

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

光折變體積全像之研製及其應用研究(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2215-E-009-034-

執行期間：94年08月01日至95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：許根玉

共同主持人：林烜輝

計畫參與人員：劉仁崇，陳立偉，曾士堯，蕭義男，許翼鵬

報告類型：精簡報告

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 95 年 6 月 5 日

期中進度報告

光折變體積全像之研製及其應用研究(1/3)
Investigations on Photorefractive Volume Hologram
and its Applications (1/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2215-E-009-034-

執行期間：94年 8月 1日至 95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
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
蕭義男(博士生) 國立交通大學材料科學與工程系
許翼鵬(大學生) 國立交通大學光電工程系

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：

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

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

執行單位：國立交通大學光電工程系及研究所

中 華 民 國 95 年 5 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 μm -6 μm), 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/cm²，而光偵測器密度可為 10⁶ 頻道/cm²，若每個發射器對應 100 個光柵頻道，則連線密度可達 26000x10²=2.6x10⁶ 連線/cm²，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 2.6x10²⁰ 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 (Bi₁₂TiO₂₀, BTO)、矽酸鉍(Bi₁₂SiO₂₀)、及鍺酸鉍(Bi₄Ge₃O₁₂, 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_g = 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 LiNbO₃ 晶體 10³ 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，二是電路板之間之自由空間 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。

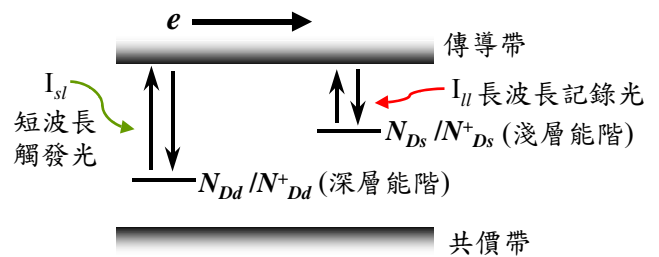
在生醫檢測之應用方面，我們將研製一個體積光柵濾波器，作為偵測或標定光譜之元件。如前面背景資料所述，光濾波器乃是波譜生醫感測的基本元件，我們將以拉曼光譜感測為研究目標。原因是設計感測系統需要知道信號產生及輸入型式（包括空間及時間分佈），而我們跟美國 Duke 大學光電中心已經有初步合作構想，由他們提供拉曼光譜感測之生醫系統圖，而我們針對光學信號型式而設計並製作體積全像元件，再交由 Duke 大學進行實驗甚至臨床實驗。在本計劃中我們將以現有晶體進行雙波長記錄實驗，並且針對特定組織之拉曼感測去推導出寫入/讀出波長不同之下的脈衝響應，並進行驗證。將來在計劃進行過程中，我們會隨晶體材料之改進而改進之。

2.3 結果與討論

今年度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。計劃之進行方法及相關成果討論，說明如下：

(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

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

$$\frac{\partial N_{Ds}^+}{\partial t} = (s_{s,ll} I_{ll} + s_{s,sl} I_{sl} + \beta_s)(N_{Ds} - N_{Ds}^+) - \gamma_s N_{Ds}^+ N$$

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

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} 以及低能量記錄干涉光波 I_{ll} 同時入射來寫入光折變光柵，亦即 $I_{sl} = I_{slo}$, $I_{ll} = I_{llo} + \text{Re}\{I_{ll1} \exp(-iKx)\}$ ，DC 解為：

$$\begin{aligned}N_{Dd0}^+ &= \frac{N_A}{2} + \frac{G_d \gamma_s N_{Dd} + G_s \gamma_d N_{Ds}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} \\ &\quad - \frac{\sqrt{[G_d \gamma_s (N_{Dd} + N_A) + G_s \gamma_d (N_{Ds} - N_A)]^2 - 4(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d) G_d \gamma_s N_{Dd} N_A}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} \\ N_{Ds0}^+ &= \frac{N_A}{2} - \frac{G_d \gamma_s N_{Dd} + G_s \gamma_d N_{Ds}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} \\ &\quad + \frac{\sqrt{[G_d \gamma_s (N_{Dd} + N_A) + G_s \gamma_d (N_{Ds} - N_A)]^2 - 4(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d) G_d \gamma_s N_{Dd} N_A}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} \\ N_0 &= \frac{G_d (N_{Dd} - N_{Dd0}^+) + G_s (N_{Ds} - N_{Ds0}^+)}{\gamma_d N_{Dd0}^+ + \gamma_s N_{Ds0}^+} \\ N_{Dd0}^+ + N_{Ds0}^+ &= N_A\end{aligned}$$

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：

$$\begin{aligned}E_{sc} &= \frac{ie}{\varepsilon K} (N_{Ds1}^+ + N_{Dd1}^+) \\ &= \frac{ie}{\varepsilon K} \left\{ \begin{aligned} &[-(c+f)\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} \left(\frac{(a-b)f + (e-d)c}{ae-bd} + (c+f)\tau_1 \right)] \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \\ &- \left[\frac{\tau_{21}}{\tau_1 - \tau_2} \left(\frac{(a-b)f + (e-d)c}{ae-bd} + (c+f)\tau_1 \right) \right] \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \frac{(b-a)f + (d-e)c}{ae-bd} \end{aligned} \right\} \\ \tau_1 &= -\frac{2}{(a+e) + \sqrt{(a+e)^2 - 4(ae-bd)}} \\ \tau_2 &= -\frac{2}{(a+e) - \sqrt{(a+e)^2 - 4(ae-bd)}}\end{aligned}$$

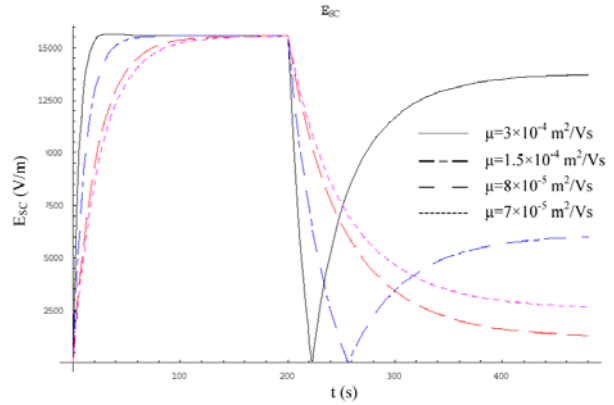
其中所有參數符號代表的意義均列在表二。從式中，我們可以看到分別有兩個時間常數 τ_1 及 τ_2 來導引光柵的形成，其牽涉到淺層能階與深層能階的光柵形成速率，藉由電腦模擬並代入適當的晶體參數，我們即可得到光柵的記錄過程之動態反應，舉例來說：以 BSO 晶體的參數，可令 $N_d = 3.8 \times 10^{23} (m^{-3})$ 、 $N_s = 2.5 \times 10^{24} (m^{-3})$ 、 $N_A = 2.652 \times 10^{24} (m^{-3})$ 、 $I_{llo} = 100 mW/cm^2$ 、 $I_{sl} = 1 W/cm^2$... 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 μ 為變數，來看在高漂移率時雙能階記錄的特性，因為 BSO 晶體不同於鈮酸鋰晶體，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。

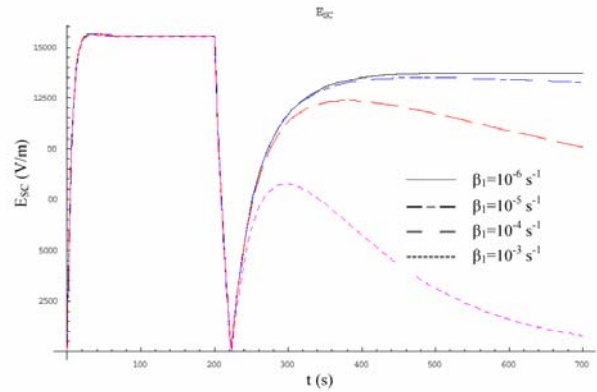
(b).顯影過程：我們關閉高能量觸發光 I_{sl} ，只以低能量記錄平面光波 I_{ll} 來顯現不會消失的光折變光柵強度，亦即 $I_{sl}=0, I_{ll}=I_{llo}$ ，此時因光的能量較低，DC 項的建立時間很長，必須考慮暫態過程，其解如下：

$$\begin{aligned} N_{Ds0}^+(t) &= N_{Ds} + [N_{Ds0}^+(t=0) - N_{Ds}] \exp(-t/\tau) \\ N_{Dd0}^+(t) &= (N_A - N_{Ds}) - [N_{Ds0}^+(t=0) - N_{Ds}] \exp(-t/\tau) \\ N_0(t) &= \frac{(s_{s,ll} I_{llo} + \beta_s)(N_{Ds} - N_{Ds0}^+(t))}{\gamma_d N_{Dd0}^+(t) + \gamma_s N_{Ds0}^+(t)} \\ \tau &= \frac{\gamma_d (N_A - N_{Ds}) + \gamma_s N_{Ds}}{\gamma_d (N_A - N_{Ds})(s_{s,ll} I_{llo} + \beta_s)} \end{aligned}$$

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 β_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：

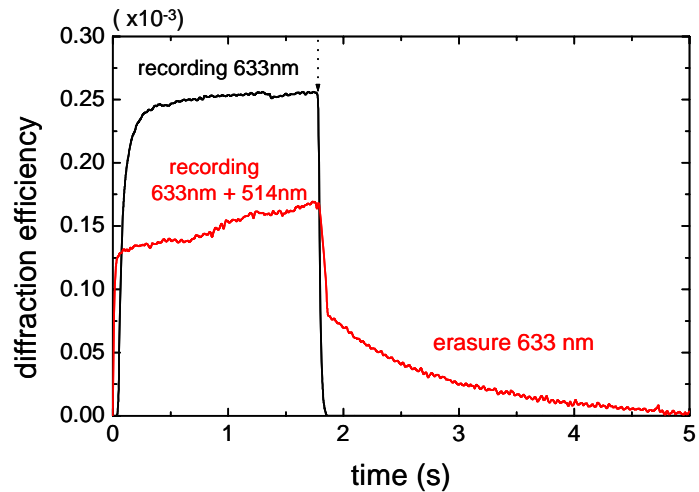
$$\begin{aligned} E_{sc} &= \frac{ie}{\epsilon K} (N_{Ds1}^+ + N_{Dd1}^+) \\ &\approx \frac{ie}{\epsilon K} \left\{ \frac{N_{Dd}^+(df)}{r_+ - r_-} [(a - r_-) \exp(r_+ t) + (r_+ - a) \exp(r_- t)] \right\} \end{aligned}$$

其中， $N_{Dd}^+(df)$ 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。

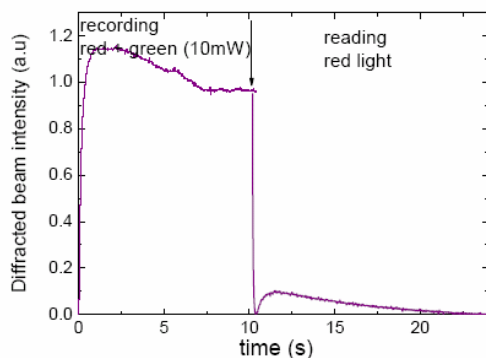
(2). 光折變晶體雙波長全像記錄實驗量測：

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，若進一步晶體的热激發效率很小的話，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。

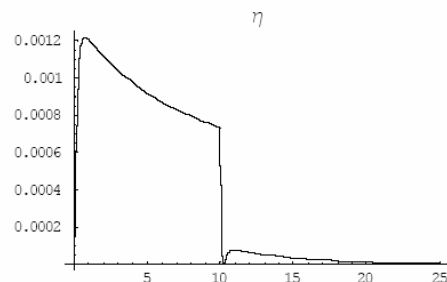


圖四 Ru 摻雜 BTO 晶體之雙波長全像記錄動態實驗曲線圖

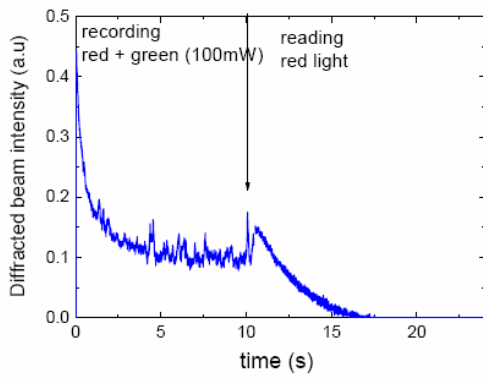
另外，Al+Co 摻雜 BSO 晶體的實驗與理論模擬結果如圖五所示，我們可以看到與理論分析相同的光折變全像記錄趨勢，當使用雙波長記錄時，因為 BSO 晶體中電子漂移率較大，反向較強的淺能階光柵洗除後，餘下深能階光柵顯現，但最終由於熱效應的影響，深能階光柵亦會被洗除。實驗中我們改變短波長雷射的強度，也可以看到記錄行為的改變。換言之，這些結果說明：我們的確可以用雙波長來控制多能階的鈹系列晶體之全像記錄特性。若選擇適當的條件來消除深能階的热效應，此種晶體有可能達成光定影的光折變全像記錄。



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

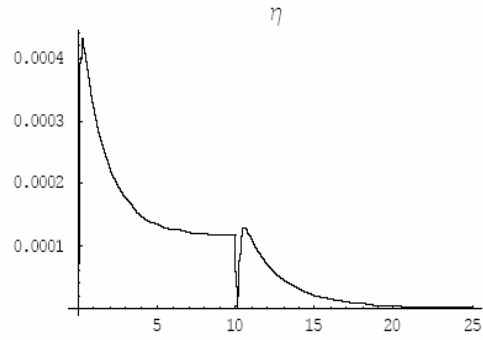


BSO:Co+Al 晶體的雙波長紀錄模擬，使用的參數為 $N_1=1.9 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、 $N_2=1.25 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、 $r_1=2 \times 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $r_2=2 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $S_{11}=1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{J}$ 、 $S_{21}=1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{J}$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



條件同上圖，除激發光為 100mW。

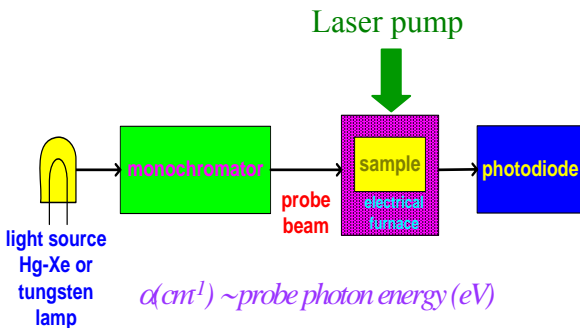
圖五 Al+Co 摻雜 BSO 晶體的雙波長全像記錄動態實驗與理論模擬結果



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。

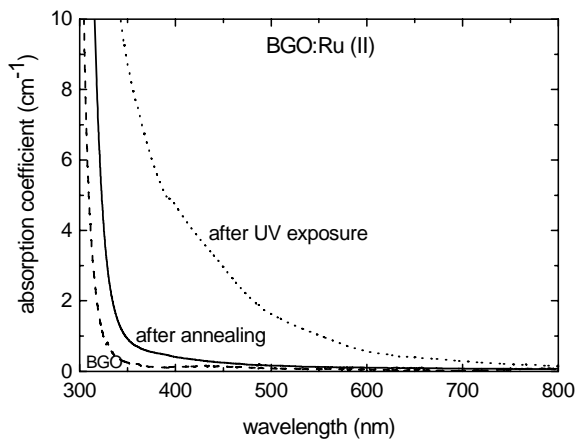
(3). 『摻雜鈦金屬的 BGO 光折變晶體』的製作及光學特性的分析：

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。圖六為摻鈦濃度為 $6.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 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。

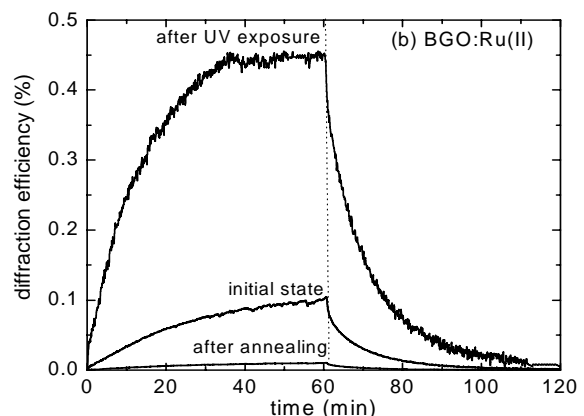


圖六 光致變色效應影響量測系統示意

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



圖七 晶體吸收頻譜量測結果



圖八 摻鈦 BGO 光折變晶體全像記錄實驗

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。

三、計畫成果自評

本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[1-7]。進一步的雙波長全像記錄實驗與分析、應用整合的實驗設計與量測、系統整合規劃以及光資訊處理之應用等後續研究仍持續在進行中。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，但是我們也若以體積全像光柵應用的角度來看，則光折變晶體距離實用尚有一段相當的距離，需長時間研究。針對需要固定的體積光柵之應用時，目前來說感光高分子材料塊材是一種比較可行的記錄媒體。我們實驗室長期以來亦投入部分資源在此研究項目上，今年也獲得一些有趣的成果[7-12]，適合應用在體積全像資訊記錄及光學濾波器的研製。考量這些因素，在未來兩年，我們希望將高分子感光材料的成果及研究引進這個計畫，擴充使用的記錄材料範圍，使計畫預定之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目標更加具體可行，並使計畫執行的更加充實有效，因此我們希望能將計畫的題目變更為：『體積全像光柵之研製及其應用研究』。

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**, No. 2, 129-135, 2005.
- [3] Ken Y. Hsu, Vera Marinova and Shiuan Huei Lin, "Bi₁₂TiO₂₀:Ru Crystals for two-wavelength holographic recording", (**Invited talk**), 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 talk**) 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 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.
- [8] Yi-Nan Hsiao, Wha-Tzong Whang Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Fabrication and Characterization of Thick Zn²⁺ Methyl Acrylate / PhenanthreneQuinone Codoped Poly(Methyl Methacrylate) Photopolymers for Volume Holographic Recording," submitted to Japanese J. of Appl. Phys., 2005.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 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.

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
γ_d, γ_s	recombination rate
N_{Dd}, N_{Ds}	doner density
N_{Dd}^+, N_{Ds}^+	Ionized doner density
β_d, β_s	thermal ionization constant
N	free electron density
J	current density
e	electron charge
μ	electron mobility
N_A	electronic acceptor density
E	space charge field
$P_{s,sl}, P_{s,ll}, P_{d,sl}$	photovoltaic constant
ϵ	dielectric constant
T	temperature
K	spacing of light interference
I_{sl}, I_{ll}	incident light intensity
λ	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）

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

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

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

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

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

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