

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫四：全像三維光學連線在高密度波長多工通訊網路應用之研究(3/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2215-E-009-005-

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研究所

計畫主持人：許根玉

共同主持人：林烜輝

報告類型：完整報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 3 日

期末報告

全像三維光學連線在高密度波長多工通訊網路應用之研究 Holographic 3D Interconnections for DWDM Application

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號： NSC-90-2115-E-009-075

NSC-91-2115-E-009-024

NSC-92-2215-E-009-005

執行期間： 90年 8月 1日至 93年 7月 31日

計畫主持人：許根玉 國立交通大學光電工程研究所

共同主持人：林烜輝 國立交通大學電子物理系

成果報告類型： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學電子物理系

一、中英文摘要

本計劃的目標在探討體積多工全像濾波器設計/分析/製作技術，及其與微光機陣列元件配合，構成高密度多段波長多工網路通訊(DWDM)中所需之具有可程式化控制、高速連線、窄頻寬、以及微體積等特性之新穎元件模組的先導性研究。我們特別致力於利用體積全像光學技術，發展 DWDM 光學濾波器的設計、製作與分析，探討濾波器中最主要的特性參數，諸如：穿透特性、頻寬特性、雜訊反射、色散特性、耦合損失等等，以作為設計新穎「波長上下話路」模組(Wavelength Add/Drop Multiplexer, WADM)中 MUX 與 DMUX 元件的參考依據以及探討其相關應用。

關鍵詞：光學連線、體積全像、光學資訊處理及通訊

Abstract

The main goal of this research is to develop a novel Wavelength Add/Drop Multiplexer (WADM) structure for DWDM fiber communication. In our design, the demultiplexer (DMUX) and multiplexer (MUX) devices will be achieved by using the multiple holographic gratings, and optical micro-mirror array switchers developed by subproject #6 will be integrated into our design to achieve a reconfigurable WADM modular. In this project, the main task is how to develop the narrow band and to integrate them into a compact MUX and/or DMUX device.

The research is divided into three phases. In second year, a comprehensive study on optical design, analysis and metrology of the DWDM filters by multiplexed and/or cascaded volume holographic techniques have been conducted. Some important filter characteristics include optical transmission, bandwidth, out-of-band rejection, ... etc. have been discussed. The results can provide us guidelines for designing novel narrow-pass-band filters for MUX and DMUX in a WADM device.

Keywords : Optical interconnections, Volume Hologram, Optical information processing and communication

二、報告內容

2.1 計劃說明

在 高密度多段波長多工通訊(DWDM) 網路系統中，每一根光纖可以攜帶數十到數百個頻道之信號，頻道之間相隔 50 GHz 到 100 GHz 不等。在這樣的光纖網路中有許多的信號上下地點，它藉由一個器件來把光纖中的光信號下載，或把新的信號上載到網路去，好像高速公路交流道一般，這種器件叫做「波長上下話路」模組(WADM)。WADM 包含兩個主要器件：光波濾波器及光波開關。濾波器的功能是選擇光波波長，把所要的光波頻道自光纖中傳送的許多波長之中選擇出來(稱為 DMUX)準備下載，或把新的信號按照指定的波長選擇正確頻道準備上載進入光纖(稱為 MUX)，而光學開關則負責把選到的光波下載或上載。這樣的濾波器需要窄頻寬、光學效率高、雜訊低及相鄰頻道間不會互相耦合等性能，而光學開關則需要適當的開與關速度、光束的開與關狀態分明、低的能量耦合損失等性能。當然，兩者組合起來之後，總體結構精緻、能量效率高、頻道操作穩定、易於程式控制等等也是必備的性能。在本研究計劃過程，我們提出一種新穎的 WADM 結構，利用體積全像光柵作為 WADM 中之 DMUX 及 MUX 的濾波器，而使用微光面鏡陣列作為光學開關，組合起來成為一種可以程式控制之 WADM 模組。

2.2 研究成果與討論

(1). 模組設計

圖一顯示一個 N-頻道的 WADM 模組構造圖。它包含兩組體積全像光柵濾波器(每一組包含 N-個體積全像光柵濾波器，這兩組分別稱為前半部跟後半部，兩者平行並列)，以及夾在這些光柵之間的 N-對微光面鏡，每一對包含兩個被對背的微面鏡。兩組體積全像光柵的前半部是 N-個體積光柵，光柵一個一個記錄在相鄰位置而平行並排在一塊體積全像材料之中，其功能是利用光柵的布拉格繞射條件將許多入射光波繞射

而分開到 N -個空間頻道，因此具有 DMUX 功能。後半部的 N -個光柵構造跟前半部相同，但光波傳播方向相反，因此形成 MUX 功能。當光纖射出的光波包含許多波長，光波入射到 DMUX 之中時，各個波長就會被其對應的體積光柵(記錄在模組的不同位置形成空間中的不同頻道)繞射出來，沿著不同方向行進，經過微光面鏡陣列。此時透鏡陣列決定該頻道之光是否要下載或是繼續向下傳播，每一個頻道是由一對背對背

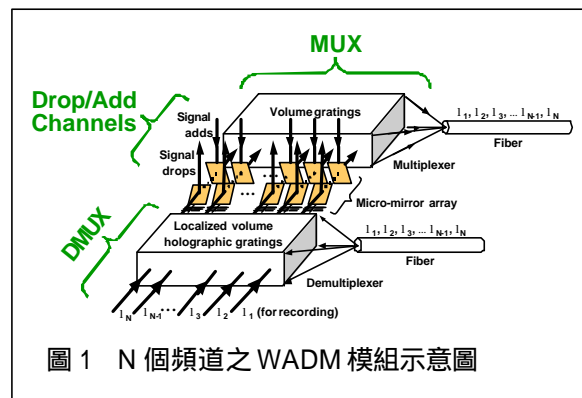
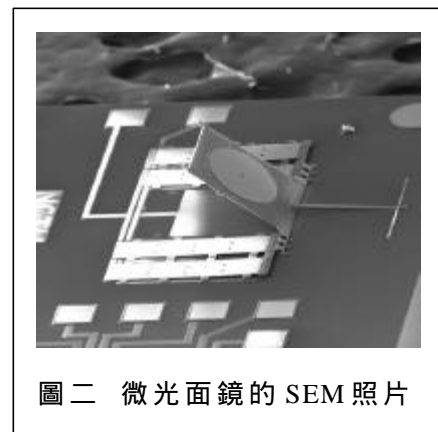


圖 1 N 個頻道之 WADM 模組示意圖

的微面鏡組成，如果是要下載(Drop)該頻道的信號，則該頻道的第一個微面鏡豎起來跟光束成 45° 角，於是該頻道的光就被反射出來而下載了；如果不下載則這一對微面鏡組平躺，而使光束直接打入第二塊體積光柵(MUX)中而被繞射進入下一段光纖，於是讓該頻道的信號在光纖網路中直通(pass through)；如果想要上載(Add)某一頻道信號時，則把信號垂直射入該頻道的微面鏡組的第二微面鏡，面鏡豎起 45° ，於是光束被反射到水平方向射向後半部的體積全像光柵濾波器(MUX)，經過光柵繞射之後加入光纖而向下一段傳播；於是，經由濾波器將各個頻道的光波分到各頻道，再經由控制微面鏡的豎直或躺平就可以達到光束下載或上載的功能。

(2). 微光面鏡

WADM 的光學開關是由微機電技術製作的微光面鏡陣列，每一頻道是由一組背對背的微面鏡構成，面鏡是以標準的微機電製程製作於矽晶片上，它包含兩層多矽晶，兩層犧牲層，以及一層鍍金面，每個鏡面各邊長 200 微米。設計時，已經把一組兩個鏡面在 DMUX 及 MUX 的背對背相對位置算好，使得光束反射剛好下載到光偵測器或上載到 MUX 的光濾波器。面鏡的轉動是靠一個微卡筭支撐在矽晶片的基板上。基本上，它是靠一個預置的壓力臂來將鏡面撐起來，這個預置壓力臂包含一個氧化物跟金屬的雙層結構，該臂之一端固定於基板上，另一端則在犧牲層材料蝕刻之後釋放成自由端，由於臂之兩層材料之間的壓力差而將鏡面撐起成 45° ；如果要讓鏡面平躺則加電壓，電極位於壓力臂之下，以使其產生的靜電力可以克服預置壓力而使鏡面平躺。因此，可以經由電壓來控制鏡面的站起來或平躺，而達到可程式控制的光學開關作用。圖二顯示微光面鏡的 SEM 照片。實驗量測結果，這個鏡面的開關動作需要加 10 伏特電壓，當開關速度為 20 Hz 時微面鏡的工作狀況良好，約 5 ms 可以達到開關的穩定狀態，當開關速度為 100 Hz 時，則由於壓力臂的動態特性而逐漸有震動現象。



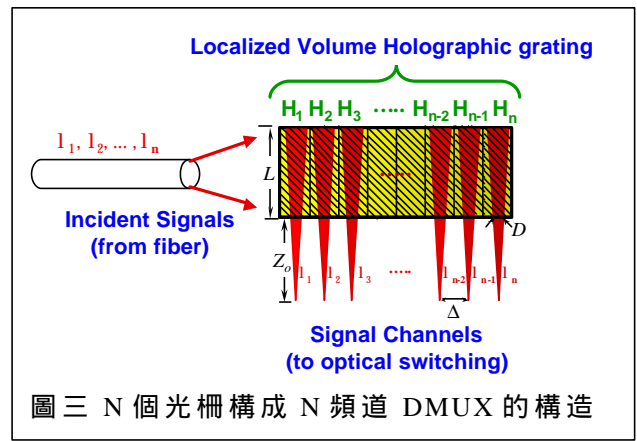
圖二 微光面鏡的 SEM 照片

[註]: 微光面鏡模組是由交通大學電機與控制工程系邱俊成教授主持的”以微機電技術開發應用於高密度波長多工通訊網路之光切換元件研究”子計劃研究完成。

(3). 體積全像光柵濾波器

體積全像光柵濾波器的設計原理是根據體積光柵的布拉格繞射條件，入射到體積光柵而滿足布拉格條件的特定波長之光波會被光柵繞射到特定方向，其他波長之光波則不受光柵影響而繼續前進。現在把對應各個 DWDM 波長的體積光柵作在一塊材料的不同區域上，每個光柵對應某一個波長之布拉格條件，相鄰頻道之光柵擺置在相鄰位置，間隔為 λ ，則形成 N 頻道濾波器。圖三顯示 N 個光柵構成一個 N 頻道之 DMUX 的構造，共有 H_1, H_2, \dots, H_n 等 N 個頻道，分別對應 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 等波長。製作時，波長 λ_1 的光由左邊平行入射以及由 H_1 垂直入射，兩者干涉寫出第一頻道濾波

器光柵，接者以類似方法寫出 H_2, \dots, H_n 等 N 個頻道之光柵，而形成 DMUX。於是，當許多波長的光同時由左邊的光纖入射時，波長 λ_1 的光將被 H_1 繞射而轉彎 90 度進入第一頻道，其他波長則通過 H_1 而繼續向右傳播；然後，波長 λ_2 的光將被 H_2 繞射而轉彎 90 度進入第二頻道，以此類推，於是， N 個波長之光就被這些體積光柵分成 N 個頻道在空間分開來而達到 DMUX 之功能。



現在探討雜訊問題。在 DWDM 光通信系統，許多波長的光信號同時在一根光纖之中傳播，這些光波通過光柵時，雖然只有波長滿足布拉格條件的光波會被繞射到對應的頻道，但其他波長的光也會有少量繞射而產生雜訊，變成頻道之間的噪聲互擾，所有其他波長的光波在第 i 個頻道的繞射雜訊之振幅總和可寫成

$$\sum_{m \neq i}^N \text{sinc}^2 \left(\frac{\Delta k L}{2p} \right) \quad (1)$$

式中， L 代表光柵厚度， λ_m 及 λ_i 是第 m 及 i 頻道之光波波長， $\Delta k = 2\pi(\lambda_m - \lambda_i)/(\lambda_m \lambda_i)$ 代表第 m 及 i 兩個頻道之間的布拉格失配量， $\text{sinc}(x) = \sin \pi x / (\pi x)$ 。適當地選擇光柵厚度 L 可使 $\text{sinc}(x)$ 函數位於零點，則可以減小互擾雜訊。但，由於 $\text{sinc}(x)$ 函數呈現遞減特性，因此只要以相鄰兩頻道來設計 $\text{sinc}(x)$ 函數之零點即已足夠。設相鄰兩頻道之互擾雜訊位於 $\text{sinc}(x)$ 函數之第 l 個零點，則光柵厚度 L 需為：

$$L = l \frac{I_{i+1} I_i}{(I_{i+1} - I_i)} \approx l \frac{I_{N/2}^2}{dl} \quad (2)$$

式中， $I_{N/2}$ 代表中心頻道波長， $\delta \lambda$ 代表該頻道之上下相鄰頻道之波長差， l 為正整數，代表 sinc 函數的第 l 個零點。

其次，由於 DMUX 的構造是由 N 個光柵並列於同一塊體積材料，因此相鄰光柵（例如 H_1 及 H_3 ）也會把光波繞射到本頻道（例如 H_2 頻道）來而造成雜訊，稱為光柵互擾雜訊，這是由於光柵的有限寬度的遠場繞射產生之旁瓣對相鄰頻道之干擾；設光柵寬度為 D ，則所有其他頻道之光柵在第 i 個頻道之位置所產生的遠場繞射之旁瓣雜訊總和可寫成

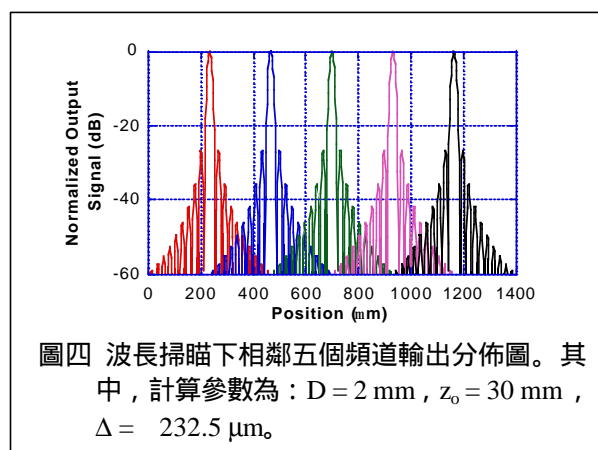
$$\sum_{m \neq i} \text{sinc}^2 \left(\frac{D}{I_m z_0} (m-i) \Delta \right) \quad (3)$$

式中， Z_0 代表光柵跟微面鏡開關中心之間的距離， Δ 為相鄰頻道之間隔。同樣，選擇適當之 Z_0 及 Δ 可以得到相鄰頻道的 sinc 函數之零點而使光柵互擾雜訊降到最低。假設把第 i 跟第 $i+1$ 頻道之間的光柵互擾雜訊取為 sinc 函數的第 p 個零點，則第 i 跟第 $i+1$ 頻道之間の間隔 Δ 可以求出為：

$$\Delta \approx \frac{I_i z_0}{D} \quad (4)$$

以上這幾個公式就是設計體積光柵式 DMUX 及 MUX 光波濾波器的重要公式。例如，假設一個頻道的光柵寬度 $D = 2 \text{ mm}$ ，光柵與鏡面距離 $Z_0 = 30 \text{ mm}$ ，光波波長採用 C 波段的 ITU 波長，頻道間隔 100 GHz ，設光柵互擾設為 $p=1$ 之零點，則相鄰頻道之光柵間隔可求出為 $23.25 \mu\text{m}$ ，為得更高之信噪比，令 Δ 為 10 倍，即 $232.5 \mu\text{m}$ 。應用式(1)~(4)即可求出在鏡面中心位置的信號之空間分布情形，圖四顯示 5 個頻道的信號分布之相對大小，由圖可看出在鏡面中心由相鄰光柵濾波器繞射產生的互擾雜訊低於 60dB ，因此，可以說光柵有限寬度所繞射產生的互擾雜訊可以忽略。

因此，可以說在這種情況之下，各個波長之信號被某個頻道之光柵繞射將是主要的雜訊來源。由式(1)知道，光柵厚度越厚則雜訊越小，而式(2)則可以求出最小($l=1$) 厚度 L 之值。C 頻段之中心波長為 1550.12 nm, 頻道間隔為 100 GHz, 可求出 L 最小值為 3 mm。若取 $L=6$ mm, 則可以算出在 10 個頻道($l=10$) 以上時, 頻道雜訊在 -40dB 以下, 即使頻道數目增加到 50 個, 雜訊仍在 -40dB 以下部在增加, 這是因為 sinc 函數呈遞減性質, 遠離之頻道所產生之雜訊幾可忽略。



按照這樣的參數，兩個頻道之光柵間隔約 0.25mm, 則一塊長度為 2.5 公分的光學晶體或體積全像記錄材料, 將可以容納 100 個頻道, 構成一個結構緊緻的 DMUX 與 MUX, 相當有意思。其中的關鍵問題, 是現今仍缺乏在紅外線波段感光的材料, 以及可以在局部材料記錄個別光柵而其他部位不會感光, 以達到眾多光柵全部記錄在一塊體積之全像光學記錄材料。因此, 上述的實驗及研究都是在可見光範圍進行, 目前研究中的感光高分子材料以及雙波長感光記錄的光折變晶體則是正在努力的方向。

三、計畫成果自評

本研究工作均按預定計畫進行, 也都取得預定成果, 相關結果也陸續整理成論文發表 [1-33]。我們仍將應用 貴會補助建立的各項實驗設備, 持續進行波長多工及解多工的體積全像記錄實驗與分析、微振鏡整合的設計與量測、系統整合規劃以及光學連線之應用等研究課題。

四、參考文獻

1. A. K. Zajtsev, S. H. Lin and Ken Y. Hsu, "Sidelobe suppression of spectral response in holographic optical filter," *Opt. Comm.*, Vol. **190**, pp 103-108, 2001.
2. J. Mumburu, I. Solomatine, D. Psaltis, S. H. Lin, K. Y. Hsu, W. Z. Chen, and W. T. Whang, "Comparison of the recording dynamics of phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) materials," *Opt. Comm.*, Vol. **194**, pp. 103-108, 2001.
3. A. K. Zajtsev, S. H. Lin and Ken Y. Hsu, "Optical demultiplexer based on photopolymer grating for DWDM applications," *J. Opt. Memory & Neural Networks*, Vol. 10, No. 2, 117-124, 2001.
4. A. K. Zajtsev, S. H. Lin, and Ken Y. Hsu, "Anisotropic diffraction of light by volume holographic grating in birefringent photorefractive crystals with extended wavelength range," *Optics Express*, Vol. 10, No. 4, 204-209, 25 February, 2002.
5. Alexei K. Zaitsev, Shiu-an Huei Lin, and Ken Y. Hsu, "Extension of wavelength range by anisotropic diffraction of light on volume holographic grating in BaTiO₃ photorefractive crystal", *J. Opt. Memory & Neural Networks*, 219-225, No. 4, Vol. 11, 2002.
6. Shiu-an Huei Lin, Ken Y. Hsu, Yi-nan Hsiao, and Wha-Tzong Whang, "Quinone-based molecules doped poly(methyl methacrylate) photopolymer for volume holographic data storage," *Proceeding of SPIE*, **4929**, pp. 208-213, 2002
7. Ken Y. Hsu, Shiu-an Huei Lin, Yi-nan Hsiao, and Wha-Tzong Whang, "Experimental characterization of phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer for volume holographic storage", *Opt. Eng.*, Vol. **42**, No. 5, 1390-1396, May 2003.

8. Shiuan Huei Lin, "Doped PMMA photopolymer for volume holographic recording," *Proceeding of SPIE*, **5206**, 1-6, 2003.
9. Ken Y. Hsu and Shiuan Huei Lin, "Holographic data storage using photopolymer," *Proceeding of SPIE*, **5206**, 142-148, 2003.
10. Shiuan Huei Lin, Ken Y. Hsu, Yu-Chen Lin and Jin-Chern Chiou, "Optical Filter Module for Wavelength Multiplexer using Localized Volume Holographic Gratings," *J. Opt. Memory & Neural Networks*, 12, No. 3, 157-164, 2003.
11. Yi-Nan Hsiao, Wha-Tzong Whang and Shiuan Huei Lin, "Analyses on Physical Mechanism of Holographic Recording in Phenanthrenquinone doped Poly(methyl methacrylate) Hybrid Materials," *Optical Engineering*, Vol. 43, Issue 9, pp. 1993-2002, 2004.
12. S. H. Lin, and Ken Y. Hsu, "Optical wavelength add/drop multiplexer using localized volume holographic gratings," *Technical Digest*, **OWD7-1**, pp108-110, OSA Topical Meeting: 2001 Optics in computing, January 9-11, 2001, Lake Tahoe, Nevada, USA
13. A.K. Zaitsev, S. H. Lin, K.Y. Hsu, "Anisotropic diffraction of light by volume holographic grating in birefringent photorefractive crystals with extended wavelength range," *Workshop on Trends and Challenges in Photonic Science and Technology for the 21st Century*, Taiwan, C008, p.107, May 23-24, 2001, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan.
14. Alexei K. Zajtsev, S. H. Lin, and Ken Y. Hsu, "Creation of weighted volume grating by holographic method," *Technical Digest Vol. II*, pp. 262-263, CLEO/Pacific Rim 2001, **P2-17**, 15-19 July, 2001, Chiba, Japan.
15. Ken Y. Hsu, and S. H. Lin, "Holographic memory for optical interconnections," (invited paper) *Technical Digest Vol. II*, pp. 694-695, CLEO/Pacific Rim 2001, **ThI3-1**, 15-19 July, 2001, Chiba, Japan..
16. S. H. Lin, and Ken Y. Hsu, "Wavelength add/drop multiplexer for optical communication using volume holographic gratings," (invited paper) *Proceedings*, pp. 475, Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) 2001, July 18-22, 2001, Osaka, Japan.
17. 吳明郎, 許根玉, 林烜輝, "雙重曝光全像干涉量測光感高分子材料之探討," 2001 台灣光電科技研討會, **TE1-6**, pp.290-291, December 12-14, 2001, 高雄, 台灣.
18. Ken Yuh Hsu, S. H. Lin and Mang L. Wu, "Double-exposure Interferometry for measuring shrinkage of polymer materials," *Proceeding*, pp. 264-266, paper PTuA6, Topical Meeting on Optics in Computing, April 8-11, 2002, Grand Hotel, Taipei, Taiwan.
19. Shiuan Huei Lin and Jung Tim Lin, "Analysis of a concave grating using Rowland circle approximation," *Proceeding*, Topical Meeting on Optics in Computing, April 8-11, 2002, Grand Hotel, Taipei, Taiwan.
20. Alexei K. Zaitsev, Shiuan H. Lin and Ken Y. Hsu, "Extension of wavelength range by anisotropic diffraction of light on volume holographic grating in BaTiO₃ photorefractive crystal," *Proceeding*, pp. 170-172, paper OWB6, Topical Meeting on Optics in Computing, April 8-11, 2002, Grand Hotel, Taipei, Taiwan.
21. Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Wavelength add/drop multiplexer using volume holographic gratings and micro-mirror arrays," *International Workshop on Optical Display and Information Processing*, pp. 293-294, Paper OP20, May 15-16, 2002, Gyeongju, Korea.
22. Ken Y. Hsu and Shiuan Huei Lin, "Volume holograms for optical interconnections," (invited paper) *International Workshop on Optical Display and Information Processing*, pp. 71-93, May 15-16, 2002, Gyeongju, Korea.
23. Ken Y. Hsu and Shiuan Huei Lin, "Volume holograms for optical interconnections," paper 423, *ICO 19th General Congress*, August 25-30, 2002, Florence, Italy.
24. Shiuan Huei Lin, Ken Y. Hsu, Yi-nan Hsiao, and Wha-Tzong Whang, "Quinone-based molecules doped poly(methyl methacrylate) photopolymer for volume holographic data

storage,” (invited paper) Optical Information Processing Technology, Photonics Asia, October 14-18, 2002, Shanghai, China.

25. Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, “Volume holographic gratings for optical filters,” (invited paper) paper TS01, 3rd International Conference on Photonics Design and Fabrication (ODF2002), October 30-November 1, 2002, Tokyo, Japan.
26. June-Hua Lin, Shiuan-Huei Lin, and Ken Y. Hsu, “Fabrication of PQ/PMMA photopolymer materials”, Paper FD4-5, 475-477, Vol. II, Proceeding, Optics and Photonics Taiwan’02, December 12-13, 2002, Taipei.
27. 劉建成、林烜輝, “全像元件製作平面積體化光學傅氏轉換系統的探討”, Paper FC2-3, 185-187, Vol. II, Proceeding, Proceeding Optics and Photonics Taiwan’02, December 12-13, 2002, Taipei.
28. 蔡宏璋, 林烜輝, “串接式布拉格反射鏡用於窄頻寬濾波器研製之研究”, Paper FC2-5, 191-193, Vol. II, Proceeding, Optics and Photonics Taiwan’02, December 12-13, 2002, Taipei.
29. June-Hua Lin, David Shaw, Shiuan-Huei Lin, and Ken Y. Hsu, “Research on fabrication of PQ:PMMA photopolymer,” CLEO/Pacific Rim 2003, IEEE Catalog Number 03TH8671, 377, 2003.
30. Shiuan Huei Lin, “ Doped PMMA photopolymer for volume holographic recording”, (Invited paper) 48th SPIE Annual Meeting, August 4-11, San Diego, 2003.
31. Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, “PQ:PMMA photopolymer for volume holographic recording”, (Invited paper) Ninth International Conference on Photorefractive Effects, Materials, and Devices, La Colle sur Loup, Nice, France, June 17 - June 21, 2003.
32. June-Hua Lin, David Shaw, Shiuan-Huei Lin, and Ken Y. Hsu, “Research on preparation of photopolymer,” CLEO/Pacific Rim 2003, Taipei, July 22-26, 2003.
33. 張博宇、林烜輝、謝美莉, "Holographic Data Storage on A Photopolymer Disk", Paper TF2-1, **Optics and Photonics Taiwan '03**, Taipei, Taiwan, Dec. 25, 2003.