

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

# 結案報告

光折變體積全像之研製及其應用研究  
Investigations on Photorefractive Volume Hologram  
and its Applications

計畫類別： 個別型計畫       整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2215-E-009-034-

NSC 95-2221-E-009-294-

NSC 96-2221-E-009-066-

執行期間： 94 年 8 月 1 日至 97 年 7 月 31 日

計畫主持人：許根玉      國立交通大學光電工程系及研究所

共同主持人：林烜輝      國立交通大學電子物理系

計畫參與人員：劉仁崇(博士生)      國立交通大學光電工程研究所

藍義勝(博士生)      國立交通大學光電工程研究所

陳立偉(碩士生)      國立交通大學光電工程研究所

曾士沅(碩士生)      國立交通大學光電工程研究所

何啟新(碩士生)      國立交通大學光電工程研究所

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：

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

執行單位：國立交通大學光電工程系及研究所

中 華 民 國 97 年 10 月 30 日

## 一、中英文摘要

本計劃旨在探索光折變體積全像的新穎記錄材料、體積全像光柵之設計製作，以及其在光資訊處理之應用。

在體積光柵記錄材料方面，目標是研發適合於以雙波長方式記錄的非揮發性(Non-volatile)體積全像記錄材料，使得全像記憶不會被讀取光洗除。我們將以鈹系列(Sillenite)光折變晶體為探索的主要對象，包含鈹酸鈹 ( $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ，簡稱為 BTO)、矽酸鈹 ( $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ，簡稱為 BSO) 及鍺酸鈹 ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ，簡稱為 BGO) 等晶體。因為這系列晶體具有良好的電光特性，載子遷移率快、反應速度快，而且其價帶能隙達 3.2 電子伏特，容易藉由摻雜而在導電帶與價帶之間產生一些雜質能階，來改變光折變性質，以塑造吾人所需的非揮發性體積全像記錄性能。在摻雜元素方面，我們打算單摻、雙摻或多摻過渡及稀土元素，包含 Ru、V、Co、Fe、Mn、Rh、Pd、Os、Ir 等。

為了分析晶體之全像光學性質以及指導新晶體之設計與改良工作，我們將以 Kukhtarev 光折變模型為基礎，加上載子在多雜質能階之間的光激發與傳輸動態行為，來推導光折變材料的雙波長全像記錄方程式，以理論模型及實驗驗證，來求取晶體優化參數。

在體積全像的應用方面，將致力於推導體積全像光柵之脈衝函數，據以建立全像光學連線、全像儲存及全像濾波的設計公式，並以實驗驗證之。同時將以多頻道體積全像濾波光柵來研發拉曼光譜濾波器，探索生醫檢測之潛力。

**關鍵詞：**全像光學、體積全像光柵、光資訊儲存、光資訊處理、光折變光學。

### Abstract

The goal of this investigation is to explore new photorefractive crystals for non-volatile volume holographic recording and its applications for optical information processing. Both theoretical and experimental studies will be performed in this project.

We propose to investigate sillenite photorefractive crystals, including  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (BTO)、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO), and  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO). The advantages of sillenite crystals include wide transmission window (0.4  $\mu\text{m}$  -6  $\mu\text{m}$ ), high carrier mobility and high photosensitivity, and thus fast response time. This is especially useful for dynamic holography and real-time information processing. Most important, the bandgap for these crystals is so wide ( $E_G = 3.2\text{eV}$ ), which facilitates doping of various impurity elements into the structure during crystal growth. Thus, the photorefractive properties of the crystals can be modified and improved by proper creation of impurity levels within the bandgap. The impurity elements that will be added during crystal growth include transition elements such as R, V, Co, Fe, Mn, Rh, Pd, Os and Ir.

In order to analyze and guide the exploration of new crystals, we plan to establish a model for non-volatile holographic recording via two-wavelength recording procedure in photorefractive crystals. It will be derived based on the Kukhtarev model taking into account the dynamic behavior of charge carriers among multiple-impurity levels in the crystal. Optical parameters are to be obtained and anticipated to provide a guide for designing new crystals.

For the applications of non-volatile volume holograms, the impulse response of volume holographic grating will be derived. By suitable approximation, it will be transformed to a designing formula for applications in holographic storage, optical interconnects, and spectral filtering, respectively. Experiments for these applications will be conducted. And a high resolution spectral filter will be fabricated to form a Raman Spectrometer for the application of biosensing.

The holographic recording materials and theoretical results that will be developed in this research will provide as fundamentals for holographic information processing by using volume holograms.

**Keywords :** Holography, Volume holograms, Holographic data storage, Optical information processing, Photorefractive crystals.

## 二、報告內容

### 2.1 計畫之背景及目的：

本研究計畫係承接本研究團隊多年的研究之成果基礎以及學術研究興趣，計劃在體積全像材料以及其在資訊處理之應用，進行延續性之研究，而這也正好因應了本世紀光資訊科技發展所需之關鍵技術之一。分述如下：

- (1)體積全像光柵與光資訊處理/光學連線：發展可讀寫之體積全像材料再加上體積全像光柵的設計製作技術不僅可促進創新光通訊及光儲存技術，而且在光資訊處理及高速光資訊網路方面也將帶動新的研究。吾人之前的研究已經驗證，體積全像光柵將在高速光學連線扮演重要角色。實驗結果顯示：若以體積全像光柵進行晶片與晶片之間或模板與模板之間的光學連線，以 VCSEL 為信號發射器，光偵測器為信號接收器，則發射器之密度可為 26,000 頻道/cm<sup>2</sup>，而光偵測器密度可為 10<sup>6</sup> 頻道/cm<sup>2</sup>，若每個發射器對應 100 個光柵頻道，則連線密度可達 26000x10<sup>2</sup>=2.6x10<sup>6</sup> 連線/cm<sup>2</sup>，設 VCSEL 開關速度為 10ns，則理想上若所有發射器同時點亮，而且每一個光元都發出信號傳到每一個光偵測器，則連線速度相當於每秒 2.6x10<sup>20</sup> 個接點。這個方法提供兆位元資訊處理所需計算連線的一種可能性，但其中的關鍵在於如何產生良好的光學連線之體積光柵，因此，本計劃擬利用新型的光折變晶體動態記錄這個連線全像，進而與其他元件整合成為計算連線模組。
- (2)體積全像光柵與光資訊儲存：全像光學具備平行讀取的本性，一束讀取光同時重建整頁之資訊，所以讀取速度輕易達到每秒 100MB 以上，而容量也可達 TB 之量級，因此被視為兆位元資訊儲存的新興技術。本實驗室之前已經以理論及光學實驗驗證全像光學儲存之可行性，目前的瓶頸乃是缺乏可用之全像記錄材料，這個材料要有好的感光靈敏度、大的記錄容量，並且能長久保持記錄資料且不會被讀取光照射洗除。在這個目標上，我們研究的鉍系列光折變晶體顯示出雙波長記錄性能，有潛力成為讀寫之體積全像材料，因此，本計劃擬在這個方向上繼續探索。
- (3)體積全像光柵與生醫感測：生醫光電是本世紀重要科技項目之一，其應用包含感測、處理、與治療。在感測方面除了各式顯微取像技術，以及斷層掃描造影術之外，主要是藉助光與生物細胞或組織的交互作用來量測光譜變化，進而達到診測病灶的效果。這種方法由於具有非侵入式和快速感測的特點，而特別具有發展價值。而本技術中，最具關鍵性的元件應是光譜分析器件，亦即，如何把光與組織細胞交互作用之後的光譜變化分辨出來？這需要高解析度的譜線分析裝置。體積全像光柵正是具有高解析度、高能量效率，以及多點平行輸入、多點輸出的多頻道頻譜分析功能，這將是研製體積精緻、性能優越的生醫光譜分析儀器所不可缺少的器件。

### 2.2 研究方法

根據上述的研究背景及目的，本計劃的研究題目包括兩大項目：(1)光折變晶體之研製、測量及改進；(2)體積全像光柵的設計、製作、量測及光資訊處理應用。在三年的研究期間，我們將以理論推導、電腦模擬及光學實驗三個方式交叉進行之。分述如下：

#### (1)光折變晶體之研製、測量及改進：

理論方面，將推導摻雜質造成多雜質能階的光折變晶體模型，並與實驗驗證，以作為設計新晶體之基礎。這種多雜質能階的光折變晶體的全像光學行為，以 Kukhtarea 方程式為出發點來推導一般性之公式，希望由此獲得設計新晶體的啟示。至於新晶體的生長製作，我們打算跟保加利亞科學院晶體生長研究所進行合作，將我們的全像光學背景跟他們的晶體生長技術搭配起來，期望取得好成果。

實驗方面，我們打算以鉍系列的光折變晶體為主，包含鈦酸鉍 (Bi<sub>12</sub>TiO<sub>20</sub>, BTO)、矽酸鉍(Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>)、及鍺酸鉍(Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, BGO)，在這些晶體中摻雜過渡元素(Ru, V, Co, Co+V, Fe, Mn, Fe+Mn, Rh, Pd, Os, Ir 等)來探索新的晶體材料。研究此類晶體的原因是它比其他的光折變晶體有較大的能隙 (E<sub>g</sub> = 3.2 eV)，這表示我們較容易藉由摻雜而產生雜質能階來改變它們的光折變性質，有利於吾人設計新的晶體。另外，它們的載子移動率很快，因此反應速度快 (約為 LiNbO<sub>3</sub> 晶體 10<sup>3</sup> 倍快)，適合用於快速的光折變反應 (例如動態光學連線，影像處理)。我們的具體做法是，藉由摻雜不同濃度的過渡金屬元素生長晶體，然後量測其光學與全像記錄行為，跟理論模型比較，同時修改模型，改變摻雜濃度，再生長第

二批晶體來量測、修改、優化；直到得到穩定的結果為止。在晶體光學性質方面，主要進行三項量測實驗：(1) 穿透光譜，(2) 暗電導率，(3) 光電導率。而得到晶體內部雜質能階位置的定量分析。然後進行雙波長全像實驗，以短波長雷射激發載子來將晶體敏感化，長波長雷射來記錄及讀取全像光柵，量測全像光柵之繞射效率，然後配合理論模型，找出最佳的晶體參數及光學操作參數，以供體積全像資訊儲存及處理使用。體積全像的量測方法是以標準的雙波混合裝置，由兩道光干涉記錄光柵在晶體中，以第三道光由布拉格角度入射即時量測光柵的繞射效率。

(2) 體積全像光柵的設計、製作、量測及光資訊處理應用方面：

我們計劃探索之光學系統有三個，一體積全像儲存，二是電路板之間的自由空間 3D 連線，三是生醫感測用的 Raman 濾波器。

體積全像儲存方面將繼續我們以往的實驗工作，配以新研發的雙波長晶體材料，以建立動態寫入/讀出/修改之非揮發性資訊記憶為主。

3D 連線也是延續相同的研究軌跡。過去我們已經對這個問題以數值求解分析，並以感光高分子材料及鈮酸鋰晶體並以氬氣雷射驗證，顯示原理之可行性。關鍵是需要一個體積塊材型式的全像記錄材料，它可以容納許多光學連線以多工方式把許多全像光柵記錄在同一塊記錄材料之中，而且這個體積光柵資訊必須能夠持久保真，重複讀取而不會被洗除，一直到我們需要修改資訊為止。因此，這是一種非揮發性記憶體(non-volatile storage)。本計劃擬研製之雙波長全像記錄材料正好符合此需求，將以實驗配合進行之。

在生醫檢測之應用方面，我們將研製一個體積光柵濾波器，作為偵測或標定光譜之元件。如前面背景資料所述，光濾波器乃是波譜生醫感測的基本元件，我們將以拉曼光譜感測為研究目標。原因是設計感測系統需要知道信號產生及輸入型式（包括空間及時間分佈），而我們跟美國 Duke 大學光電中心已經有初步合作構想，由他們提供拉曼光譜感測之生醫系統圖，而我們針對光學信號型式而設計並製作體積全像元件，再交由 Duke 大學進行實驗甚至臨床實驗。在本計劃中我們將以現有晶體進行雙波長記錄實驗，並且針對特定組織之拉曼感測去推導出寫入/讀出波長不同之下的脈衝響應，並進行驗證。將來在計劃進行過程中，我們會隨晶體材料之改進而改進之。

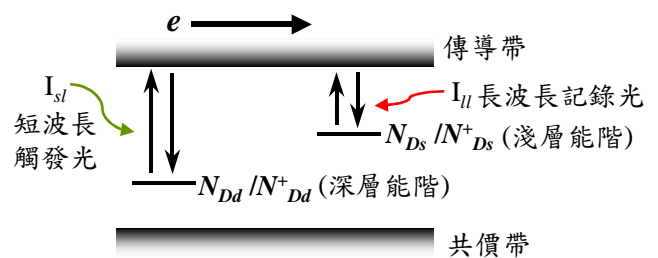
### 2.3 結果與討論

各項工作均按規劃的進度執行，著重光折變晶體的製成及各項光學特性實驗量測，來決定其工作參數，並進行多雜質能階之光折變晶體作雙波長全像記錄之模型推導與電腦模擬，以利未來進一步將材料用於光資訊儲存應用。另外，我們也利用感光高分子塊材進行體積全像儲存各項應用之研究，結果可讓我們清楚了解到體積全像用於這些應用的特性。詳細計劃之進行步驟及相關成果討論，說明如下：

首先，在光折變晶體的製成及各項光學特性實驗量測方面：

(1). 鈹系列光折變晶體的『雙能階能帶躍遷光折變模型』理論分析

『雙能階能帶躍遷光折變非線性光學模型』的概念與 Kukhtarev 在 1979 年提出『單能階式光折變效應模型』類似，不同的是我們將在其模型中加入另一個深層施體/受體能階，以及另一道高能量記錄觸發光來對光折變效應重新探討，晶體能帶分佈示意圖如圖一所示。定性來說，這樣的模型將導引晶體內有兩個光柵記錄，分別對應淺層能階與深層能階。基本的模型可以寫成下列光折變效應耦合方程式：



圖一 雙能階光折變晶體能帶分佈示意圖

$$\frac{\partial N_{Dd}^+}{\partial t} = (s_{d,sl} I_{sl} + \beta_d)(N_{Dd} - N_{Dd}^+) - \gamma_d N_{Dd}^+ N$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_{D_s}^+}{\partial t} &= (s_{s,ll}I_{ll} + s_{s,sl}I_{sl} + \beta_s)(N_{D_s} - N_{D_s}^+) - \gamma_s N_{D_s}^+ N \\ \frac{\partial N}{\partial t} &= \frac{\partial N_{D_s}^+}{\partial t} + \frac{\partial N_{D_d}^+}{\partial t} + \frac{1}{e} \frac{\partial J}{\partial x} \\ J &= e\mu NE + k_B T \mu \frac{\partial N}{\partial x} + \left[ \begin{aligned} &(p_{s,ll}I_{ll} + p_{s,sl}I_{sl})(N_{D_s} - N_{D_s}^+) \\ &+ (p_{d,sl}I_{sl})(N_{D_d} - N_{D_d}^+) \end{aligned} \right] \\ \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} &= e(N_{D_s}^+ + N_{D_d}^+ - N_A - N)\end{aligned}$$

其中，所有參數符號代表的意義均列在表一。若我們假設低能量記錄光  $I_{ll}$  為低調制比，高能量觸發光  $I_{sl}$  為平面光波，這個模型將可以線性近似分別寫出與均勻光照相關的 DC 項、以及與調制光照對應的 AC 解，分別以記錄過程、顯影過程、以及洗除過程分列如下：

(a). 記錄過程：我們以平面光波的高能量觸發光  $I_{sl}$  以及低能量紀錄干涉光波  $I_{ll}$  來寫入光折變光柵，亦即  $I_{sl} = I_{slo}$ ,  $I_{ll} = I_{llo} + \text{Re}\{I_{ll1} \exp(-iKx)\}$ ，DC 解為：

$$\begin{aligned}N_{Dd0}^+ &= \frac{N_A}{2} + \frac{G_d \gamma_s N_{Dd} + G_s \gamma_d N_{D_s}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} \\ &\quad - \frac{\sqrt{[G_d \gamma_s (N_{Dd} + N_A) + G_s \gamma_d (N_{D_s} - N_A)]^2 - 4(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d) G_d \gamma_s N_{Dd} N_A}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} \\ N_{D_s0}^+ &= \frac{N_A}{2} - \frac{G_d \gamma_s N_{Dd} + G_s \gamma_d N_{D_s}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} \\ &\quad + \frac{\sqrt{[G_d \gamma_s (N_{Dd} + N_A) + G_s \gamma_d (N_{D_s} - N_A)]^2 - 4(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d) G_d \gamma_s N_{Dd} N_A}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} \\ N_0 &= \frac{G_d (N_{Dd} - N_{Dd0}^+) + G_s (N_{D_s} - N_{D_s0}^+)}{\gamma_d N_{Dd0}^+ + \gamma_s N_{D_s0}^+} \\ N_{Dd0}^+ + N_{D_s0}^+ &= N_A\end{aligned}$$

其中， $G_d = s_{d,sl}I_{slo} + \beta_d$ ， $G_s = s_{s,ll}I_{llo} + s_{s,sl}I_{slo} + \beta_s$ ，將這些 DC 項代入原方程式中，可解出 AC 項為：

$$\begin{aligned}E_{sc} &= \frac{ie}{\varepsilon K} (N_{D_s1}^+ + N_{Dd1}^+) \\ &= \frac{ie}{\varepsilon K} \left\{ \begin{aligned} &\left[ -(c+f)\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \left( \frac{(a-b)f + (e-d)c}{ae-bd} + (c+f)\tau_1 \right) \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \\ &- \left[ \frac{\tau_{21}}{\tau_1 - \tau_2} \left( \frac{(a-b)f + (e-d)c}{ae-bd} + (c+f)\tau_1 \right) \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \frac{(b-a)f + (d-e)c}{ae-bd} \end{aligned} \right\} \\ \tau_1 &= -\frac{2}{(a+e) + \sqrt{(a+e)^2 - 4(ae-bd)}} \\ \tau_2 &= -\frac{2}{(a+e) - \sqrt{(a+e)^2 - 4(ae-bd)}}\end{aligned}$$

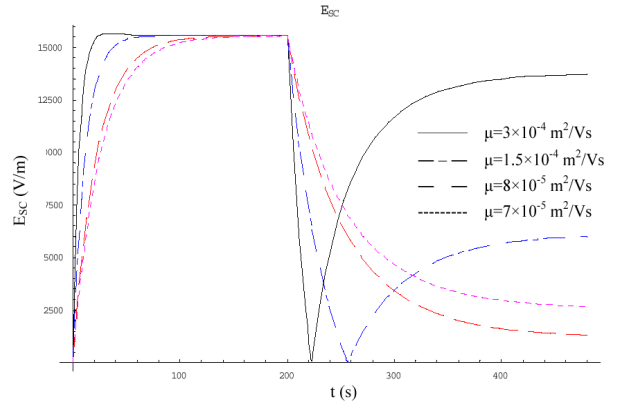
其中所有參數符號代表的意義均列在表二。從式中，我們可以看到分別有兩個時間常數  $\tau_1$  及  $\tau_2$  來導引光柵的形成，其牽涉到淺層能階與深層能階的光柵形成速率，藉由電腦模擬並代入適當的晶體參數，我們即可得到光柵的記錄過程之動態反應，舉例來說：以 BSO 晶體的參數，可令  $N_d = 3.8 \times 10^{23} (m^{-3})$ 、 $N_s = 2.5 \times 10^{24} (m^{-3})$ 、 $N_A = 2.652 \times 10^{24} (m^{-3})$ 、 $I_{llo} = 100 mW/cm^2$ 、 $I_{sl} = 1 W/cm^2$  ... 等等參數值代入上式，即可得到如圖二中記錄動態過

程。其中，我們假設晶體內的電子漂移率 $\mu$ 為變數，來看在高漂移率時雙能階記錄的特性，因為 BSO 晶體不同於鋰酸鋁晶體，有很大的電子漂移率。圖中，我們可以看到，漂移率只對記錄速度有影響，而對飽和值影響不大。當然可以想見的是，記錄飽和值將會是晶體其他參數的函數，這個理論模型就可作為參數最佳化分析之基礎。

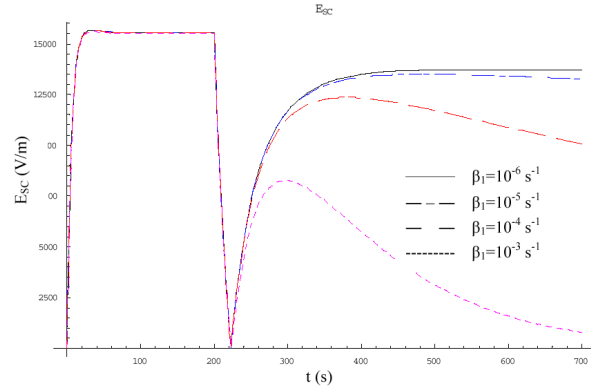
(b).顯影過程：我們關閉高能量觸發光  $I_{sl}$ ，只以低能量記錄平面光波  $I_{ll}$  來顯現不會消失的光折變光柵強度，亦即  $I_{sl}=0, I_{ll}=I_{ll0}$ ，此時因光的能量較低，DC 項的建立時間很長，必須考慮暫態過程，其解如下：

$$\begin{aligned} N_{D_{s0}}^+(t) &= N_{D_s} + [N_{D_{s0}}^+(t=0) - N_{D_s}] \exp(-t/\tau) \\ N_{D_{d0}}^+(t) &= (N_A - N_{D_s}) - [N_{D_{s0}}^+(t=0) - N_{D_s}] \exp(-t/\tau) \\ N_0(t) &= \frac{(s_{s,ll} I_{ll0} + \beta_s)(N_{D_s} - N_{D_{s0}}^+(t))}{\gamma_d N_{D_{d0}}^+(t) + \gamma_s N_{D_{s0}}^+(t)} \\ \tau &= \frac{\gamma_d (N_A - N_{D_s}) + \gamma_s N_{D_s}}{\gamma_d (N_A - N_{D_s})(s_{s,ll} I_{ll0} + \beta_s)} \end{aligned}$$

將這些解代入原方程式中，我們會發現其在記錄過程所定義的  $a, b, c, d, e, f$  參數將為與時間有關的動態數值，因此無法得到一個 AC 項的解析解，必須使用數值方法解之，我們將記錄過程所用的參數代入，並以其結束時的 AC 項數值當作顯影過程的起始值，即可得到如圖二中所示的顯影的動態過程，可以看到光柵最後會穩定殘存。圖中，我們可以看到，漂移率只對定影速率及最後的穩定值均有影響，而且當其增加到某值以上時，甚至產生深能階的光柵與淺能階光柵相位相反的情形，所以定影時光柵會產生先消失再增加的現象。然而，圖二中我們假設深能階的熱效應為零(意即： $\beta_d=0$ )，所以定影過程深能階光柵不受熱影響，光柵最後會穩定殘存，這有時候與真實 BSO 晶體參數不符，因為其為快速反應且對紅光敏感的晶體，表示雜質能階較淺，熱對晶體有較大影響不可忽略。若我們採與圖二相同的參數，但對不同的  $\beta_d$  做計算時，可以得到如圖三所示的結果。圖中，我們可以看到定影過程光柵無法殘存，換言之，一旦深能階的熱效應不為零時，我們無法利用雙能階定影技術，在 BSO 晶體中記錄非揮發性的光折變光柵。



圖二 雙能階光定影之記錄與顯影過程



圖三 雙能階光定影之記錄與顯影過程

(c).洗除過程：我們重新用高能量觸發光  $I_{sl}$  來洗除光柵，關閉低能量記錄光波  $I_{ll}$ ，亦即  $I_{sl}=I_{slo}, I_{ll}=0$ ，同時  $c=f=0$ ，解為：

$$\begin{aligned} E_{sc} &= \frac{ie}{\epsilon K} (N_{D_{s1}}^+ + N_{D_{d1}}^+) \\ &\approx \frac{ie}{\epsilon K} \left\{ \frac{N_{D_d}^+(df)}{r_+ - r_-} [(a - r_-) \exp(r_+ t) + (r_+ - a) \exp(r_- t)] \right\} \end{aligned}$$

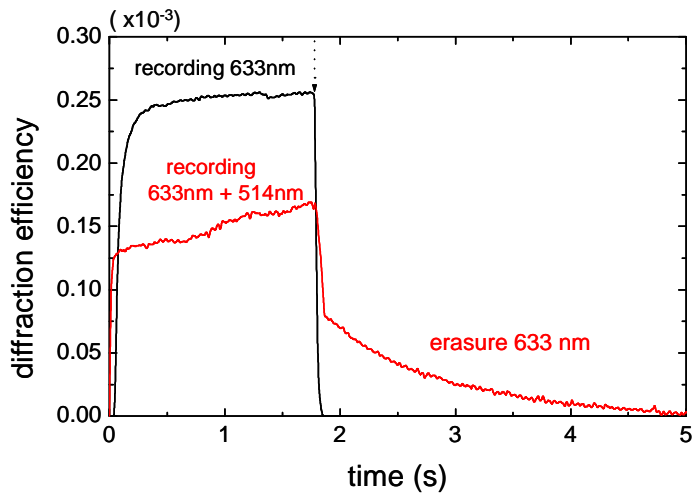
其中， $N_{D_d}^+(df)$  代表深層能階光柵在顯影過程中形成的最終強度。從式中，我們同樣可以看到有兩個時間常數  $r_+$  及  $r_-$  來導引光柵的洗除，其牽涉到淺層能階與深層能階的光柵消失

速率，當時間趨近於無窮時所有光柵均會消失。這個光折變非線性光學模型將可讓我們更廣泛的來分析光折變非線性光學效應。

在解的過程中，我們可以發現到雙能階的光折變效應會受到能階彼此間相互影響甚鉅，而一般來說，對於光折變晶體能階的形成可由摻雜雜質及其濃度來決定。因此，我們可以透過理論的分析，來進一步的了解這種新穎的光折變非線性光學效應，並且可以藉助電腦模擬及分析，讓我們去設計我們應用所需的光折變非線性光學晶體，如：摻雜雜質種類及濃度比、熱處理及溫度效應的條件、光觸發效應的光強度、以及晶體的軸向與幾何結構...等等參數，並且對光折變效應作優化的分析。

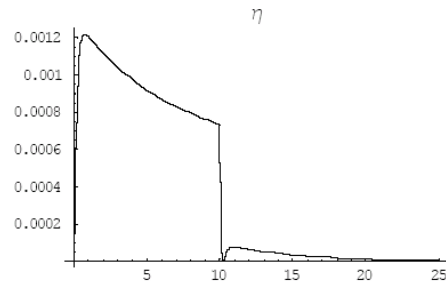
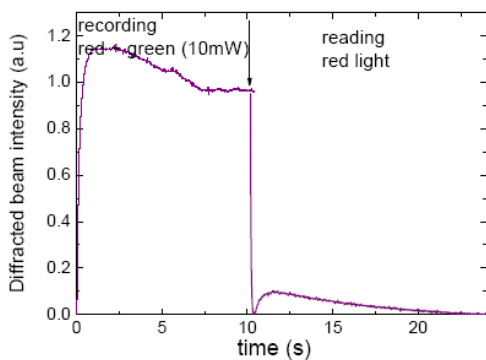
(d).光折變晶體雙波長全像記錄實驗量測：

理論分析十分成功，其次進行 Ru 摻雜之 BTO 及 Al+Co 雙摻 BSO 光折變晶體的實驗量測，來與理論的分析互相應証。我們以典型的二波混合之裝置，測量這兩種晶體的全像記錄特性，因為實驗證實這兩種晶體均具有成理論分析中所需的深淺雜質能階，形成多能階的光折變效應。故，本研究中我們特別強調多能階所造成雙波長記錄的情形。因為當短波長均勻光照在晶體時，其對應之雜質能階上的載子將受到入射光子的激發而轉移到傳導帶，而被淺能階的空軌域捕捉影響電子的分佈，同時，我們引入長波長干涉調制光寫入光柵，亮區將激發大量的載子至導電帶，而被深的空軌域捕捉，最後在深與淺能階上將形成共軛反向的光柵，若讀取時，我們僅用長波長當作讀取光，則深能階的光柵較不易被洗除，能存在較久的時間，若進一步晶體的熱激發效率很小的話，將能使深能階的光柵定影下來，形成光定影效應。實驗中，我們選取波長為 514nm 的綠光為均勻激發短波長的光源，而以波長為 632nm 的紅光為記錄光源，Ru 摻雜 BTO 晶體的實驗結果如圖四所示，我們可以看到：若只有使用紅光記錄讀取時，光柵會很快的記錄，讀取時也會很快的消失，但是加上綠光的激發時，光柵可以更快的記錄，但讀取時消失的時間可延續的更長。



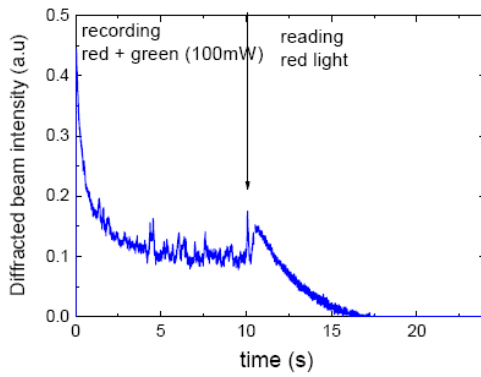
圖四 Ru 摻雜 BTO 晶體之雙波長全像記錄動態實驗曲線圖

另外，Al+Co 摻雜 BSO 晶體的實驗與理論模擬結果如圖五所示，我們可以看到與理論分析相同的光折變全像記錄趨勢，當使用雙波長記錄時，因為 BSO 晶體中電子漂移率較大，反向較強的淺能階光柵洗除後，餘下深能階光柵顯現，但最終由於熱效應的影響，深能階

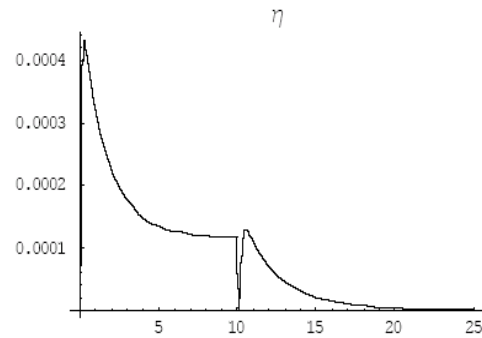


BSO:Co+Al 晶體的雙波長紀錄模擬，使用的參數為  $N_1=1.9 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、 $N_2=1.25 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、 $r_1=2 \times 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $r_2=2 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $S_{11}=1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{J}$ 、 $S_{21}=1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{J}$ 、 $S_{22}=1.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{J}$ 、 $\beta_1=0.04 \text{ s}^{-1}$ 、 $\beta_2=0.04 \text{ s}^{-1}$ 、 $\mu=3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ 、 $I_{10}=100 \text{ W}/\text{m}^2$ 、 $I_{20}=6000 \text{ W}/\text{m}^2$ 、 $m=0.5$ 、 $\theta=15^\circ$ 、 $E_0=0 \text{ (V/m)}$ 。

BSO:Co+Al 晶體的雙波長紀錄，晶體厚度 6mm，寫入光夾角  $30^\circ$ ，寫入光使用 20mW 紅光雷射，激發光如圖示 10mW。



條件同上圖，除激發光為 100mW。



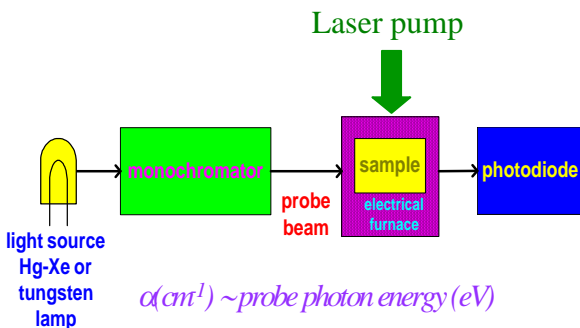
BSO:Co+Al 晶體的雙波長紀錄模擬，除  $I_{10}=1000 \text{ W/m}^2$  外，使用的參數同上。

圖五 Al+Co 摻雜 BSO 晶體的雙波長全像記錄動態實驗與理論模擬結果

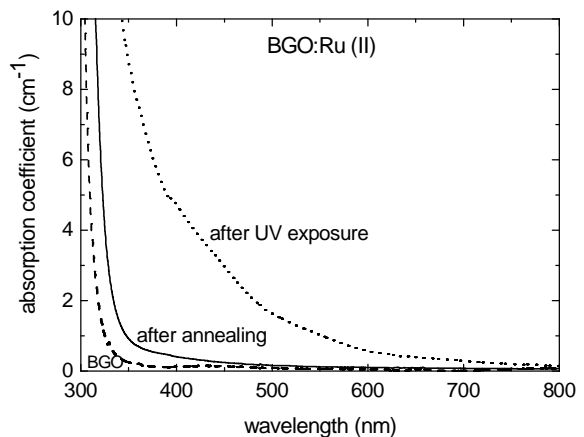
光柵亦會被洗除。實驗中我們改變短波長雷射的強度，也可以看到記錄行為的改變。換言之，這些結果說明：我們的確可以用雙波長來控制多能階的鈹系列晶體之全像記錄特性。若選擇適當的條件來消除深能階的熱效應，此種晶體有可能達成光定影的光折變全像記錄。

(2). 『摻雜過渡金屬的 BGO 光折變晶體』的製作及光學特性的分析：

其次，我們亦進行新型的摻鈦 BGO 光折變晶體的研製與光學特性實驗量測，來決定晶體的各項參數，進一步分析晶體的光折變特性。進行方法及相關成果討論，說明如下：首先，我們建立了一套 UV-IR 單光儀，用來測量材料的穿透及吸收光譜特性。這項量測有兩個重要的特點，其一讓我們了解材料感光反應的範圍，配合短波長光的照射，即可決定晶體是否有光致色變效應，此為多雜質能階晶體特有效應；其二，進一步配合其他導電率量測，可了解光學晶體最基本的光學量測，如：量測不同摻雜濃度晶體的吸收光譜之變化，讓我們了解光折變效應中施體及受體濃度對全像記錄的影響，尋求能階的光激發特性，而求出模擬所需的晶體各項參數。圖七為摻鈦濃度為  $6.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的 BGO 晶體之量測結果，圖中可以看到當晶體受到短波長的光照射時，其吸收會大幅度的增加且範圍會明顯的往紅光(或紅外)偏移，因此可知高摻雜濃度將可引發晶體內淺能階的濃度增加，且受光照時電子將從深能階移到淺能階，引發長波長吸收增加。



圖六 光致變色效應影響量測系統示意

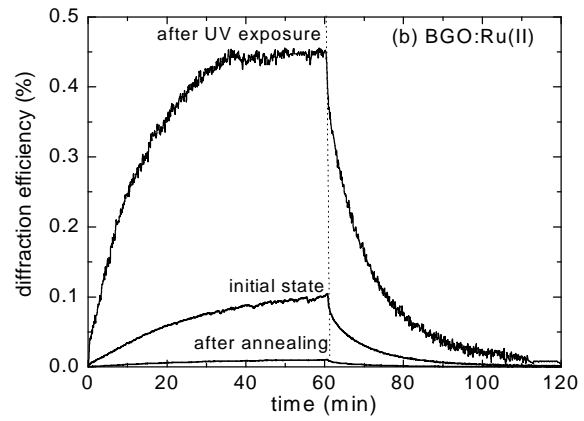


圖七 晶體吸收頻譜量測結果

其次，我們進行晶體的光折變全像記錄實驗。我們以典型的二波混合之裝置，測量這種新型晶體的全像記錄特性，以證實這種晶體具有光折變效應。參考圖七的吸收光譜，其



吸收範圍能橫越到紅光範圍，所以我們以波長為 632nm 的紅光為記錄光源，若能成功記錄，則代表鈦摻雜能在晶體中產生新的淺能階。實驗結果如圖八所示，圖中我們畫出繞射效率與曝光時間關係圖之記錄過程的動態行為，可以看到：此晶體的確可以用紅光來做記錄，且在紫外光曝照後，繞射效率會大幅度增加，這些都表示鈦摻雜能在晶體中產生新的淺能階，而此晶體亦有可能作為光定影的記錄媒體。

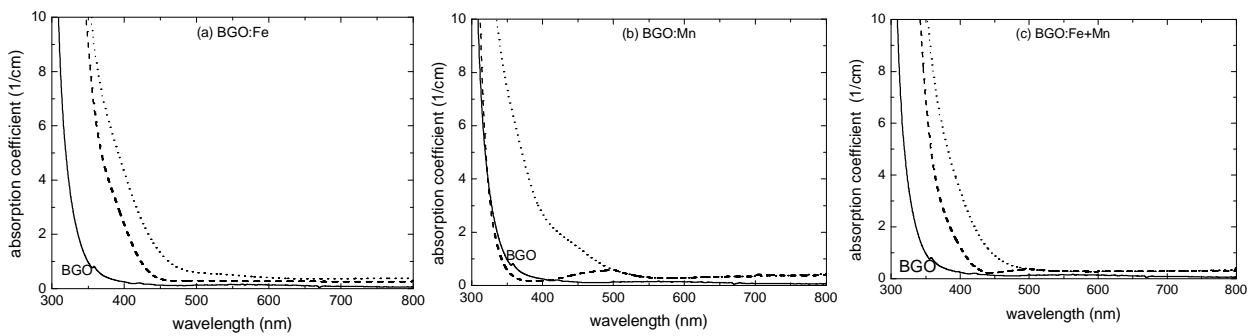


圖八 摻鈦 BGO 光折變晶體全像記錄實驗

另外，我們研製三種新型的摻 Fe+Mn 之 BGO 晶體，其摻雜之濃度如下表所示，並進行這些光學特性實驗量測，來決定晶體的各項參數。進行方法及相關成果討論，說明如下：

首先，我們測量材料的穿透及吸收光譜特性。這項量測有兩個重要的特點，其一讓我們了解材料感光反應的範圍，配合短波長光的照射，即可決定晶體是否有光致色變效應，此為多雜質能階晶體特有效應；其二，進一步配合其他導電率量測，可了解光學晶體最基本的光學量測，如：量測不同摻雜濃度晶體的吸收光譜之變化，讓我們了解光折變效應中施體及受體濃度對全像記錄的影響，尋求能階的光激發特性，而求出模擬所需的晶體各項參數。圖九為表列三種 BGO 晶體之量測結果，圖中可以看到當晶體受到短波長的光照射時，其吸收會大幅度的增加且範圍會明顯的往紅光(或紅外)偏移，因此可知高摻雜濃度將可引發晶體內淺能階的濃度增加，且受光照時電子將從深能階移到淺能階，引發長波長吸收增加。

sample	concentr. (cm <sup>-3</sup> )	$\sigma_t$ ( $\Omega\cdot\text{cm}$ ) <sup>-1</sup>	E <sub>a</sub> (eV)
BGO:Fe	3x10 <sup>18</sup>	5.8 x 10 <sup>-13</sup>	0.32 ± 0.03
BGO:Mn	5x10 <sup>18</sup>	7.9 x 10 <sup>-14</sup>	0.4 ± 0.04
BGO:Fe+Mn	Fe-7x10 <sup>18</sup> Mn-6x10 <sup>17</sup>	9 x 10 <sup>-14</sup>	0.38 ± 0.04



圖九 晶體吸收頻譜量測結果

其次，我們進行晶體的暗導電率量測實驗。我們知道晶體內雜質能階的載子可經由熱或光的激發而游離到傳導帶，造成導電的載子濃度產生改變進而使晶體電導率( $\sigma$ )變化，而我們知道只有當激發能量大於或是等於雜質能階與傳導帶之能隙時，載子才會被游離至傳導帶，因此改變溫度或激發光的波長將會影響晶體的導電特性，故量測不同溫度情況下晶體的電導率可推測出淺能階雜質之位置，換言之，載子的激發只受到熱的作用，我們將其稱為暗電導率(dark conductivity)。在平衡狀態下，傳導帶的電子濃度與雜質能階的電子濃度將滿足波茲曼分佈，且與兩者的能隙 E<sub>a</sub> 以及晶體的溫度 T 有關，故傳導帶的電子密度 n<sub>c</sub> 為

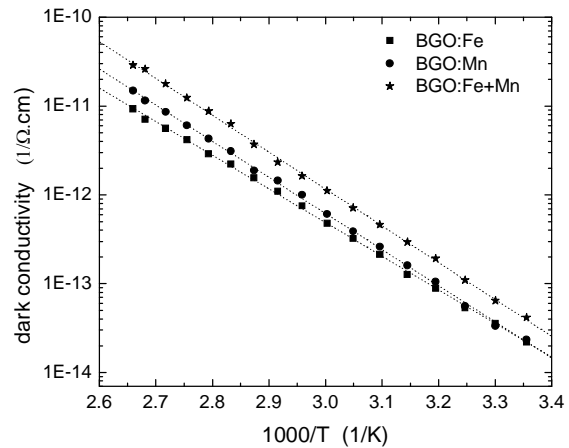
$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \quad (1)$$

其中， $n_0$  為雜質能階上可貢獻的載子總數目(以密度表示)，另外，材料的電導率( $\sigma$ )可表示成：

$$\sigma = q\mu n_e = q\mu n_0 \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \quad (2)$$

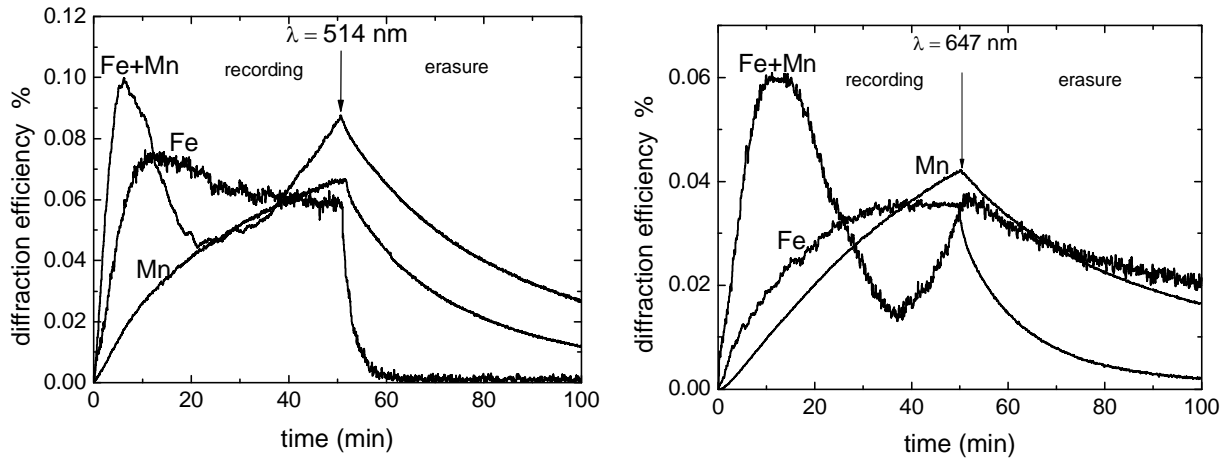
其中， $q$  為電子電量， $\mu$  為電子遷移率， $\sigma_0 = q\mu n_0$  表示電導係數之常數值。從式(2)中我們可以看到  $E_a$  可以表示成載子濃度受溫度影響程度的一個參數，所以又可將  $E_a$  稱為熱活化能。從數學上可以看出： $E_a$  越大，代表電導率受溫度改變的變化率越顯著。換言之，越大的  $E_a$  表示在同樣的溫度下，被熱所激發的載子就越少。相對的，從能帶結構的角度來看熱活化能  $E_a$  就代表在量測溫度的範圍內能階濃度足夠大而可供較多激發載子的能階之位置。原因是：雖然我們知道距離導帶越近的能階上的電子越容易被激發游離，但是那些濃度不夠大而可供游離載子數不夠多的能階是沒有辦法對電導率造成顯著的影響的，而其他較深層能階雖然可能具有足夠濃度，但和導帶能隙差所造成的熱活化能較淺層能階大，而比較不易受到熱激發，所以對電導率的貢獻也比不上淺能階。因此，我們認為暗電導率的量測可讓我們知道淺能階的位置。方法如下：由式(2)的關係可以知道：若在不同溫度下量測晶體的電導率，將所得到的電導率取負的自然對數，再對溫度的倒數做圖，將所得曲線的斜率乘上波茲曼常數  $k_B$ ，就可以得到熱活化能  $E_a$ 。

圖十為實驗量測三種晶體暗電導率與溫度倒數的負對數關係圖。圖中，溫度變化範圍為 25 度到 400 度，在此範圍內我們可以看到曲線近似線性關係而摻雜元素的濃度越大時，曲線的斜率越小，因此，我們可以根據理論分析而推算出各樣品的淺能階位置，分別整理至表 1 的第二欄，我們可以看出摻雜 Fe 或 Mn 元素，能有效的在晶體產生淺能階，其熱活化能以 Fe 元素產生之能階較小，增加 Mn 元素時，能階位置會較深。這代表著隨著摻雜 Mn 元素，晶體產生之淺雜質能階位置也就越遠離傳導帶，換言之，Mn 元素將有效的在晶體中產生較深的能階，同時摻雜 Fe 與 Mn 元素將有效產生深淺多能階光折變晶體。



圖十 晶體暗電導率與溫度的關係

另外，我們也進行三種晶體的光折變實驗量測，來與理論的分析互相應証。我們以典型的二波混合之裝置，以三種不同波長測量晶體的全像記錄特性，因為實驗證實這些晶體均具有產生深淺雜質能階，形成多能階的光折變效應。故，本研究中我們特別強調多能階所造成記錄的情形。因為當短波長照在晶體時，可用晶體中較深層的雜質能階的載子，而較長波長的記錄光則選擇較淺能階的載子，因此，比較這些新型晶體的全像記錄特性，除了可以證實這種晶體具有光折變效應，也可以得到多能階對光折變全像記錄行為的影響。實驗結果如圖十一所示，圖中我們畫出繞射效率與曝光時間關係圖之記錄過程的動態行為，可以看到：此晶體的確可以用產生光折變效應。單純只摻入一種元素時，晶體的記錄行為比較像單一能階的光折變效應，而摻雜 Mn 元素的晶體，明顯的記錄與洗除速度均變慢，代表其能階位在較深層。其次，摻雜兩種元素的晶體，其記錄行為將產生振盪變化，這代表晶體內將產生一個以上的能階，記錄時兩種能階產生的光柵會相互競爭產生繞射效率之振盪，從此看來晶體有可能作為光定影的記錄媒體。

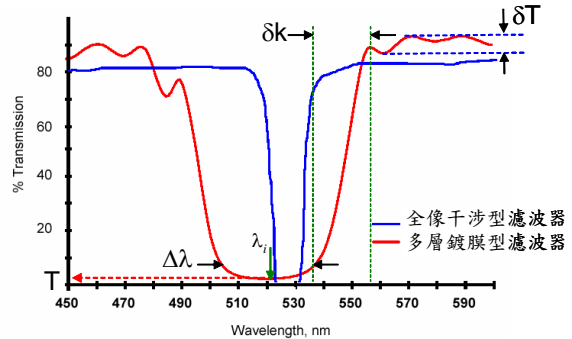


圖十一 光折變晶體全像記錄實驗

體積全像光柵的設計、製作、量測及光資訊處理應用方面，我們進行：

(1). 窄頻寬的光學濾波器的製作及特性分析：

對於體積全像之應用，我們亦進行分析設計一個凹槽型濾波器所要的參考指標參數。圖 4 所示為典型的凹槽型濾波器之穿透光譜特性。它的特點是要把與原入射光相同波長的信號濾掉，只保留兩側的拉曼訊號光。因此，參考圖十二的穿透特性，我們可以定義幾個重要特徵，作為設計與分析此種濾波器的參考指標：(a). 光學密度值 (optical density, OD)：定義為  $OD = -\log T$ ，其中， $T$  為濾波器凹槽穿透截止帶中央的光波穿透率，藉以說明此濾波器的過濾背景光的能力，實際的拉曼濾波器之 OD 值需要大於 4 以上，以有效的濾掉瑞利散射光；(b). 溝槽寬 (notch width,  $\Delta\lambda$ )：定義為濾波器凹槽穿透截止頻帶的頻譜寬，用以說明此濾波器的濾波分辨能力及可觀察到拉曼位移之起始範圍；(c). 過渡帶寬 (transition region,  $\delta k$ )：定義為從截止帶邊緣到穿透率接近 100% 之間的波長差，一般以拉曼光譜分析常用之波數形式來寫， $\delta k = 2\pi/\lambda_R - 2\pi/\lambda_i$ ，單位為  $cm^{-1}$ ，此處， $\lambda_R$  與  $\lambda_i$  分別為散射光及入射光之波長。這個參數在說明實際可用來觀察拉曼位移的起始點之位置；(d). 平坦度 (flatness,  $\delta T$ )：定義為濾波器穿透帶之最大與最小穿透率之差值，用以說明濾波器通過頻帶變化震盪的情形。



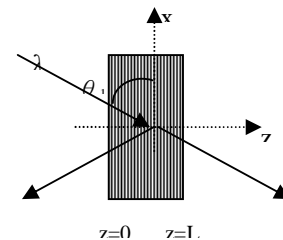
圖十二 典型凹槽型濾波器之穿透光譜特性

以下，我們將利用這四個指標來分析反射式體積全像拉曼濾波器之特性。根據體積全像的耦合波理論 (coupled-wave theory)，圖十三所示的對稱式反射體積全像光柵的繞射效率  $\eta$  可以寫成：

$$\eta = \frac{|\kappa|^2 \sinh^2 sL}{s^2 \cosh^2 sL + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2 \sinh^2 sL} \quad (3)$$

其中， $s^2 = |\kappa|^2 - \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2$  (4)

$$\kappa = \frac{\pi n_1}{\lambda_0 \sin \theta_B}, \quad \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} - \frac{4\pi}{\lambda} n_0 \sin \theta_1 \quad (5)$$



圖十三 對稱反射體積全像光柵

此處， $n_1$  和  $n_0$  分別是折射率的振幅調變和折射率的平均值， $L$  是材料的厚度， $\lambda_0$  是記錄時

所用雷射光的波長， $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$  為讀取光柵時所用之光波長， $\Delta\lambda$  是波長偏離值， $\Lambda$  是光柵週期， $\theta_B$  是在讀取光滿足布拉格條件時的讀取角度，一般稱之為布拉格角度， $\theta_1 = \theta_B + \Delta\theta$  為讀取光任意入射角， $\Delta\theta$  定義為讀取光角度與布拉格角的差值， $\Delta\beta$  為讀取光音波長或角度不符合時，所提供的相位偏差值，當  $\theta_1 = \theta_B$  且入射光的波長  $\lambda = \lambda_0$ ，此時  $\Delta\beta = 0$ ，光柵的繞射效率會是最大值，這個條件將給我們濾波器的 OD 值，表示如下：

$$OD = -\log(1 - \eta) = -\log(1 - \tanh^2 \kappa L) \quad (6)$$

當  $\theta_1 \neq \theta_B$  或  $\lambda \neq \lambda_0$  時，則  $\Delta\beta \neq 0$ ，光柵的繞射效率將會變小，通常我們定義  $|\Delta\beta| < 2\kappa$  為此反射體積光柵的截止頻帶，所以濾波器的溝槽寬可以寫成：

$$\Delta\lambda = 2 \frac{\kappa \Lambda}{\pi} \lambda_0, \text{ 此時帶寬邊緣對應光柵之繞射效率為：} \eta = \frac{|\kappa L|^2}{1 + |\kappa L|^2} \quad (7)$$

當  $\Delta\beta$  繼續增加時，光柵繞射效率將會呈現震盪變化，其零點發生在  $\Delta\beta < 2\sqrt{\kappa^2 + (m\pi/L)^2}$  (此處， $m$  為整數)。通常，接近截止帶附近，光柵反射率或有很強的震盪，因此，為了減少濾波器穿透帶的震盪，我們可以定義  $m=8$  以上為濾波器可以適用的起始頻譜點，所以濾波器之過渡帶寬可以寫成：

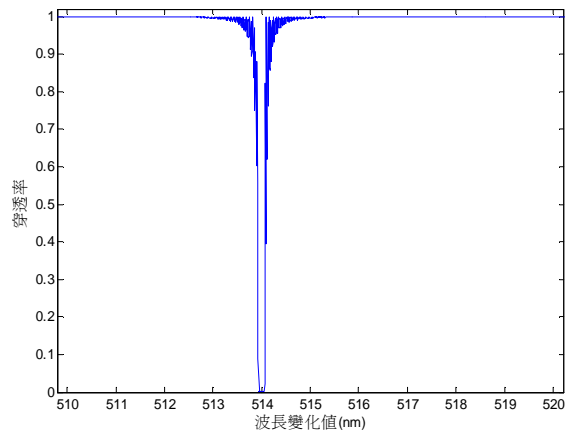
$$\delta k = \frac{2\Lambda}{\lambda_0} \left( \sqrt{\kappa^2 + \frac{100\pi^2}{L^2}} - \kappa \right) \quad (8)$$

另外，利用這些規範，此反射體積全像拉曼濾波器的平坦度可以寫成：

$$\delta T = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + 72.25\pi^2 / L^2} \quad (9)$$

(6-9)式將給予我們設計反射體積全像拉曼濾波器之規範，以下我們將舉一個實例來說明數值分析結果。

若假設光柵厚度  $L$  為 3 mm，材料折射率  $n_0=1.5$  及  $n_1=3 \times 10^{-4}$ ，以 514nm 氬氫雷射波長記錄反射式光柵，兩道記錄光對稱入射，入射角度  $\theta_B$  在空氣中為 41.4 度（在材料中對 z 軸為 30 度）。首先，我們計算可得光柵週期  $\Lambda$  為 197.84nm，耦合常數  $\kappa$  為  $2.12 \text{ mm}^{-1}$ 。首先，我們分析在原記錄角度入射時，此體積全像反射光柵拉曼濾波器的穿透光譜特性，此可由式(1-3)的光柵繞射效率  $\eta$  得到，簡言之就是取光柵穿透率 ( $T=1-\eta$ ) 對波長變化所作的曲線，圖十四為模擬結果。圖中可以看到在記錄波長附近，光柵的繞射效率很大，當波長增加時，繞射效率明顯變小，穿透率增加。故可得到類似圖十二的凹槽型濾波器的之穿透光譜特性。但是，其光柵截止頻帶所對應之溝槽寬明顯比傳統的拉曼濾波元件小很多。其次，將光柵參數代入(6-9)式，我們就可以得到此濾波器的特徵參數，分別為：



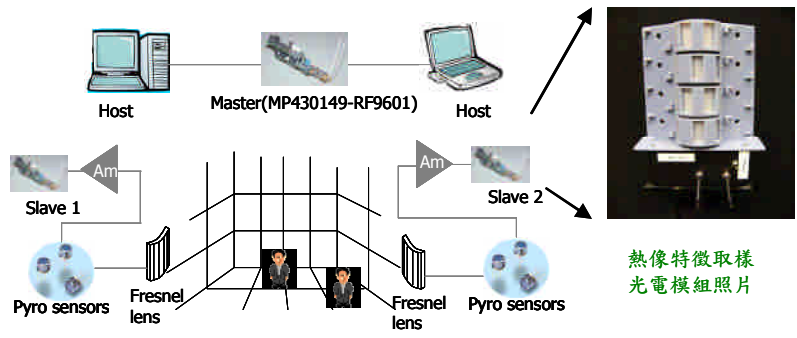
圖十四 設計的體積全像拉曼濾波器的穿透特性曲線

OD=4.92、 $\Delta\lambda=0.137\text{nm}$ 、 $\delta k=50 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\delta T=5.8\%$ 。這些參數已經很接近實際可用的拉曼濾波器了。從這些分析我們發現，此濾波器主要的功能限制在於光柵繞射效率旁波的震盪值太大，而無法減少過渡帶寬，仍能維持濾波器的平坦度。所以，若我們可以有效的減少穿透

率震盪的相對值，則我們可以更進一步利用體積全像窄頻寬的特性，讓起始可分析的拉曼位移量更小，這些想法可用調制過的光柵振幅強度來取代這裡所用的均勻光柵，未來將繼續進行相關的理論分析。

(2). 與 Duke 大學光電中心合作設計熱電檢測光電系統：

近年來，居家安全與生物特徵辨認是相當熱門的研究主題，光電系統由於有平行、快速偵測及光譜分析的能力，可非常方便的用於非破壞性的檢測，因此，我們實驗室也與 Duke 大學光電中心合作，利用熱電偵測器振列及 Fresnel 透鏡振列實現低損耗、高環保之生物熱像特徵取樣光電系統，結果十分有趣。說明如后，首先在取樣方面，由於人類的體溫所產生的黑體輻射光譜波段位於 $\sim 9\mu\text{m}$ 左右，這恰好位於熱電偵測器最敏感的波段，所以我們利用坊間市售的自動門檢測的紅外線熱電感應器，加上獨特設計的 Fresnel 透鏡與取樣窗口之投影取樣，可以取得不同步行者的黑體輻射特徵，作為其生物特徵的資料庫。圖十五為我們所設計的光電偵測及辨識系統，利用這樣的系統，任何在一個室內的步行者皆可快速得到其生物熱電特徵。圖十六所示則為兩個不同人所取得熱像特徵信號之實驗結果，這個圖案特徵可作為辨識之基礎。

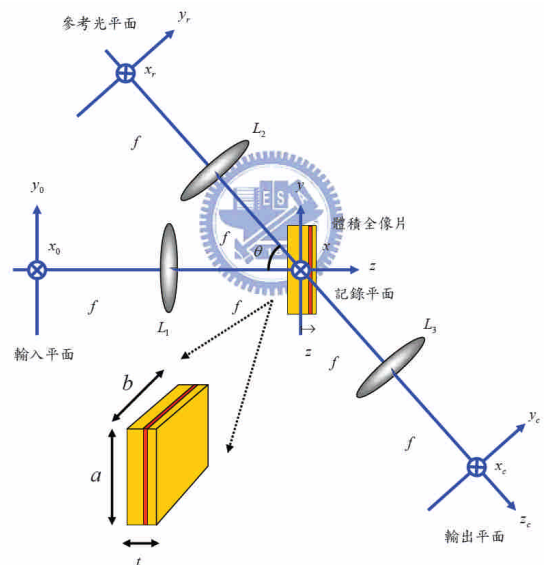


圖十五 光電偵測及辨識系統

在人員辨識方面，我們分成訓練與辨識兩階段來進行。首先將所取得不同步行者的特徵，以主要分量回歸(Principal Components Regression)法則進行訓練分類，可將不同步行者的多次不同條件之生物特徵採樣回歸分類，形成聚落分佈。此聚落分部可讓我們決定並指定辨識的門檻值，進行辨認。在 120 組生物特徵取樣辨認的結果，實驗所得的辨認正確率可達九成以上，結果良好，進一步我們可將系統改良，利用隱藏式 Markov 模型來進行任意行走的步行者之辨認。

(3). 多頻道式體積全像光學相干器之研究：

資訊光學領域中，圖像辨識與處理的研究一直是重要的分支。原因在於，光子以光速傳遞十分快速，且可以在空間中交錯而不會互相影響，同時光學系統具有將二維圖像聚焦、成像等功能，可以用平行化運算的方式處理資訊，這樣優勢配合傅氏光學的運算法則，可以設計出對圖像具有快速、高效率、高敏感度的辨識系統。傳統上，如此的辨識系統是利用兩個傅氏透鏡共焦組合而成，稱之為 Vander Lugt 光學相干器。其特點是辨識能力強，且具有圖像位移不變的辨識特性。若同時考慮要進行大量圖像之間需要相互辨識時，利用體積全像記錄的優點，依次將大量圖形的傅氏全像記錄在相同體積中，即可形成多頻道式體積全像光學相干器，將傳統的 Vander Lugt 光學相干器，建構為一對多的辨識系統。其特點不但能保有原來快速、高效率、高敏感等優點，且系統中由體積全像片記錄大量圖像的匹配濾波器，可以同時對大量圖像作辨識，而這些優點都是現今電腦無法達成的，這樣多頻道式體積全像光學相干器，具有學術研究的價值，更擁有商業開發的潛力。



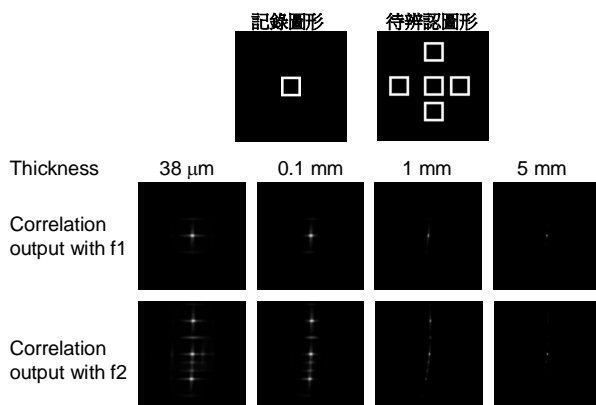
圖十六 體積全像光學相干器架構示意圖

在這個研究子題，首先我們進行以相位疊加法則建立體積全像光學相干器的光場繞射模型，並以此分析其各種特性，而後以光學實驗驗證之。圖十六所示為我們所用的理論分析光學系統示意圖，根據相位疊加法則，以角度多供進行儲存的技術，則在輸出平面的多通道相干輸出結果可得為：

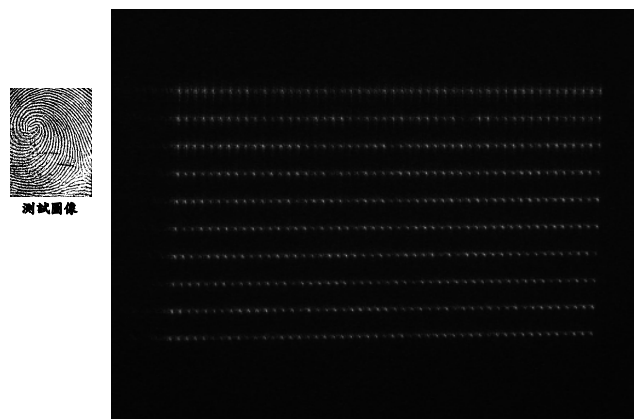
$$U_c(x_c, y_c) \propto \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx_0 dy_0 f(x_0, y_0) \cdot g_{mm}^* [x_0 + x_c + x_m, y_0 + (y_c + y_n) \cos \theta + \frac{x_c^2 + y_c^2 - x_m^2 - y_n^2}{2f} \sin \theta] \\ \cdot t \sin c \left\{ \left( \frac{t}{\lambda} \right) \left[ \frac{(x_0 + x_c + x_m)^2}{2f^2} + \frac{[y_0 + (y_c + y_n) \cos \theta + \frac{x_c^2 + y_c^2 - x_m^2 - y_n^2}{2f} \sin \theta]^2}{2f^2} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{x_0^2 + y_0^2}{2f^2} + \frac{x_c^2 + y_c^2 - x_m^2 - y_n^2}{2f^2} \cos \theta - \frac{y_c + y_n}{f} \sin \theta \right] \right\}$$

我們可用此公式進行分析體積全像相干信號的特性，結果如圖十七，其為當中一個通道的信號輸出，顯示出由於體積全像的布拉格繞射限制，增加記錄介質的厚度，將有效壓抑旁信號提高系統相干信號的尖峰與旁信號之訊雜比，因此我們可利用體積全像的方法，有效增加記錄通道數，建立超高頻道數之多頻道式光學相干器。理論上在 1cm<sup>3</sup> 的記錄材料中，以角度多工的方法可建立 50 多萬個頻道之光學相干器，將可達到平行快速且大量圖像之間辨識的目標。

有了理論分析的結果後，我們亦進行多頻道系統的光學實驗，首先，我們取得指紋圖像，成功的利用角度多工技術儲存下 500 張相同的指紋圖案，執行光學圖像辨識。結果如圖十八所示，可以清楚的看到 500 個相干亮點輸出。顯示我們所研發的材料能有效的進行高品質的傅氏全像，讓多頻道之智慧型圖形識別之概念實際可行。最後，我們應用多頻道式體積全像光學相干器建構指紋辨識系統。



圖十七 體積全像光學相干器之理論分析。圖中，第二列為方塊圖形的自相干運算；第三列為左右兩圖形之相干輸出。



圖十八 多頻道體積全像光學相干器之實驗結果。

### 三、計畫成果自評

本計畫各年度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期刊及會議論文發表[1-56]。我們進行了光折變晶體材料之研製與特性量測，也分析雙波長全像記錄特性、作為應用整合的實驗設計之依據。另外，我們也利用所發展的感光高分子塊材記錄材料，應用在光資訊處理方面，持續進行研究。然而，我們發現雖然光折變晶體是很有趣的體積全像記錄材料，這項研究也很基礎，值得繼續投入，但是若以體積全像光柵應用的角度來看，則需一段較長的研究時間。然而，光學應用只需要固定光柵時，感光高分子塊材也是一種可能的記錄媒體，而我們將其應用在體積全像資訊記錄及光學濾波器的研製。總之，在這個計畫中，我們進行體積全像在體積全像光柵的設計、製作、量測及光資訊處理應用的研究，建立了從材料製成到光學系統及應用過程，一套完整的研究方法，可謂讓體積全像的研究向前邁進一大步。

#### 四、參考文獻

- [1] V. Marinova, S. H. Lin, and Ken Y. Hsu "Light-induced properties of ruthenium-doped  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  crystals" *J. Appl. Phys.* **98**, 113527, 2005
- [2] Jian-Shuen Fang, Juanhua Lin, Ken Y. Hsu, Shiuan Huei Lin, Han-Sheng Chuang, and Cheng-Tsai Yang, "Volume holographic technology for measuring 3D-fluid flow fielding micro-channel", *J. Optical Memory & Neural Networks*, Vol., **14** (2), 129-135, 2006.
- [3] Ken Y. Hsu, Vera Marinova and Shiuan Huei Lin, "Bi<sub>12</sub>TiO<sub>20</sub>:Ru Crystals for two-wavelength holographic recording", (**Invited paper**), *Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications X*, San Diego, USA, 31 July-4 August, 2005.
- [4] Ken Y. Hsu and Shiuan Huei Lin, "Photorefractive and photopolymer materials for volume holographic recording," (**Invited paper**) 5th International Symposium on Modern Optics and Its Applications (ISMOA 2005), Bandung, Indonesia, 15-20 August, 2005.
- [5] Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Doped poly(methyl methacrylate) photopolymers for holographic data storage," submitted to *J. of Non. Opt. Phys. and Mat.*, 2006.
- [6] Vera Marinova, Shiuan Huei Lin and Ken Yuh Hsu, "Role of Ruthenium on Optical, Photoelectrical and Holographic Properties of  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$  and  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  Crystals", Paper MPC-1, *Photorefractive Effects, Materials and Devices*, June 19-23, 2005, Sanya, China.
- [7] Shiuan Huei Lin, Vera Marinova and Ken Hsu, "Photochromic and photorefractive effect in Co-, V-doped  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  crystals with multiple centers," International Conference on Photorefractive Effects, Materials, and Devices, June 17-21, 2003, Nice, France.
- [8] Vera Marinova, M. Gospodinov, Shiuan Huei Lin and Ken Yuh Hsu, "Crystal Growth and Optical Properties of Relaxor Ferroelectric  $\text{Pb}_2\text{ScTaO}_6$  Crystals Doped with Ru and Rh", Paper MPC-2, *Photorefractive Effects, Materials and Devices*, June 19-23, 2005, Sanya, China
- [9] Vera Marinova, Shiuan Huei Lin and Ken Yuh Hsu, "Light-induced and holographic properties of Fe, Mn and Fe+Mn doubly doped  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  crystals", Paper MPC-4, *Photorefractive Effects, Materials and Devices*, June 19-23, 2005, Sanya, China.
- [10] Yi-Nan Hsiao, Wha-Tzong Whang Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Fabrication and Characterization of Thick Znic Methyl Acrylate / PhenanthreneQuinone Codoped Poly(Methyl Methacrylate) Photopolymers for Volume Holographic Recording," submitted to *Japanese J. of Appl. Phys.*, 2005.
- [11] Yi-Nan Hsiao, Wha-Tzong Whang and Shiuan Huei Lin, "Effect of ZnMA on optical and holographic characteristics of doped PQ/PMMA photopolymer," *Japanese J. of Appl. Phys.*, **44** (2), 914-919, 2005.
- [12] Shiuan-Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Investigations on doped PQ:PMMA photopolymers for volume holographic recording", *Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications X*, San Diego, USA, 31 July-4 August, 2005.
- [13] 林俊華、蕭義男、林烜輝、許根玉, "9,10-Phenanthrenequinone 摻雜共基底感光高分子的體積全像特性研究", Paper PD-FR1-22, **Optics and Photonics Taiwan '05**, Tainan, Taiwan, Dec. 9-10, 2005.
- [14] 陳柏霖、蕭義男、林俊華、林烜輝、許根玉, "以 PQ 衍生物為光敏感劑的感光全像高分子材料製備與特性研究", Paper D-FR-VI 2-6, **Optics and Photonics Taiwan '05**, Tainan, Taiwan, Dec. 9-10, 2005.
- [15] 林俊華、蕭義男、林烜輝、許根玉, "摻雜 ZnMA 與 PQ 分子之 PMMA 的感光高分子塊材的製作與其全像記錄的特性量測", Paper D-SA-VI 4-5, **Optics and Photonics Taiwan '05**, Tainan, Taiwan, Dec. 9-10, 2005.
- [16] Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Doped poly(methyl methacrylate) photopolymers for holographic data storage" *J. of Non. Opt. Phys. and Mats.*, Vol. 15(2), 239, 2006.
- [17] Yi-Nan Hsiao, Wha-Tzong Whang Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Fabrication and Characterization of Thick Znic Methyl Acrylate / PhenanthreneQuinone Codoped Poly(Methyl Methacrylate) Photopolymers for Volume Holographic Recording," *Japanese J. of Appl. Phys.*, **45** (11): 8699-8704, 2006.

- [18] D. Petrova, V. Marinova, R. C. Liou, S. H. Lin and K.Y. Hsu, "Characterization of doped  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  single crystals by light-induced, electrical and photoelectrical measurements" J. of optoelectronics and advanced material, Vol. 9, No. 2, p. 282 – 285, 2007.
- [19] V. Marinova, D. Petrova, S. H. Lin and K.Y. Hsu, "Light-induced and holographic properties of Fe+Mn doubly-doped  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  crystals", Optics Communications, Vol. 281, pp. 37-43, January 2008.
- [20] Shiuan-Huei Lin, Po-Lin Chen, Yi-Nan Hsiao and Wha-Tzong Whang, "Fabrication and Characterization of poly (methyl methacrylate) photopolymer doped with 9,10-Phenanthrenequinone (PQ) based derivatives for volume holographic data storage", Optics Communications, Vol. 281, pp. 559-566, February 2008.
- [21] Shiuan-Huei Lin, Yi-Nan Hsiao, Ken Y. Hsu and Wha-Tzong Whang "Fabrication and Characterization of Poly (MethylMethacrylate-Co-Hydroxyethyl Methacrylate) Photopolymer Doped With Photoinitiator System Eosin Y Spirit Soluble/Triethanolamine for Holographic Data Storage" J. Optical Memory & Neural Networks, Vol., **17** (2), 119-125, 2008.
- [22] Shiuan-Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Eosin Y/triethanolamine doped poly(hydroxyethyl methacrylate/methyl methacrylate) photopolymer", 7th International Symposium on Display Holography, North Wales, UK, 2006.
- [23] Shiuan-Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Doped photopolymers for volume holographic applications", Paper **6314-7**, Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications XI, San Diego, USA, 14-17 August, 2006.
- [24] Ken Y. Hsu and Shiuan-Huei Lin, "Multilevel photorefractivity in doped sillenite crystals", Paper **6314-8**, Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications XI, San Diego, USA, 14-17 August, 2006.
- [25] Shiuan-Huei Lin, Der-Ching Su and Ken Y. Hsu, "Eosin Y/triethanolamine dispersed poly (hydroxyethyl methacrylate-co-methyl methacrylate) photopolymer for volume holographic recording", Paper **HO-P-161**, ICO Topical Meeting on Optoinformatics/ Information Photonics, St. Petersburg, Russia, 4-7 September, 2006.
- [26] Ken Y. Hsu, Der-Ching Su and Shiuan-Huei Lin, "Investigation on Doped PMMA Photopolymers for Volume Holographic Storage", Paper **HO-P-160**, ICO Topical Meeting on Optoinformatics/ Information Photonics, St. Petersburg, Russia, 4-7 September, 2006.
- [27] Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "PMMA-based photopolymer materials for holographic data storage," (**invited talk**) Asia-Pacific Data Storage Conference 2006, Hsin Chu, Taiwan, August 28 ~ 30, 2006
- [28] Shiuan-Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Holographic memory and applications using doped photopolymer", (**invited talk**) 5<sup>th</sup> International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, Nara, Japan, December 6-8, 2006.
- [29] Shiuan-Huei Lin, Yi-Nan Hsiao and Wha-Tzong Whang, "Fabrication and characterization of poly (methyl methacrylate-co-hydroxyethyl methacrylate) photopolymer doped with photoinitiator system Eosin Y Spirit Soluble/Triethanolamine for volume holographic data storage", 5<sup>th</sup> International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, Nara, Japan, December 6-8, 2006.
- [30] Shiuan Huei Lin and June-Hua Lin, "Phenanthrenequinone doped poly(methyl-methacrylate) copolymers for holographic data storage", 5<sup>th</sup> International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, Nara, Japan, December 6-8, 2006.
- [31] Po-Lin Chen, Shiuan-Huei Lin, Yi-Nan Hsiao, Wha-Tzong Whang, "Fabrication and Characterization of poly (methyl methacrylate) photopolymer doped with quinone-based molecules for volume holographic data storage", 5<sup>th</sup> International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, Nara, Japan, December 6-8, 2006.



- [32] Pochi Yeh, Ren-Chung Liu, Ken-Yuh Hsu and Shiuan-Huei Lin "Non-absorptive Polarizers with Chirped Periodic Birefringent Layered Structures", 5<sup>th</sup> International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, Nara, Japan, December 6-8, 2006.
- [33] 陳柏霖、蕭義男、林烜輝、許根玉, " EY/TEA 雙分子感光系統摻雜於丙烯基類共聚合高分子之體積全像記錄材料的研製與全像記錄特性分析", Paper DO-04, **Optics and Photonics Taiwan '06**, Tainan, Taiwan, Dec. 15-18, 2006.
- [34] 陳柏霖、蕭義男、林烜輝、許根玉, "醜基類感光分子摻雜於聚丙烯酸酯高分子之體積全像記錄材料的研製與特性分析", Paper DO-15, **Optics and Photonics Taiwan '06**, Tainan, Taiwan, Dec. 15-18, 2006.
- [35] 陳立偉、林烜輝、許根玉, "反射式體積全像技術製作拉曼濾波器的分析與研究", Paper DO-10, **Optics and Photonics Taiwan '06**, Tainan, Taiwan, Dec. 15-18, 2006.
- [36] 曾士芄、林烜輝、許根玉, "以全像方法在鍍有負光阻 SU-8 的玻璃基板上製作週期性結構", Paper EO-27, **Optics and Photonics Taiwan '06**, Tainan, Taiwan, Dec. 15-18, 2006.
- [37] 劉仁崇、林烜輝、許根玉、葉伯琦, "以多層週期性介電材料研製非吸收性偏光片", Paper EO-06, **Optics and Photonics Taiwan '06**, Tainan, Taiwan, Dec. 15-18, 2006.
- [38] Jian-Shuen Fang, Qi Hao, David J. Brady, Mohan Shankar, Bob D. Guenther, Nikos P. Pitsianis, and Ken Y. Hsu, "Path-dependent human identification using a pyroelectric infrared sensor and Fresnel lens arrays", *Optics Express* Vol. 14, 609-624, 2006. Selected by OSA's Virtual J. for Biomedical Optics, Vol. 1, Issue2, Feb. 10, 2006.
- [39] Jian-Shuen Fang, Qi Hao, David J. Brady, Bob D. Guenther, and Ken Y. Hsu, "Real-time human identification using a pyroelectric infrared detector array and hidden Markov models", *Optics Express* Vol. 14, No. 15, 6443-6458, 24 July 2006.
- [40] 方建舜、許根玉, "以步行者熱像特徵實現人員辨識的光電系統", Paper EO-08, **Optics and Photonics Taiwan '06**, Tainan, Taiwan, Dec. 15-18, 2006.
- [41] Ken Y. Hsu, Shiuan-Huei Lin, Yi-Nan Hsiao, and Po-Lin Chen, "Fabrication and Characterization of poly (methyl methacrylate) photopolymer doped with quinone-based photosensitive molecules for volume holographic recording," (**invited talk**) Paper ThH1-1, The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, Seoul, Korea, August 26 - 31, 2007
- [42] Shiuan-Huei Lin, Yi-Nan Hsiao, and Ken Y. Hsu, "PMMA-based photopolymer materials for holographic data storage," IEEE LEOS - Summer Topicals 2007, Portland, USA, July 23-25, 2007
- [43] Shiuan-Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Low-Shrinkage Doped PMMA Photopolymer for Holographic Data Storage Applications", (**invited talk**), conference proceeding, p. 86, 6<sup>th</sup> International Symposium on Modern Optics and its applications, Bandung, August, 6-10, 2007.
- [44] Shiuan-Huei Lin, Polin Chen, and Ken Yuh Hsu, "Fabrication and characterization of phenanthrenequinone-doped copolymers materials for volume holographic memory," Paper **5.5**, International Forum on Holography Expo-2007, Moscow, 25-27, September, 2007.
- [45] Ken Yuh Hsu, Yi-Nan Hsiao, and Shiuan-Huei Lin, "Investigation on new doped PMMA photopolymers and their applications on multiplexed holograms," Paper **5.6**, International Forum on Holography Expo-2007, Moscow, 25-27, September, 2007.
- [46] Chun-I Chuang, Shiuan Huei Lin, and Yu-Faye Chao, "Real-time measurement of PQ:PMMA photopolymer by phase modulated ellipsometer" Paper **5.7**, International Forum on Holography Expo-2007, Moscow, 25-27, September, 2007.
- [47] 蕭義男、許根玉、林烜輝, "Irgacure 784 光敏感劑摻雜於丙烯基類共聚合高分子之體積全像記錄材料的研製與特性分析", Paper DO-011, **Optics and Photonics Taiwan '07**, Tainan, Taiwan, Nov. 30~Dec. 1, 2007.

- [48] 劉晟齊、林烜輝, "體積全像光學相干器之理論推導與光學模擬", Paper DO-013, **Optics and Photonics Taiwan '07**, Tainan, Taiwan, Nov. 30~Dec. 1, 2007.
- [49] 陳柏霖、許根玉、林烜輝, "菲醜摻雜於共聚丙烯基類感光高分子之體積全像記錄材料的研製與全像記錄特性分析", Paper DO-002, **Optics and Photonics Taiwan '07**, Tainan, Taiwan, Nov. 30~Dec. 1, 2007.
- [50] 林俊華、林烜輝、許根玉、鄭超仁, "廣視角數位全像之系統設計", Paper DP-002, **Optics and Photonics Taiwan '07**, Tainan, Taiwan, Nov. 30~Dec. 1, 2007.
- [51] 粘容蓉、林烜輝, "穿透式體積全像作為光譜儀分光光柵之模擬與應用", Paper DP-008, **Optics and Photonics Taiwan '07**, Tainan, Taiwan, Nov. 30~Dec. 1, 2007.
- [52] Po-Lin Chen, Yi-Nan Hsiao, Shiuan-Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Doped photopolymers for volume holography applications," 6<sup>th</sup> International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, Taipei, Taiwan, June 9-11, 2008.
- [53] Shiuan-Huei Lin, Yi-Nan Hsiao, Ken Yuh Hsu, "Volume holographic data storage characteristics of a epoxy-resin matrix based photopolymer," 6<sup>th</sup> International Conference on Optics-Photonics Design & Fabrication, Taipei, Taiwan, June 9-11, 2008.
- [54] Shiuan Huei Lin, Sheng-Qi Liu and Ken Y. Hsu, "Volume Holographic Multi-channel Correlator using Photopolymer Cube," ICO-21 2008 Congress, July 7-10, 2008.
- [55] Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Advances in Doped Photopolymers for Information Storage and Processing," (Invited paper) International Topical Meeting on Information Photonics 2008, 16-20, November 2008.

表一 雙能階光折變模型之符號對照表

表中：下標  $s$  為淺能階參數,  $d$  為深能階參數,  $sl$  為短波長光參數,  $ll$  為長波長光參數,

符號	參數說明
$S_{d,sl}, S_{s,sl}, S_{s,ll}$	photoionization cross section
$k_B$	Boltzmann constant
$\gamma_d, \gamma_s$	recombination rate
$N_{Dd}, N_{Ds}$	doner density
$N_{Dd}^+, N_{Ds}^+$	Ionized doner density
$\beta_d, \beta_s$	thermal ionization constant
$N$	free electron density
$J$	current density
$e$	electron charge
$\mu$	electron mobility
$N_A$	electronic acceptor density
$E$	space charge field
$P_{s,sl}, P_{s,ll}, P_{d,sl}$	photovoltaic constant
$\epsilon$	dielectric constant
$T$	temperature
$K$	spacing of light interference
$I_{sl}, I_{ll}$	incident light intensity
$\lambda$	wavelength

表二 雙能階光折變模型解之常數對照表

表中：下標 0 代表 DC 項（均勻項）；下標 1 代表 AC 項（調制項）

$$a = \frac{(s_{d,sl} \mathbf{I}_{slo} + \beta_d + \gamma_d N_0) \left( \gamma_s N_{Dso}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o \right) + \gamma_d N_{Ddo}^+ \left( \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{iK p_{s,sl} \mathbf{I}_{slo}}{e} \right)}{\gamma_d N_{Ddo}^+ + \gamma_s N_{Dso}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o}$$

$$b = \frac{\gamma_d N_{Ddo}^+ \left[ (s_{s,ll} \mathbf{I}_{llo} + \beta_s + s_{s,sl} \mathbf{I}_{slo} + \beta_d) + \gamma_s N_0 - \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} - \frac{iK (p_{s,ll} \mathbf{I}_{llo} + p_{s,sl} \mathbf{I}_{slo})}{e} \right]}{\gamma_d N_{Ddo}^+ + \gamma_s N_{Dso}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o}$$

$$c = \frac{\gamma_d N_{Ddo}^+ \left( s_{s,ll} - \frac{iK p_{s,ll}}{e} \right) (N_{Ds} - N_{Dso}^+) \mathbf{I}_{ll1}}{\gamma_d N_{Ddo}^+ + \gamma_s N_{Dso}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o}$$

$$d = \frac{\gamma_s N_{Dso}^+ \left[ s_{d,sl} \mathbf{I}_{slo} + \beta_d + \gamma_d N_0 - \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} - \frac{iK p_{d,sl} \mathbf{I}_{slo}}{e} \right]}{\gamma_d N_{Ddo}^+ + \gamma_s N_{Dso}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o}$$

$$e = \frac{\left\{ \begin{aligned} & (s_{s,ll} \mathbf{I}_{llo} + \beta_s + s_{s,sl} \mathbf{I}_{slo} + \beta_d) \frac{N_{Ds}}{N_{Dso}^+} \gamma_d N_{Ddo}^+ \left( \gamma_d N_{Ddo}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o \right) \\ & - \gamma_s N_{Dso}^+ \left( \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{iK (p_{s,ll} \mathbf{I}_{llo} + p_{s,sl} \mathbf{I}_{slo})}{e} \right) \end{aligned} \right\}}{\gamma_d N_{Ddo}^+ + \gamma_s N_{Dso}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o}$$

$$f = \frac{\left[ s_{s,ll} \left( \gamma_d N_{Ddo}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o \right) + \frac{iK p_{s,ll}}{e} \right] (N_{Ds} - N_{Dso}^+) \mathbf{I}_{ll1}}{\gamma_d N_{Ddo}^+ + \gamma_s N_{Dso}^+ + \frac{e\mu N_o}{\varepsilon} + \frac{k_B T \mu K^2}{e} + i\mu K E_o}$$