg gratings fabricated by a two-beam interferometer with polarization control", IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, pp. 834-836, (2004).
2. K.-P. Chuang, L.-G. Sheu, and Y. Lai, "Complex fiber grating structures fabricated by sequential writing with polarization control", Optics Letters 29, pp.340-342 (2004).
3. K.-P. Chuang, L.-G. Sheu, and Y. Lai, "Complex fiber grating structures fabricated by using polarization control of the UV exposure beam", paper MF25, OFC, 2004.
4. K.-P. Chuang and Y. Lai, "Interferometric side-diffraction position monitoring technique for writing long fiber Bragg gratings", paper CThM6, CLEO/IQEC, 2004.

(3) 鎖模光纖雷射

1. Gong-Ru Lin, Yao-Ling Cheng, and Yinchieh Lai, "A regeneratively mode-locked erbium-doped fiber laser with a simple circuitry for jitter reduction and pulse-delay-tuning," paper WR1, Optical Fiber Communication (OFC) conference, 2002.
2. Mingfeng Tien, Weiwei Hsiang, and Yinchieh Lai, "A femtosecond hybrid mode-locked Er-fiber soliton laser by asynchronous phase modulation", TU3G (6)-3, CLEO/PR 2003.
3. Wei-Wei Hsiang, Cheng-Chin Chung and Yinchieh Lai, "Observation of Pulse Repetition Rate Multiplication in a Stretched-Pulse Additive-Pulse-Modelocking Er-Fiber Laser", TU3G (6)-4, CLEO/PR 2003.
4. Yu-Ting Li, Cheng-Chih Chung, and Yinchieh Lai, "Variational Modelling of Stretched Pulse Polarization Additive-Pulse-Modelocking Er-Fiber Lasers," paper WE36, Nonlinear Optics conference, 2002.

(4) 光固子之量子效應

1. R.-K. Lee and Y. Lai, "Amplitude squeezed fiber Bragg Grating solitons", Phys. Rev. A 69, 021801(R), (2004). (also selected for the March 1, 2004 issue of Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology)
2. Ray-Kuang Lee and Yinchieh Lai, "Quantum theory of fiber Bragg grating solitons", J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt. 6, S638-S644, (2004)

3. R.-K. Lee and Y. Lai, "Interaction induced photon-number entangled temporal soliton pairs", paper FA3, Nonlinear Optics Conference, 2004.
4. Ray-Kuang Lee, Yinchieh Lai, and Boris Malomed, "Squeezing of Bistable Solitons in the Cubic-Quintic Schrodinger Equations", Non-Linear Guiding Wave conference (NLGW), paper MC5, 2004.
5. Ray-Kuang Lee and Yinchieh Lai, "Quantum theory of bragg solitons: linearized approach", Session: WP (4)-1, CLEO/PR 2003.

7. 計畫成果自評

如前所述，本計畫主要的成果可分為以下幾個方面：

- (1) 發展出光纖光柵元件的最佳化設計方法，並設計出新型之 LPG EDFA Gain flattening filter 以及新型之無色散 FBG 元件。
- (2) 發展出光纖光柵元件的新型製作方法並實際製作出無色散 FBG 元件。
- (3) 建立新型光纖光柵色散特性量測技術。
- (4) 發展出新型飛秒級高重複率鎖模光纖雷射。
- (5) 發展出光纖光柵光固子的量子理論。
- (6) 發展出 tapered fiber device 及晶體光纖的有限元素法模擬分析程式。

其中在(5)這一項我們應是居世界領先的地位，在(1)和(2)兩項的成果則大約可和世界上領先的研究群具有同樣的水準，在(4)這一項則已有很好的結果，在(6)這一項則還有待進一步發展，(3)這一項則已發展完成。整體而言，本計畫應已達到在光纖科技研究領域上進行前瞻性的學術研究與技術開發，並持續在這些研究領域有所貢獻的研究目的。

8. 可供推廣之研發成果資料表

 可申請專利
 可技術移轉

日期：93 年 10 月 30 日

國科會補助計畫	計畫名稱：新型 DWDM 光纖式元件之研究 計畫主持人：賴暎杰 計畫編號：NSC 92-2215-E-009-007 學門領域：光電
技術/創作名稱	新型光纖光柵曝製技術
發明人/創作人	莊凱坪、許立根、賴暎杰
技術說明	中文： 新型之逐段式光纖光柵曝製技術，可用來曝製任意形狀之布拉格光纖光柵元件。
	英文： New sequential-writing techniques for fabricating advanced fiber Bragg grating devices.
可利用之產業 及 可開發之產品	光通通訊、光纖感測
技術特點	可在一次掃描曝照中達到 dc 折射係數平坦化的要求。
推廣及運用的價值	可幫助光纖光柵生產公司來生產先進的光纖光柵元件。

1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。

2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。

3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。