

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

多能階摻雜雜質鈦酸鈹晶體光折變非線性光學特性研究及 其應用(1/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2112-M-009-026-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學電子物理學系

計畫主持人：林烜輝

計畫參與人員：李安澤

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：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，2年後可公開查詢

中 華 民 國 92 年 6 月 3 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫

期中進度報告

多能階摻雜雜質鈦酸鈹晶體

光折變非線性光學特性研究及其應用(1/3)

**A study on photorefractive nonlinear optics of doped
Bi₁₂TiO₂₀ Crystals with multiple trap centers and their
applications (1/3)**

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2212-M-009-026-

執行期間： 91年 8月 1日至 94年 7月 31日

計畫主持人：林烜輝 國立交通大學電子物理系

計畫參與人員：劉建成(碩士生) 國立交通大學電子物理系

蔡宏璋(碩士生) 國立交通大學電子物理系

李安澤(碩士生) 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

中 華 民 國 92 年 5 月 30 日

一、中英文摘要

本計劃的目標在探索『雙能階能帶躍遷光折變模型』對光折變動態全像紀錄的影響，以此開發新穎的光折變晶體材料，並探索其在光資訊領域應用的先導性研究。研究中將以光折變晶體 $\text{Ru:Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ 為藍本，建立雙能階光折變晶體量測分析與全像光學記錄之技術。計畫將分成三年進行，今年度為第一年，我們著重於發展此種『雙能階能帶躍遷光折變模型』記錄與材料分析的理論基礎，以現有之 BTO 晶體參數進行光學特性模擬分析，為理論建立及晶體參數提供規範制定、取捨，並同時進行各式量測系統建立。以此為基礎，可進行第二階段研究：BTO 晶體的全像紀錄特性量測，以及第三階段：整合應用進行快速光學儲存及處理研究。總之，本計劃將對多能階光折變晶體全像記錄的設計、分析及量測做整體深入的研究，這是光折變材料一個非常基礎的而且也是創新的研究，藉此探索我們自己的適合的快速光學資訊處理的光折變材料。再者，透過詳細的分析也可進一步探索新的光折變機制。

關鍵詞：光折變非線性光學、鈦酸鈹光折變晶體材料、雙能階光折變效應、共軛光學、光學資訊儲存及處理。

Abstract

We propose to launch a three-year comprehensive study on doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ photorefractive nonlinear crystals for two-center holographic recording technique, with their applications for phase conjugation and optical information processing.

This research is divided into three phases. This year is first year. We have developed theoretically the recording mechanisms of photorefractive nonlinear crystals using two-center band transport model. The results provide the guidelines for designing new crystal materials. In experiments, the basic tools for measuring the optical and photorefractive nonlinear properties of the $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystals have been constructed. We focused on the measurements of photochromic and light-induced absorption effects in our Ru doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ photorefractive crystals. The results show that our samples contain multiple centers in the band structure. It provides us a possibility to extend the sensitive wavelength to near infrared spectral region. Based on these results, we can continue the second phase: designing, testing and analyzing photorefractive nonlinear effects in our two-center $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystals and third phase: to explore the applications for phase conjugation and optical information processing.

In summary, this research will perform an intensive study on the material design, analysis, and applications on the multi-level photorefractive nonlinear crystals. This novel material is expected to be a new invention, and the study will also possibly lead to exploring new mechanisms of photorefractive nonlinear effect.

Keywords : Photorefractive nonlinear optics, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ photorefractive crystals,

二、報告內容

2.1 前言

體積全像高密度、高速度平行存取資訊的能力，是極具應用價值的前瞻性科技。長期以來交通大學光電工程研究所/電子物理系即整合了一個光資訊研究團隊，目標在整合不同的技術領域(例如：光折變全像術、微光機電系統、以及高分子材料研製)，發展出一個共同的技術平台，並在此平台上進行一系列新的科研題材，特別是需要大量資料的處理之技術，高密度連線之應用，或快速平行圖像辨識，甚至推展至以光子做為媒介光學電腦計算研發。經過最近數年來的研究，我們瞭解到這些研究關鍵性瓶頸在於良好的全像記錄材料。若沒有高靈敏度、高解析度及高穩定度之記錄材料，則不可製作高品質的全像資訊記憶及處理器，實有必要對儲存材料進行基礎性之探討。然而，由於此類材料的晶體結構複雜，不容易控制，導致晶體本身的特性，如：晶體成長取得不易、組成之調配變化有限、光敏感度不高、以及折射率動態變化範圍等基本問題，限制了全像光學資訊系統的進一步的發展。

因此，晶體材料特性的探討一直以來就是光折變非線性光學效應的發展重心之一，國際上知名的科研單位也積極尋找更好的材料，也利用許多方法，如：晶體熱氧化/還原處理(Thermo-annulling reduction/oxidation)、光致色變處理(Photochromatic effect)、以及晶體特殊摻雜雜質(Multi-center)等等技術來改善晶體的品質，提出新的應用。當然，許多晶體樣品均有市售，我們可以購買後再進行後級處理來改善晶體品質，但是長晶後再調整晶體特性並不容易，更好的辦法應是在長晶前即能提出完整的晶體參數，包括：摻雜雜質及濃度、晶體軸向、以及晶體之熱處理等等參數。但此類的研發並不容易，需要同時對晶體長晶特性、光折變體積全像理論、以及光學資訊處理應用各方面均有經驗才能有效率的進行。我們研究群長期以來即專注進行光折變效應及體積全像術研究，建立了一些晶體及全像量測設備，恰好在 貴會的支持下，我們透過 PPP 計畫申請與保加利亞科學院晶體成長研究室進行交流互訪合作，他們的專長即為長晶與晶體處理，而獲得部分晶體的來源。因此，綜合這些天時與人和，我們認為正是時機提出本計劃，從光資訊處理及儲存應用的角度，來對光折變非線性光學晶體材料進行基礎而系列之探索，建立我們從晶體的光折變非線性光學理論分析、設計晶體的參數、材料分析量測到晶體之應用等各層面的相關理論與技術，從而進展到探索新的光折變的效應。

2.2 研究目的

這個研究題目包含了兩個方向：第一個方向是光學系統工程的考量，規劃設計材料的參數，以增進及充實光資訊處理及儲存系統之功能特性；而第二個方向則為發展新型的光折變材料，探討其全像特性。而得以應用在我們已發展出各式光學信息儲存及處理系統中，促使系統實用性，相當有意義，並可建立我們的研究特色。

當然，新型材料之研發不是一年半載可以成功，我們打算進行多年長期研發，借重以往的研究基礎經驗及晶體的來源，我們選定各式摻雜的鈦酸鈹(Ru, In, Cr, V doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$)光折變晶體進行研發，原因是橫諸目前文獻已發表的光折

變晶體材料，BTO 晶體有其發展的潛力。其原因可從我們已獲得之初步實驗結果來說明，摻雜之鈦酸鉍(doped BTO)晶體為一種新長成的光折變非線性光學晶體，它的光學品質可與其他的晶體相媲美。我們的鈦酸鉍晶體除了有一般鉍系列晶體快速的光反應特性外，更具有比其大上數個數量級的電光係數，因此非常適合用於動態全像應用實驗及特性分析。另外，由於此類晶體晶格的特性，我們可以很容易的在純晶體中加入不同的過渡性或稀土族元素，來得到不同的晶體特性，適用於不同的系統要求，如：摻鉬之鈦酸鉍可進一步將其反應波長延伸至紅光與進紅外波長，讓其更具實用價值；摻鉻可加強鈦酸鉍晶體的光致色變效應，換言之其能階結構會複雜化得到新的光折變紀錄特性。因此，由於來源有效穩定，我們可以在此種晶體內選擇我們所需的能階來進行光折變非線性光學效應雙波長紀錄之研究。利用這些晶體，我們可以有系統的進行光折變非線性光學效應之研究。如果這套理論及相關技術能夠成功建立，將是我們在光折變光資訊處理系統的研發基礎，而未來我們考量再進行其他材料系列材料的研發。此外，透過以BTO 晶體進行系列研發過程，我們也可能探索到新的非線性光學機制，研究新的共軛光學及光資訊處理的物理機制與技術。

2.3 研究方法

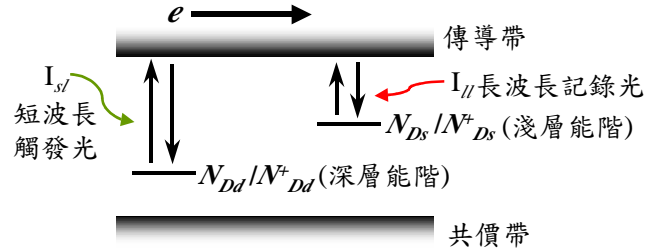
由於這項研究是我們過去數年研究光折變全像技術的經驗累積，知道唯有由共軛光學及光資訊處理及儲存的角度，來對光折變非線性光學晶體材料進行基礎而系列之探索，才能建立我們從晶體的光折變非線性光學理論分析、設計晶體的參數、材料分析量測到晶體之應用等各層面的相關理論與技術，從而進展到探索新的光折變的效應。今年恰有晶體來源、貴重設備的支持與在光折變非線性光學晶體材料之理論與晶體成長分析有實際經驗的博士後研究員加入。因此，經多方考量後，我們選擇以BTO 晶體為起點，計劃之進行方法可分成三年期計畫中。理論方面，我們打算以『雙能階能帶躍遷光折變非線性光學模型』(two-center band transport model for photorefractive effect) 出發，來改進Kukhtarev 在1979年提出單能階式光折變效應模型，從中研究雜質能階在能帶中分布以及雙波長紀錄對光折變動態全像紀錄的影響，這樣的改善有兩個重要的特色，一方面可以用更為實際的晶體模型來觀察分析晶體的光折變非線性光學特性，進行新型光折變材料記錄反應物理機制的研究，另一方面則可發展有效特殊的晶體設計相關技術，針對不同的需求來從市售的晶體中設計我們所需的晶體參數，並以此為基礎研究多能階光折變全像記錄機制以及摻雜雜質濃度對記錄特性影響探索、最後進行雙波長光折變非線性光學效應的探討，作為材料應用系列研發之基礎。實驗方面，為瞭解晶體能階分佈及相關特性，首先，我們量測不同摻雜濃度晶體的光學特性，包括：吸收光譜之變化、旋光性與波長之關係、溫度對光致變色效應之影響、以及光致吸收變化效應等項目；其次，進行光折變記錄特性之研究。透過這些量測，來研究其記錄理論模型，並建立完整晶體分析的設備及技巧，進而讓我們能掌握並設計新記錄材料及機制。這些想法我們將其分成三年計畫進行，今年為第一年，主要著重於『雙能階能帶躍遷光折變模型』之理論分析及晶體設計，以及建立一些基礎的晶體特性量測技術與設備，進行實驗量測。這些結果可提供第二年及第三年研究基礎，而進行全像記錄機制，以及摻雜雜質濃度對記錄特性影響探索、最後進行雙波長光折變效應的探討，以及相關光資訊儲存或處理應用的探索。

2.4 結果與討論

今年度各項工作均按規劃的進度執行，計劃之進行方法及相關成果討論，可分成兩部份來說明如下：

第一部份：理論分析---『雙能階能帶躍遷光折變模型』

『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，以及另一道高能量紀錄觸發光(photosensitized light) 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

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

其中，所有參數符號代表的意義均列在表一。若我們假設低能量紀錄光 I_{ll} 為低調制比，高能量觸發光 I_{sl} 為平面光波，以及在常溫下熱效應遠小於光效應，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 $I_{sl} = I_{slo}$, $I_{ll} = I_{llo} + \text{Re}\{I_{ll} \exp(-iKt)\}$ ，DC 解為：

$$N_{Dd0}^+ = \frac{N_A}{2} + \frac{G_d \gamma_s N_{Dd} + G_s \gamma_d N_{Ds}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} - \frac{\sqrt{[G_d \gamma_s (N_{Dd} + N_A) + G_s \gamma_d (N_{Ds} - N_A)]^2 - 4(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d) G_d \gamma_s N_{Dd} N_A}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)}$$

$$N_{Ds0}^+ = \frac{N_A}{2} - \frac{G_d \gamma_s N_{Dd} + G_s \gamma_d N_{Ds}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)} + \frac{\sqrt{[G_d \gamma_s (N_{Dd} + N_A) + G_s \gamma_d (N_{Ds} - N_A)]^2 - 4(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d) G_d \gamma_s N_{Dd} N_A}}{2(G_d \gamma_s - G_s \gamma_d)}$$

$$N_0 = \frac{G_d (N_{Dd} - N_{Dd0}^+) + G_s (N_{Ds} - N_{Ds0}^+)}{\gamma_d N_{Dd0}^+ + \gamma_s N_{Ds0}^+}$$

$$N_{Dd0}^+ + N_{Ds0}^+ = N_A$$

其中， $G_d = s_{d,sl} I_{s/0}$ ， $G_s = s_{s,ll} I_{l/0} + s_{s,sl} I_{s/0}$ ，將這些 DC 項代入原方程式中，可解出 AC 項為：

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

$$\tau_1 = -\frac{2}{(a+e) + \sqrt{(a+e)^2 - 4(ae-bd)}}$$

$$\tau_2 = -\frac{2}{(a+e) - \sqrt{(a+e)^2 - 4(ae-bd)}}$$

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，藉由電腦模擬我們即可得到光柵的記錄過程之動態反應，舉例來說：若令 $N_d = 7.5 \times 10^{25} (m^{-3})$ 、 $N_s = 2.5 \times 10^{25} (m^{-3})$ 、 $N_A = 2.76 \times 10^{25} (m^{-3})$ 、 $I_{llR} = I_{ls} = 160 mW/cm^2$ 、 $I_{s/l} = 20 mW/cm^2$ 等等參數值代入上式，即可得到如圖二中記錄動態過程，可作為最佳分析之基礎。

(b).顯影過程：我們關閉高能量觸發光 $I_{s/l}$ ，只以低能量紀錄平面光波 I_{ll} 來顯現不會消失的光折變光柵強度，亦即 $I_{s/l}=0$ ， $I_{ll} = I_{l/0}$ ，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：

$$N_{Ds0}^+(t) = N_{Ds} + [N_{Ds0}^+(t=0) - N_{Ds}] \exp(-t/\tau)$$

$$N_{Dd0}^+(t) = (N_A - N_{Ds}) - [N_{Ds0}^+(t=0) - N_{Ds}] \exp(-t/\hat{\delta})$$

$$N_0(t) = \frac{s_{s,ll} I_{l/0} (N_{Ds} - N_{Ds0}^+(t))}{\gamma_d N_{Dd0}^+(t) + \gamma_s N_{Ds0}^+(t)}$$

$$\tau = \frac{\gamma_d (N_A - N_{Ds}) + \gamma_s N_{Ds}}{\gamma_d (N_A - N_{Ds}) s_{s,ll} I_{l/0}}$$

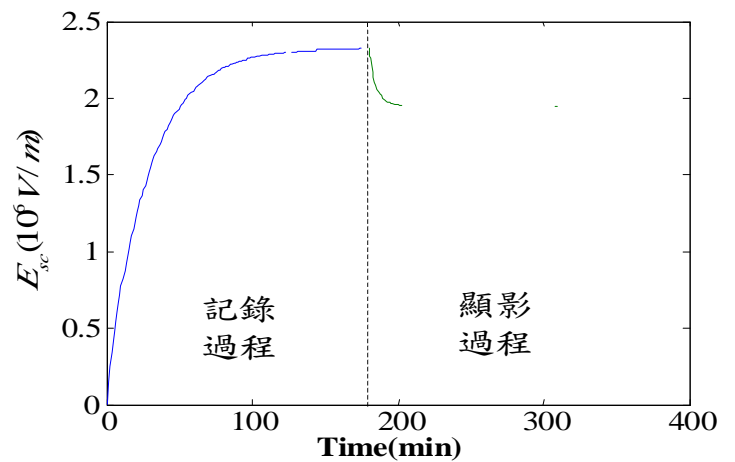
將這些解代入原方程式中，我們會發現其在記錄過程所定義的 a, b, c, d, e, f 參數將為與時間有關的動態數值，因此無法得到一個 AC 項的解析解，必須使用數值方法解之，我們將記錄過程所用的參數代入，並以其結束時的 AC 項數值當作顯影過程的起始值，即可得到如圖二中所示的顯影的動態過程，可以看到光柵最後會穩定殘存。

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

$$E_{sc} = \frac{ie}{\epsilon K} (N_{Dsl}^+ + N_{Ddl}^+) \\ \approx \frac{ie}{\epsilon K} \left\{ \frac{N_{Dd}^+(df)}{r_+ - r_-} [(a - r_-) \exp(r_+ t) + (r_+ - a) \exp(r_- t)] \right\}$$

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。



圖二 雙能階光定影之記錄與顯影過程

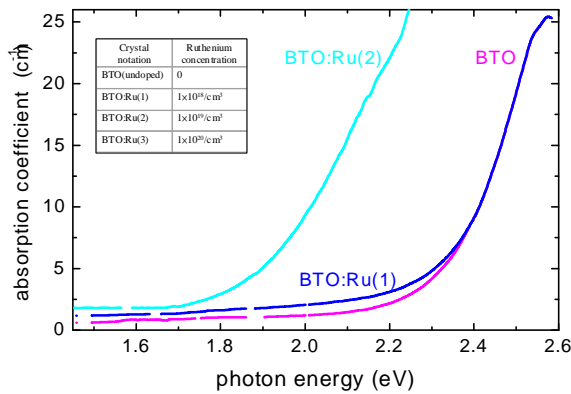
第二部份：實驗量測與應用---『BTO 晶體的光學特性量測』

理論分析十分成功，其次就必須進行 BTO 非線性光學晶體材料的各項光學特性實驗量測，來決定晶體的各項參數，才能進一步分析晶體的記錄情形。說明如下：

(a).材料 UV-IR 吸收光譜之量測與分析：

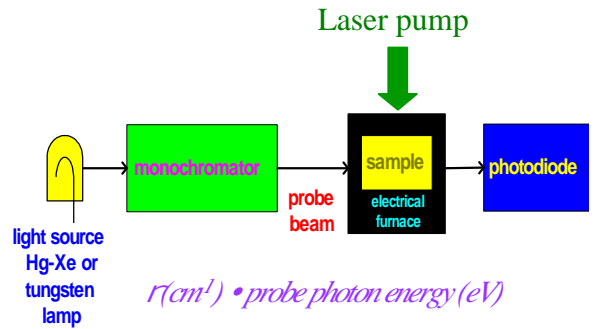
利用 UV-IR 單頻儀測量材料的穿透及吸收光譜特性。這項量測有兩個重要的特點，其一讓我們了解材料感光反應的範圍，配合導電率的量測即可決定雜質深度的晶體參數；其二，其為進一步了解光折變非線性光學晶體最基本的光學量測，如：量測不同摻雜濃度晶體的吸收光譜之變化，讓我們了解光折變效應中施體及受體濃度對全像記錄的影響，進一步的分析淺層能階的特性等等項目，為全像記錄實驗及理論參數模擬之先驅實驗。圖三即為摻鈦(Ru)

的 BTO 晶體的量測結果，圖中可以看到摻雜濃度較高的晶體，其吸收範圍明顯的往紅光(或紅外)偏移，因此可知高摻雜濃度將可引發新的淺能階形成。



圖三 晶體吸收頻譜量測結果

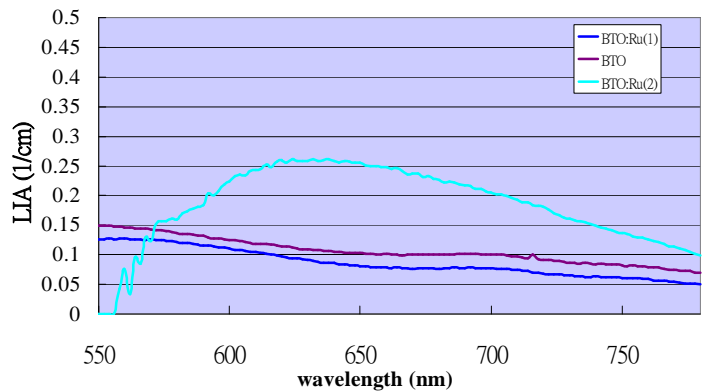
(b).溫度及光照對晶體吸收光譜影響之量測與分析。



圖四 光致變色效應影響量測系統示意

將單頻儀配合溫度控制器組成如圖四的裝置圖，即可進行光致變色效應之量

測，進一步的分析淺層能階的特性；另外，若將單頻儀配合另一短波長雷射(初步選擇波長為532-nm的綠光固態雷射)照射激發，即可研究照光強度對光致變色效應之影響，進一步的分析深層能階的特性。這些實驗量測的理論分析基礎，均可利用不同光照或溫度條件下雙能階的光折變模型來解釋，我們分別稱之晶體的光致吸收或熱漂白效應。換言之，這些量測是決定晶體參數，分析此種新穎光折變非線性光學效應所不能或缺



圖五 光致變色效應的實驗量測結果

的步驟。圖五為實驗結果，我們量測晶體在熱漂白飽和時的吸收光譜與光致吸收保何時的吸收光譜，再將兩者相減即可得到不同晶體的光致吸收效應，從而得到各種晶體在雙能階全像記錄適用的範圍，圖中我們可以看到，高摻雜的晶體在紅光(630nm左右)有一明顯變化的峰值。

透過上述三項的量測分析，可以較為清楚的了解各種不同 BTO 晶體的光折變效應分析中所需要的晶體參數，提供媒體全像紀錄反應機制分析的理論根據及線索。因此，就可以開始進行全像紀錄研究及實驗，此為第二年研究之重點項目。

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論文發表[1-7]。進一步的晶體光折變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。

四、參考文獻

- [1] V. Marinova, Shiu-an Huei Lin, Mei-Li Hsieh, M. Gospodinov, and Ken Yuh Hsu, "Photorefractive effect and holographic recording in V, Co, and Co+V doped $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ single crystals," J. Opt. Memory & Neural Networks, 211-218, No. 4, Vol. 11, 2002.
- [2] V. Marinova, V. Sainov, Shiu-an Huei Lin, Ken Yuh Hsu, "DC and AC conductivity measurements of $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ photorefractive crystals doped with Ag, P, Cu and Cd," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41, 1860-1863, 2002.
- [3] V. Marinova, Mei-Li Hsieh, Shiu-an Huei Lin, Ken Yuh Hsu, "Effect of ruthenium doping on the optical and photorefractive properties of $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ single crystals," Opt. Comm. Vol. 203, 377-384, March 2002.
- [4] Vera Marinova, Shiu-an Huei Lin, Mei-Li Hsieh, and Ken Y. Hsu, "Photochromic and holographic properties of Vanadium doped $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ single crystals", Paper FE3-3, 339-341, Vol. II, Optics and Photonics Taiwan'02, December 12-13, 2002, Taipei.
- [5] Vera Marinova, Shiu-an Huei Lin and Ken Yuh Hsu, "Near infrared holographic recording in Ru-doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ single crystals," to be presented in International Conference on Photorefractive Effects, Materials, and Devices, June 17-21, 2003, Nice, France.
- [6] Shiu-an 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," to be presented in International Conference on Photorefractive Effects, Materials, and Devices, June 17-21, 2003, Nice, France.
- [7] Vera Marinova, Shiu-an Huei Lin and Ken Yuh Hsu, "Studies of absorption levels in doped $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ crystals for two-center holographic recording," to appear in Proceeding of SPIE, **5206**, August, 2003.

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
V	dielectric constant
T	temperature
K	spacing of light interference

表二 雙能階光折變模型解之常數對照表

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

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

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

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

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

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

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