

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

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(3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2112-M-009-005-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學電子物理學系(所)

計畫主持人：林烜輝

計畫參與人員：蕭義男，林俊華

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 11 月 7 日

成果報告

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

**A study on photorefractive nonlinear optics of doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$
Crystals with multiple trap centers and their applications**

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC91-2212-M-009-026,
NSC92-2212-M-009-010,
NSC-93-2112-M-009-005

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：蕭義男(博士生) 國立交通大學材料工程系

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：

- 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：得立即公開查詢

執行單位：國立交通大學電子物理系

中 華 民 國 94 年 9 月 20 日

一、中英文摘要

本計劃的目標為研究『雙能階能帶躍遷光折變模型』，並探索多能階光折變動態全像紀錄的特性，以此開發新穎的光折變晶體材料在光資訊領域的應用。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。因此，計畫分成三年進行，全程計劃已於今年度完成，我們以理論進行發展多能階光折變晶體之能帶結構的記錄特性分析，並以實驗進行各種不同摻雜濃度的 BTO 晶體的各相晶體參數之研究，建立晶體能階結構量測技術，並同時進行短波長光激發下晶體光折變特性量測，結果顯示 Ru 的摻雜能有效地在晶體中產生近紅外光長波長的光折變中心，而讓晶體能產生近紅外光光折變效應。總之，本計劃的完成讓我們能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。

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. In the first year, we developed theoretically the recording mechanisms of photorefractive nonlinear crystals using two-center band transport model. The results will provide the guidelines for designing new crystal materials. During the same period, basic tools for measuring the optical and photorefractive nonlinear properties of the $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystals will be constructed. In the second year, we focused on designing, testing and analyzing the two-center $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ photorefractive nonlinear crystals. The optical properties of crystals, including dark conductivity, UV-VIS transmission spectrum, thermo-induced optical absorption change and light-induced optical absorption change have been characterized and then the parameters of the crystals have been obtained. In addition, the holographic recording experiments with photosensitized fixing technique have been performed to test the read/write characteristics of the crystal materials. In the third year, based on the theoretical and experimental works, we have studied on the two-center recording and explore the applications for optical information processing.

In summary, through performing this research, an intensive studies on the material design, analysis, and applications on the multi-level photorefractive nonlinear crystals have been achieved. This novel material is expected to be a new invention, and we have also explored new mechanisms of photorefractive nonlinear effect.

Keywords : Photorefractive nonlinear optics, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ photorefractive crystals, Two-center band transport model, Phase conjugation optics, Photorefractive information processing

二、報告內容

2.1 緣起與目的

體積全像技術具有高密度、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。若同時考慮光資訊的儲存及處理，光折變材料是目前討論較多且較成熟的材料，因此我們亦選擇此種晶體材料為研究對象，故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；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。我們可從已獲得之初步實驗結果來說明，摻雜之鈦酸鈹(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。我們的鈦酸鈹晶體除了有一般鈹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：摻鉍之鈦酸鈹可進一步將其反應波長延伸至紅光與近紅外波長，讓其更具實用價值；摻鉻可加強鈦酸鈹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，由於我們長期透過 貴會國際合作的支持與保加利亞科學院晶體成長研究所有合作關係，晶體來源有效穩定，故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，我們有系統的進行光折變非線性光學效應之研究。進而建立我們在光折變光資訊處理系統的研發基礎，而未來我們考量以此為基礎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。這三年期間，我們恰有晶體來源、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，我們選擇以 BTO 晶體為執行本計劃構想的晶體材料。理論方面，我們以『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，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。三年下來，我們已完成基礎的建立與分析，可實際計算我們晶體的特性。

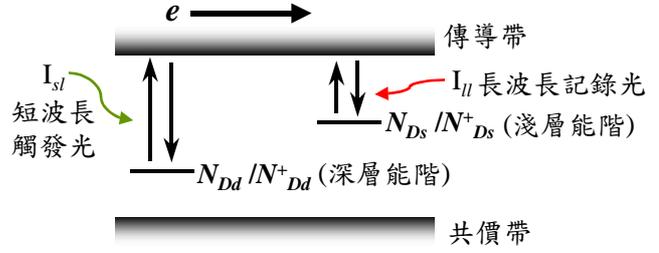
實驗量測與分析方面，從第二年開始，我們加強晶體能階分佈及相關特性之研究。首先，我們量測不同摻雜濃度晶體的光學特性，包括：吸收光譜之變化、旋光性與波長之關係、溫度對光致變色效應之影響、以及光致吸收變化效應等項目。透過這些量測，我們研究了這種晶體之記錄理論模型，並建立完整晶體分析的設備及技巧，進而讓我們能掌握並設計新記錄材料及機制。這些結果也提供第三年整合研究之基礎，而進行全像記錄機制，以及相關光資訊儲存或處理應用的探索。

2.4 結果與討論

各年度的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

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

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 $I_{sl} = I_{slo}$, $I_{ll} = I_{llo} + \text{Re}\{I_{ll1} \exp(-iKx)\}$ ，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， $G_d = s_{d,sl} I_{slo}$ ， $G_s = s_{s,ll} I_{llo} + s_{s,sl} I_{slo}$ ，將這些 DC 項代入原方程式中，可解出 AC 項為：

$$E_{sc} = \frac{ie}{\epsilon K} (N_{Ds1}^+ + N_{Dd1}^+)$$

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

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

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

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 $N_d = 7.5 \times 10^{25} (m^{-3})$ 、 $N_s = 2.5 \times 10^{25} (m^{-3})$ 、 $N_A = 2.76 \times 10^{25} (m^{-3})$ 、 $I_{llr} = I_{lls} = 160 mW/cm^2$ 、 $I_{sl} = 20 mW/cm^2$ 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_{sl} ，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 $I_{sl}=0$ ， $I_{ll} = I_{llo}$ ，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：

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

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

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

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

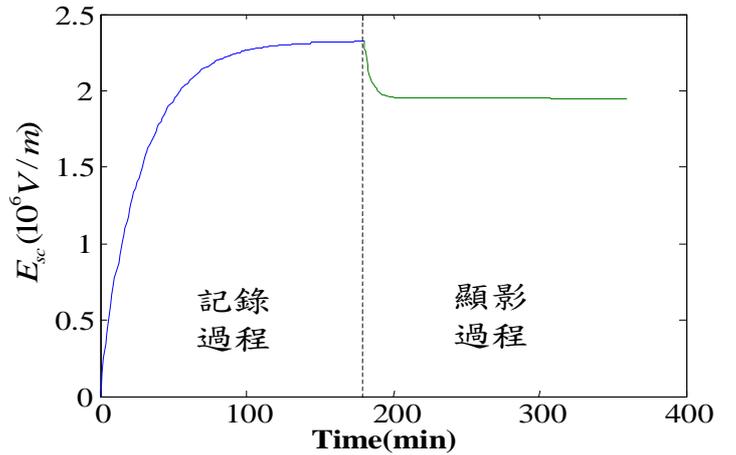
將這些解代入原方程式中，我們會發現其在記錄過程所定義的 a, b, c, d, e, f 參數將為與時間有關的動態數值，因此無法得到一個AC項的解析解，必須使用數值方法解之，我們將記錄過程所用的參數代入，並以其結束時的AC項數值當作顯影過程的起始值，即可得到如圖二中所示的顯影的動態過程，可以看到光柵最後會穩定殘存。

(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：

$$E_{sc} = \frac{ie}{\epsilon K} (N_{Ds1}^+ + N_{Dd1}^+)$$

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

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



圖二 雙能階光定影之記錄與顯影過程

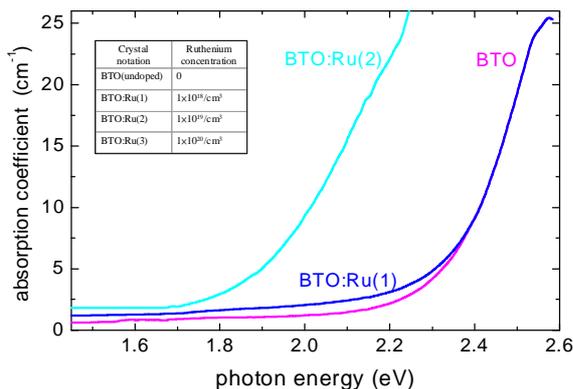
速率，當時間趨近於無窮時所有光柵均會消失。這個光折變非線性光學模型將可讓我們更廣泛的來分析光折變非線性光學效應。在解的過程中，我們可以發現到雙能階的光折變效應會受到能階彼此間相互影響甚鉅，而一般來說，對於光折變晶體能階的形成可由摻雜雜質及其濃度來決定。因此，我們可以透過理論的分析，來進一步的了解這種新穎的光折變非線性光學效應，並且可以藉助電腦模擬及分析，讓我們去設計我們應用所需的光折變非線性光學晶體，如：摻雜雜質種類及濃度比、熱處理及溫度效應的條件、光觸發效應的光強度、以及晶體的軸向與幾何結構等等參數，並且對光折變效應作優化的分析。

第二部份：實驗量測與應用 -- 『BTO 晶體的光學特性量測』

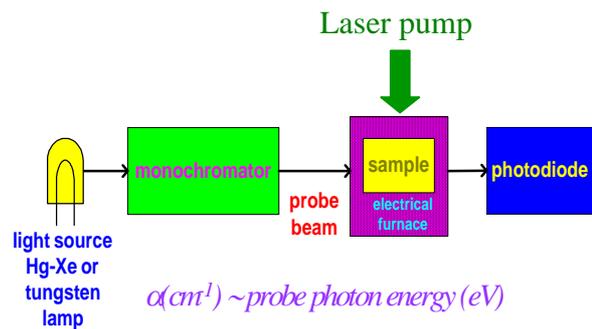
理論分析十分成功，其次就必須進行 BTO 光學晶體的實驗量測，著重在摻釘的 BTO 晶體的各項光學特性實驗量測，來決定晶體的各項參數，進一步分析晶體的光折變特性。計劃之進行方法及相關成果討論，說明如下：

(a).材料 UV-IR 吸收光譜之量測與分析：

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，配合導電率的量測即可決定雜質深度的晶體參數；其二，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，尋求能階的光激發特性，而為全像記錄實驗及晶體參數模擬之先驅實驗。圖一即為摻釘(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。



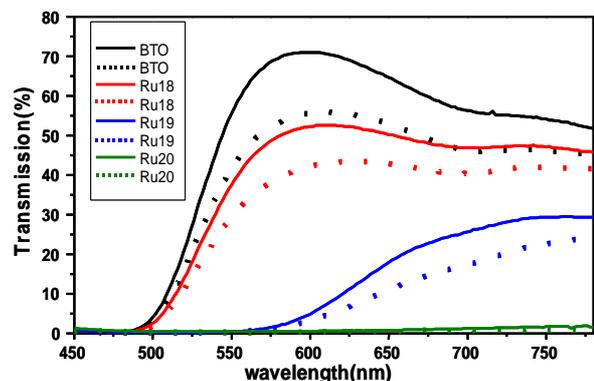
圖一 晶體吸收頻譜量測結果



圖二 光致變色效應影響量測系統示意

(b).溫度及光照對晶體吸收光譜影響之量測與分析：

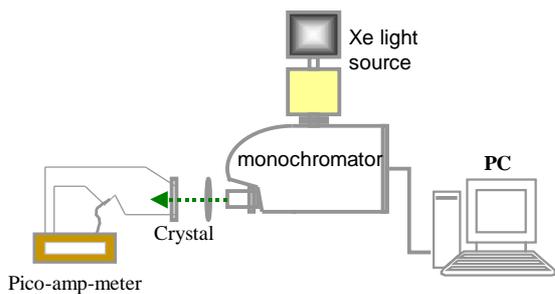
將單頻儀配合短波長雷射(波長為 532-nm 的綠光固態雷射)或溫度控制器即可組成如圖二的裝置，來進行光致變色效應之量測，以了解晶體內部多能階分佈的情形。這些實驗量測的理論基礎，均可利用不同光照或溫度條件下雙能階的光折變模型來解釋，我們分別稱之晶體的光致吸收或熱漂白效應。換言之，這些量測是決定晶體參數，分析此種新穎光折變非線性光學效應所不能或缺的步驟。圖三為實驗結果，我們量測晶體在熱漂白飽和時的穿透光譜與光致吸收飽和時的穿透光譜，兩者相減即計算得到不同晶體的光致吸收效應。圖四所示為高濃度 ($10^{19} / \text{cm}^3$) 摻雜時的光致吸收變化光譜圖，圖中我們可以看到，高摻雜的晶體在紅光 (660nm 左右) 有一明顯變化的峰值，因此這種晶體應該在紅光至近紅外範圍在綠光照後有較佳的光折變全像記錄特性。



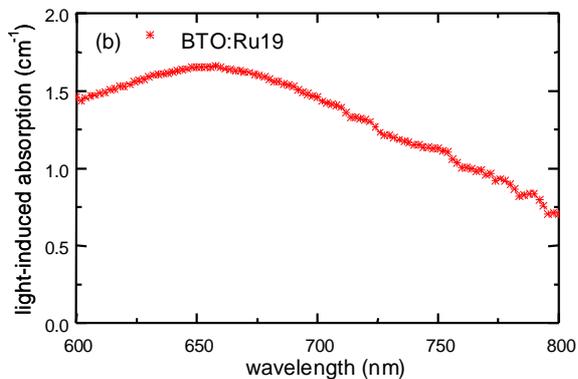
圖三 不同晶體之漂白態及光致吸收態之穿透光譜圖

(c). 晶體光電導頻譜圖分析量測與分析：

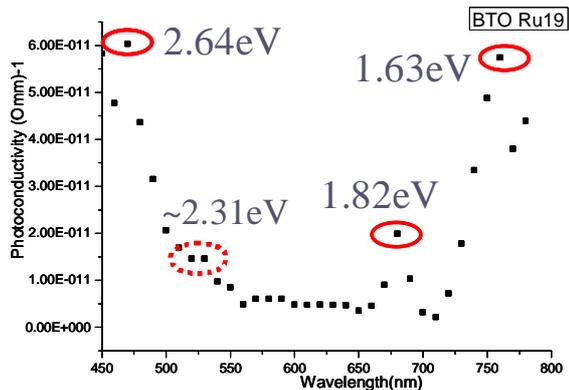
將單頻儀當作光源配合電流電壓量測器即可組成如圖五的裝置，來測量不同波長的光照射下晶體的電導率，再由電導率對入射光波長作圖，得到晶體之光電導率對波長的關係圖，稱之光電導頻譜圖 (photoconductivity spectroscopy)，我們可以從中了解晶體內部多能階分佈的情形。因為當光照在晶體時，雜質能階上的載子將受到入射光子的激發而轉移到傳導帶影響晶體電導率，由量子物理我們知道只有當光子能量大於或等於雜質能階與傳導帶之能隙時，光子的能量才足以激發載子，此時傳導帶上的載子數目會增加，而由 Fermi 的黃金定則可知，當入射光子的能量等於能隙時，對應能階上的電子被激發的機率為最大，因此在光電導頻譜圖上，應可看到在某些特定波長處，晶體的光電導率會突增，這些波長對應的光子能量就是恰好可以激發某個雜質能階上的載子到傳導帶的能量，大量的載子被激發至傳導帶，使得傳導帶上的載子數目突然增加，載子數目的增加相對的使電導率突然增加。換言之，此時入射光的光子能量就對應著雜質能階與傳導帶之間的能隙之能量差，也就是光可激發較深層的雜質能階之位置。實際實驗時，我們針對高濃度($10^{19}/\text{cm}^3$)摻雜 BTO 晶體進行量測，圖六為實驗結果，圖中我們可以看到，在波長為 470nm 處出現第一個光電導率突增值，而在穿透光譜圖中，也可以此晶體穿透邊緣均略大於這個波長，因此我們可以斷定晶體的能帶結構在 2.64eV 的位置應有缺陷雜質所導致之本質能階，高濃度摻雜晶體由於其缺陷濃度較大造成較強吸收，而使吸收能帶延伸到較長波長之範圍，同樣的，這亦表現在晶體的電導率由波長為 550nm 開始增加。另外鈦元素的摻雜使得晶體在 680nm 與 760nm 處也分別出現了明顯的光電導率突增，這代表晶體多了兩個能階分別為 1.82eV 及 1.63eV 的能階，這兩個位於近紅外光的能階使得此晶體可以吸收近紅外光波長的光，進行紅外光折變效應記錄全像。



圖五 光電導頻譜圖量測系統圖



圖四 高濃度($10^{19}/\text{cm}^3$)摻雜 BTO 晶體之光致吸收變化光譜圖

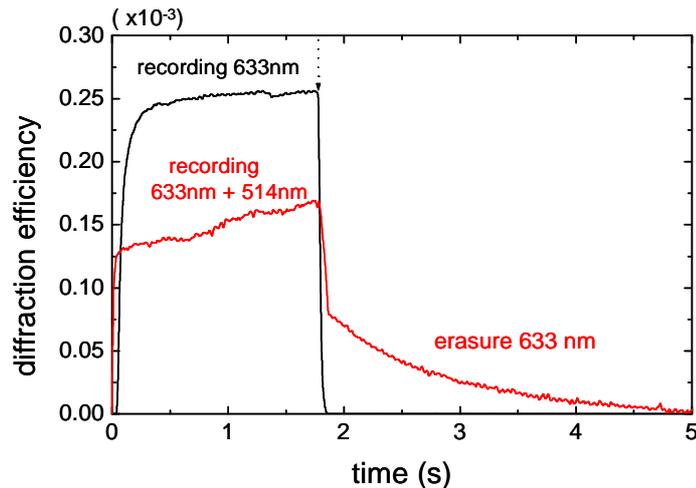


圖六 高濃度($10^{19}/\text{cm}^3$)摻雜 BTO 晶體之光電導頻譜圖

由這些分析結果，我們可以歸納結論如下：鈦酸鈹晶體的能隙為 3.2eV，其長晶過程中會在波長為 470nm 與 480nm 之間(2.64eV)產生一個本質雜質能階。在高濃度摻雜晶體中會在波長為 680nm(1.82eV)與 760nm(1.63eV)的近紅外光範圍產生新的能階。這些能階均可吸收光波產生載子故可作為光折變作用中心，這代表著藉著適當濃度的鈦元素摻雜，我們可以在 BTO 晶體內造成可以吸收近紅外光的能階，讓 BTO 晶體也能在紅外光波段的產生光折變全像紀錄，這可由進一步的全像實驗來證實。

(d). 晶體全像記錄實驗量測與分析：

我們以典型的二波混合之裝置，即可測量不同摻雜之晶體的全像記錄特性。本研究中，我們特別強調晶體內部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，形成熱定影效應。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，實驗結果如圖七所示，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。換言之，我們的確可以用雙波長來控制多能階的晶體之全像記錄特性。若選擇適當的條件，此種晶體有可能達成熱定影的光折變全像記錄。



圖七 摻雜 BTO 晶體之雙波長全像記錄動態實驗曲線圖

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[1-20]。後續之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新衍生計畫進行中。

四、參考文獻

- [1] V. Marinova, Shiuan 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, Shiuan 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, Shiuan 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, Shiuan 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] V. Marinova, S. H. Lin, Mei-Li Hsieh, Ken Y. Hsu, M. M. Gospodinov, V. Sainov "Optical properties of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ crystals doped with ruthenium", *J. Mat. Sci. Mat. Elect.* 14, 857-858, 2003.
- [6] V. Marinova, S. H. Lin, V. Sainov, M. Gospodinov, Ken Y. Hsu "Light-induced properties of Ru-doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystals", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 5 (6), S500-S506, 2003.
- [7] Suzanne Piquette, V. Marinova, Shiuan Huei Lin and Ken Y. Hsu, "Light induced properties of $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ru}$ crystals", Paper TF1-8, *Optics and Photonics Taiwan '03*, Taipei, Taiwan,

Dec. 25, 2003.

- [8] 楊謹綱、林烜輝, "藉由光譜及導電率量測研究摻雜鈦元素鈦酸鈹晶體之光折變模型能階結構", Paper FF3-7, **Optics and Photonics Taiwan '03**, Taipei, Taiwan, Dec. 25, 2003.
- [9] S. Piquette, V. Marinova, S. H. Lin, M. Gospodinov, K. Y. Hsu, "Investigation of Ru-doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystals for photosensitivity in NIR region", Photonics North: 6th International Conference on Applications of Photonic Technology, May 25-29, 2003, Montreal, Québec.
- [10] Vera Marinova, Shiuan Huei Lin and Ken Yuh Hsu, "Near infrared holographic recording in Ru-doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ single crystals," International Conference on Photorefractive Effects, Materials, and Devices, June 17-21, 2003, Nice, France.
- [11] 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.
- [12] Vera Marinova, Shiuan 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," Proceeding of SPIE, **5206**, 7-13, 2003.
- [13] V. Marinova, S. H. Lin, S. Piquette, M. Gospodinov, K. Y. Hsu, "Light-induced infrared absorption in Ru-doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ single crystals", CLEO Pacific Rim 2003, December 15-19, 2003, Taipei, Taiwan.
- [14] V. Marinova, S. H. Lin, S. Piquette, V. Sainov, K. Y. Hsu, "Light-induced properties of Cr and Ru-doped $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals", CLEO Pacific Rim 2003, December 15-19, 2003, Taipei, Taiwan.
- [15] S. Piquette, Vera Marinova, S. H. Lin, Ken Y. Hsu, "Light-induced absorption of Ru-doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystals", Proceeding of SPIE, **5260**, 238-245, 2004.
- [16] 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" accepted by J. Appl. Phys., June 2005.
- [17] P. Petkova, V. Marinova, T. Dimov, I. Iliev, S. H. Lin, and K. Y. Hsu, "Light-induced and holographic properties of transition elements doped BGO crystals", Paper PA20, International Conference on Holography, Optical Recording and Processing of Information, Varna, Bulgaria, 21-25 May, 2005.
- [18] Shiuan Huei Lin, Vera Marinova and Ken Yuh Hsu, "Doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ and $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ photorefractive crystals for holographic applications", (Invited paper) Paper LA06, International Conference on Holography, Optical Recording and Processing of Information, Varna, Bulgaria, 21-25 May, 2005.
- [19] Ken Y. Hsu, Vera Marinova and Shiuan Huei Lin, " $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$: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.
- [20] 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.