

## 亂相編碼多工之相位鑰匙再生研究

林清陽<sup>1</sup> 游漢輝<sup>1</sup> 張冀青<sup>2\*</sup> 楊文魁<sup>3</sup> 張聰健<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 中央大學光電科學與工程學系

<sup>2</sup> 明道大學光電暨能源工程學系

<sup>3</sup> 國防大學理工學院國防科學研究所

<sup>4</sup> 友達光電股份有限公司筆記型電腦顯示器產品研發處

### 摘 要

以鈮酸鋰晶體搭配亂相編碼全像多工的儲存方式是一種非常簡單而且保密性高的方式,但是在本研究中我們所考慮的問題實際上為在發生「光鑰」遺失或損毀了、但知道儲存在晶體內的某一張影像的情況下,設法把儲存在晶體中的影像全部取出來。這裡的所謂「光鑰」實際上是指用來對參考光加密的那片毛玻璃,我們所運用的方法是以某個已知的,已儲存於晶體中的物光去重建出儲存時所用的參考光,並把這道參考光以全像的方式記錄下來。然後開啟這道被記錄下來的參考光回去照射儲存資訊的晶體,那麼晶體內的其他影像便可以一一解取出。

**關鍵詞:** 全像資訊儲存, 亂相編碼, 解碼

## The Decryption of Random Phase Recording Volume Hologram System

Ching-Yang Lin<sup>1</sup>, Hon-Fai Yau<sup>1</sup>, Chi-Ching Chang<sup>2\*</sup>,  
Wen-Kuei Yang<sup>3</sup>, and Tsung-Chien Chang<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Optics and Photonics, National Central University

<sup>2</sup>Department of Electro-Optical & Energy Engineering, Ming Dao University

<sup>3</sup>School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

<sup>4</sup>Department of LCD Design, AU Optronics Corporation

### ABSTRACT

Holographic data storage incorporated with random-phase multiplexing is a kind of high density and encrypted storage with high potential in practical application. In this project, we investigated the possibility of retrieving the stored information in a crystal under the situation that we do not have the possession of the information of the light beam that is needed to retrieve the stored information, but we have the information of one of the stored objects. Our decrypting approach was to use this known object to retrieve the reference light that was used in the storing process and stored it in a second crystal. The goal stated above can be considered basically accomplished.

**Keywords:** holographic data storage, random phase multiplexing, decryption

文稿收件日期 96.03.05; 文稿修正後接受日期 99.02.02;\*通訊作者

Manuscript received March 5, 2007; revised February 2, 2010\* Corresponding author

## 一、前言

在全像資訊儲存領域中，由於光折變晶體具有高儲存密度及快速的重建速度的特性，因此常常被用來作為記錄介質[1-4]。儲存的方式是靠晶體內建立體積光柵，由於在讀取體積光柵的資料時，讀取光的波向量(wave-vector)、光柵的光柵向量(grating vector)和繞射光的波向量必須滿足布拉格條件(Bragg condition)，所以透過良好的設計，一顆晶體可以儲存多筆資訊，每筆資訊對應一特定的參考光。這種「在一顆晶體裡面儲存一群彼此獨立的影像」的方法稱為多工儲存技術(storage multiplexing)，然而，要能落實多工技術到實用階段，儲存資訊的晶體的光致折射率變化量要大。在光折變晶體中，鉍酸鋰晶體(LiNbO<sub>3</sub> crystal)具有很大的折射率變化量( $\sim 10^{-3}$ ) [5]，本研究即使用它來作為記錄介質。目前的多工儲存技術有很多種，如空間多工法(spatial multiplexing)[6]、角度多工法(angular multiplexing)[7]、波長多工法(wavelength multiplexing)[8]、偏振多工法(polarization multiplexing)[9]及相位編碼多工法(phase-coded multiplexing)[10]等等。其中相位編碼多工法具有比較其他幾種方式簡易的優點，而且具有保密的功能。在這類的編碼方式中，亂相編碼(Random-Phase Encryption)編碼法就是一種非常簡單而且保密性高的方式，事實上，它有好幾個優點。第一，我們隨便用一塊毛玻璃就可以去進行這種編碼。第二，任何一片毛玻璃都是獨一無二，甚難複製的。這個特點在需要保密的資料儲存上非常有用。第三，在進行多工儲存時，我們只需移動或轉動毛玻璃即可。亂相編碼多工儲存技術在這幾年有很多的相關研究，這些研究主要是放在毛玻璃的多工方式和儲存容量上[11-14]。然而我們對亂相編碼的安全性問題更有興趣，因此我們轉而去研究有關亂相編碼的安全性三個問題：

(1). 在亂相編碼多工的光學儲存系統中，毛玻璃是這個系統獨一無二的『鑰匙』。有了這把鑰匙，儲存在晶體裡面的資訊才可以被解讀出來。然而，如果這把鑰匙因某些緣故而遺失了，損壞了或碎裂了，那麼即使是那個原來親手儲存這些資料的人也沒有辦法讀出原本的資料了。因此能否由本來

的鑰匙去複製另一把鑰匙以為備份之用，就變成一個有意思的工作。

- (2). 在更進一步的情況中或更壞的情況下，假如原本的毛玻璃遺失了而且又無備份的毛玻璃，那我們有沒有辦法救出在晶體裡面已被編碼的資料呢？
- (3). 如果存有資料的晶體遺失了或被偷了，檢到這顆晶體或偷到這顆晶體的人有沒有可能在沒有原來的毛玻璃的情況下讀出晶體裡面的資料呢？

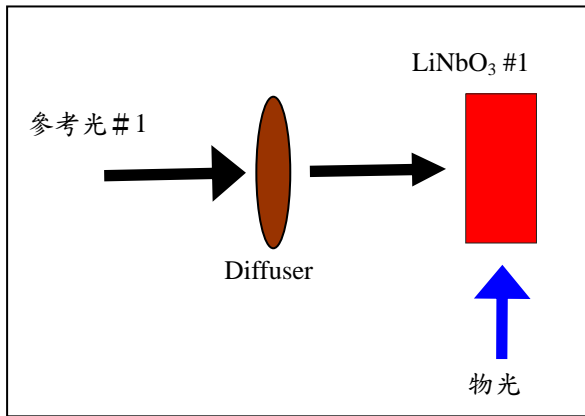
我們認為，釐清這三個疑問是非常有意義的。對於第一個疑問，中央大學的孫慶成教授和大同大學的蘇威佳教授已初步成功的以全像的方式複製出用作編碼的毛玻璃[15]，解答了第一個問題。其餘第二和第三個問題，我們提出「光鑰再生」的概念來解答。

## 二、研究內容及原理

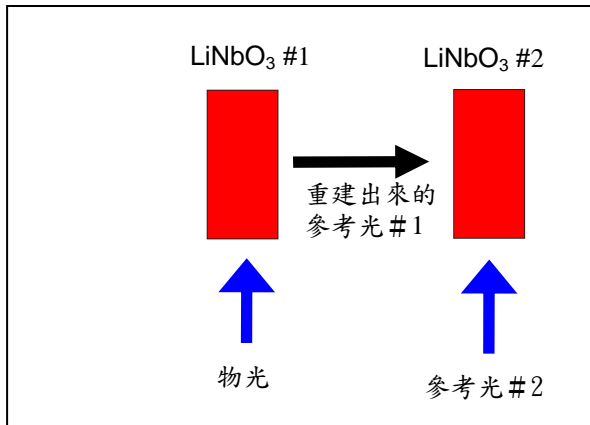
「光鑰再生」方法是在無法取得原來的相位鑰匙的條件下，利用記錄時的任一筆資訊與其相關紀錄條件，以全像術的原理來獲得原相位鑰匙之資訊，進而將所有被記錄之資訊重建出來，我們稱這個概念為「光鑰再生」。圖 1 中所表示的是光鑰再生的概念流程圖，共三步驟分述如下：

第一步驟為多工儲存：在這一步中，我們同時利用亂相編碼以及角度多工儲存的技術，將多筆物光資訊記錄於 LiNbO<sub>3</sub> #1 晶體中，如圖 1(a)所示。

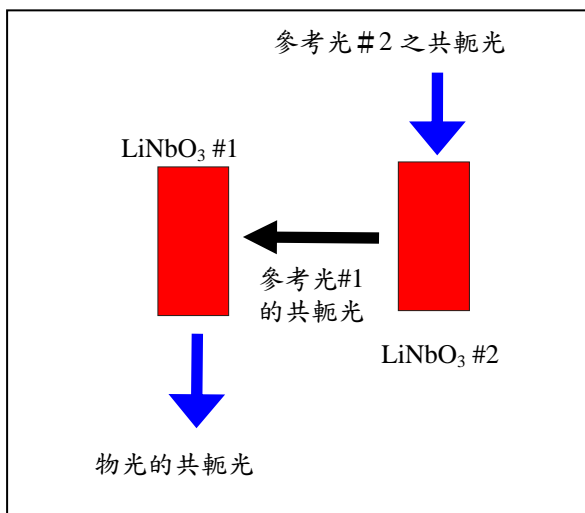
- (1). 第二步驟為光鑰再生：在這一過程中，利用一筆已知儲存在晶體內的資訊，重建出在儲存這一筆資訊時所用的參考光(在這裡，我們稱它為參考光 #1)，並將此重建出來的參考光與另一道平行光(參考光 #2)在 LiNbO<sub>3</sub> #2 晶體中進行干涉，並藉此干涉把重建出來的參考光 #1 記錄於 LiNbO<sub>3</sub> #2 晶體中，圖 1(b)所示。
- (2). 第三步驟為資訊解密及重建(參閱如圖 1(c))：在參考光 #1 被記錄在 LiNbO<sub>3</sub> #2 晶體後，我們可用前一步驟之參考光 #2 的共軛光，射入 LiNbO<sub>3</sub> #2 晶體內而讀出所記錄的原來參考光 #1 之共軛光，再以此重建出來的原來參考光 #1 的共軛光將記錄於 LiNbO<sub>3</sub> #1 晶體中的所有資訊一一讀出。



(a) 多工儲存



(b) 光鑰再生

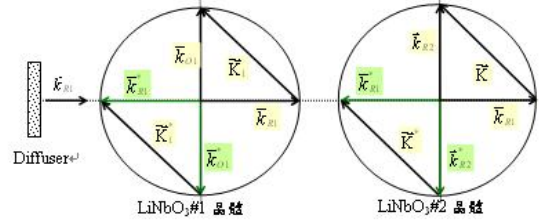


(c) 資訊解密及重建

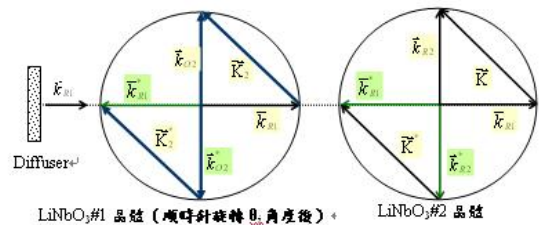
圖 1. 光鑰再生概念流程圖。

由於平行光經過 Diffuser 後會造成漫射

現象，而調制後的光場是 Diffuser 上各點的傳播向量(propagation vector)  $\vec{k}$  的線性疊加，因此為了清楚明瞭的表達，我們以光通過 Diffuser 上特定一點，且垂直於 Diffuser 表面之傳播向量  $\vec{k}$  做分析，並因本實驗使用 LiNbO<sub>3</sub> 晶體為儲存介質且紀錄光的偏振態為 ordinary ray，故可以  $\vec{k}$  向量圖(如圖 2)



(a) 第一張物體影像紀錄與光鑰再生之  $\vec{k}$  向量圖示意圖



(b) 第二張物體影像紀錄與光鑰再生之  $\vec{k}$  向量圖示意圖

圖 2. 光鑰再生與重建之  $\vec{k}$  向量圖示意圖。

來說明解密的原理。在圖二中我們首先假設在紀錄第一張物體影像時，經 Diffuser 調制後的參考光的  $\vec{k}$  向量與 LiNbO<sub>3</sub>#1 晶體的表面法線向量之夾角為  $\theta_0$ ，而紀錄第二張物體影像時，經 Diffuser 調制後的參考光的  $\vec{k}$  向量與 LiNbO<sub>3</sub> 晶體的表面法線向量之夾角為  $(\theta_0 + \theta_i)$ ，其中  $\theta_i$  我們設定它為進行第一步驟多工儲存所需的角角度容忍度。而圖內的  $\vec{k}_{R1}$  則為經 Diffuser 亂相編碼後參考光的  $\vec{k}$  向量。依據「光鑰再生」的三個步驟，原理說明分述如下：

(1). 第一步驟為多工儲存：以 Diffuser 對參考光進行亂相編碼並配合旋轉 LiNbO<sub>3</sub>#1 晶體多工儲存二張物體影像，而載有二張物體影像資訊的物光之特定点傳播向量分別假設為  $\vec{k}_{O1}$  和  $\vec{k}_{O2}$ ，如圖 2 所示。依據耦合波理論， $\vec{k}_{R1}$  與  $\vec{k}_{O1}$  將在 LiNbO<sub>3</sub>#1 晶體中紀錄第一筆光柵資訊，這筆光柵資訊的光柵向量假設為  $\vec{K}_1$ ，如式子(1)所示。另外

將 LiNbO<sub>3</sub>#1 晶體旋轉  $\theta_i$  度後記錄第二筆光柵資訊，其光柵向量假設為  $\vec{K}_2$ ，它是由  $\vec{k}_{R1}$  與  $\vec{k}_{O2}$  干涉而產生的，如式子(2) 所示。

$$\vec{K}_1 = \vec{k}_{R1} - \vec{k}_{O1} \quad (1)$$

$$\vec{K}_2 = \vec{k}_{R1} - \vec{k}_{O2} \quad (2)$$

- (2). 第二部分步驟為光鑰再生：當我們以  $\vec{k}_{O1}$  讀取  $\vec{K}_1$  時，依據體積全像的原理，可得到  $\vec{k}_{R1}$  的資訊（此為光鑰），接著我們將繞射出之  $\vec{k}_{R1}$  與另一道平面波  $\vec{k}_{R2}$  在 LiNbO<sub>3</sub>#2 晶體中進行干涉，所產生之光柵向量假設為  $\vec{k}$ （如式子(3)所示），此時光鑰 ( $\vec{k}_{R1}$ ) 資訊已完整記錄在 LiNbO<sub>3</sub>#2 晶體中。

$$\vec{K} = \vec{k}_{R1} - \vec{k}_{R2} \quad (3)$$

- (3). 第三步驟為資訊解密及重建：由式子(3)可知，當我們以  $\vec{k}_{R2}$  的共軛光  $\vec{k}_{R2}^*$  讀取  $\vec{k}$  會繞射出  $\vec{k}_{R1}^*$  ( $\vec{k}_{R1}$  的共軛光，如式子(4))，再以此繞射光  $\vec{k}_{R1}^*$  逆著原紀錄光路去讀取 LiNbO<sub>3</sub>#1 晶體中記錄之  $\vec{K}_1$ ，則會將第一筆物光資訊  $\vec{k}_{O1}^*$  讀出 ( $\vec{k}_{O1}$  的共軛光，如式子(5))，進而得到原本輸入的第一張物體影像。

$$\vec{k}_{R2}^* + \vec{K} = \vec{k}_{R1}^* \quad (4)$$

$$\vec{k}_{R1}^* + \vec{K}_1 = \vec{k}_{O1}^* \quad (5)$$

由於我們是以記錄完第一張影像後，旋轉 LiNbO<sub>3</sub>#1 晶體  $\theta_i$  角度來紀錄第二張影像，如圖 2(b)所示。因此當我們欲從 LiNbO<sub>3</sub>#1 晶體中將  $\vec{k}_{O2}^*$  讀出，僅需以光鑰  $\vec{k}_{R1}^*$  去射入這個旋轉  $\theta_i$  角度的 LiNbO<sub>3</sub>#1 晶體，便可得到先前紀錄的第二張物體影像。由此可知，我們所提出的「光鑰再生」這個概念應用在全像多工儲存解密研究上是可行的。

### 三、實驗結果與討論

真實的「光鑰再生」的實驗光路如圖 3 所示。

在本實驗中，我們首先在第一顆鉕酸鋰晶體 (LiNbO<sub>3</sub> #1) 中存進五筆資料，然後才進行「光鑰再生」的實驗。換句話說，然後才進行不用原來之參考光去把它們擷取出來的實驗。在實驗中，我們使用波長為 532 nm 之 2 W 二極體泵激固態雷射 (Coherent Verdi LASER) 作為光源。雷射光先經由兩個半波片與一個偏振分光鏡 (Polarized Beam Splitter, PBS) 來獲得單一偏振態的 s-type 雷射光，再由可調式分光鏡 (Variable Beam Splitter, VBS) 將光束分為物光及參考光，並分別經由空間濾波器 (SF1 及 SF2) 擴大其橫截面以及利用透鏡 (L) 產生準直平行光 (Beam A 及 Beam B)，以尋常偏振態的光射入實驗中的第一顆用來儲存「物圖形」的鉕酸鋰晶體 (PC1)，此晶體為摻了鐵的鉕酸鋰晶體，其摻雜濃度為 1000 ppm，尺寸為 20×20×2 mm<sup>3</sup>。

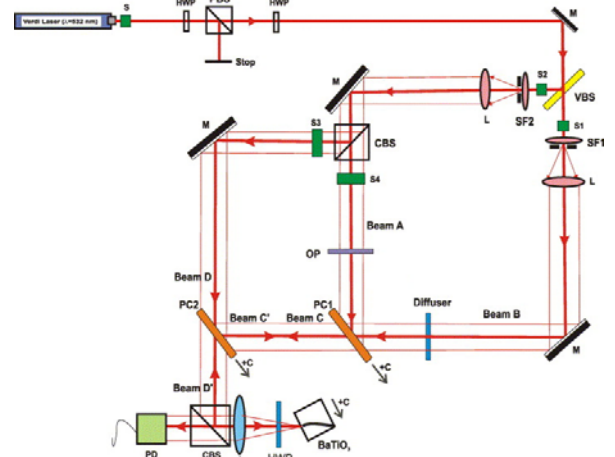


圖 3. 光鑰再生實驗的光路圖

在儲存物圖形時，物光和參考光都採用尋常偏振光。另外參考光的亂相編碼是透過由五片重疊起來的 3M LaserJet acetate sheets 作為 diffuser 而達成的，經我們紀錄完成第一張影像後，逐漸改變參考光在晶體上的入射角，並量取重建光的繞射效率，完成參考光入射角度改變量與重建光繞射效率變化的關係圖 (如圖 4 所示) 由圖 4 得知我們可以選擇每 0.5° 的角度改變量來進行多工儲存。因此在這一步儲存中，我們共記錄了 “Φ” 字等五張影像 (如表 1 所示)，其大小為 8×8mm<sup>2</sup>。

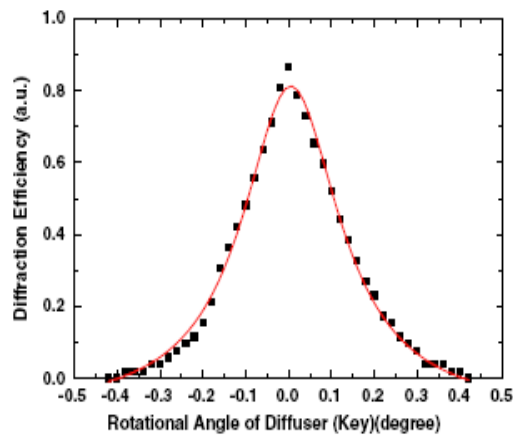


圖 4. 參考光入射晶體角度改變量與重建光繞射效率變化的關係圖。

表 1. 原始影像與使用再生鑰匙從晶體 1 內所讀出的「物影像」

記錄位置	0°	+0.5°	+1°	-0.5°	-1°
原始輸入影像					
由再生光鑰所讀出的影像					

下面進入本研究計畫的主要事情：光鑰再生的實驗。在這一步中，我們關閉 Beam B，僅以載有“⊕”字影像(先前所說的已知影像)的 Beam A 射入第一顆鉍酸鋰晶體(PC1)中，根據體積全像原理，它會重建出儲存這個影像時所使用的參考光 Beam C。在這裡，我們令 Beam C 射入第二顆鉍酸鋰晶體(PC2)內，此顆晶體亦為摻了鐵的晶體，其濃度為 160ppm，尺寸為 20x20x7 mm<sup>3</sup>。同時我們又用另一道平行光 Beam D 照射這顆晶體，透過這兩道光在晶體內的干涉而將 Beam C 的資訊儲存在第二顆鉍酸鋰晶體(PC2)中。在這一步的儲存中，由於再生的 Beam C 很弱，所以它的記錄非常困難。在這裡，我們除了用 Beam D 和 Beam C 在晶體內產生干涉外，還需要一道和 Beam D 共軛的 Beam D' 射入晶體內，方能將 Beam C 記錄下來[16]。Beam D' 的產生則是我們利用一顆鈦酸鋇(BaTiO<sub>3</sub>)晶體作為自泵激相位共軛器來達到[17]。

等到確定 Beam C 的資訊已儲存在第二顆鉍酸鋰晶體(PC2)中後，關閉 Beam C，僅以 Beam D 的共軛光 Beam D' 射入第二顆鉍酸鋰晶體(PC2)來重建出儲存在晶體中的參考光 Beam C 的共軛光 Beam C'，再以 Beam C' 逆著原光路去讀取第一顆鉍酸鋰晶體(PC1)所記錄之資訊，而重建出儲存在晶體中的“⊕”字的影像。藉由旋轉第一顆鉍酸鋰晶體(PC1)，我們可將其餘四張先前記錄的影像分別讀出，其結果如表 1 所示。此實驗結果亦已發表於 Optics Communications 期刊中[18]。

#### 肆、結論與未來方向

一個遺失或損毀“鑰匙”的亂相編碼之體積全像加密系統要如何重新找回其解密的相位鑰匙，是本篇文章的主題。也就是說在亂相編碼之體積全像的光學加密系統中，一個只擁有部分權限的使用者，知道了其中一張物光的資訊與其亂相編碼的儲存方式，便可以在沒



有 Diffuser 的情況下，重建出 Diffuser 的相位資訊，並以此為鑰匙，打開體積全像加密系統中其它的物光資訊。我們推導了其數學模式並設計了一個實驗，解決了有關亂相編碼的安全性的第二與第三個問題，且得到了預期的成果。

但是由於輸入影像均是振幅穿透式圖片，在使用這種振幅穿透式圖片作儲存時，晶體被物光所覆蓋的範圍不大，所以晶體中的所記錄的有效光柵也不多。因此，在第二步驟製作光鑰時，由第一顆鉬酸鋰晶體所繞射出來的“重建參考光(reconstructed reference light)”很弱，使得要將它紀錄在第二顆鉬酸鋰晶體中相當困難，因為所需的曝光時間非常長，致使常受環境震動等因素影響，甚至有時無法把它紀錄起來。總結來說，使用這種振幅穿透式圖片作全像多工儲存的影像時會產生下列兩個問題：

- (1). 在光鑰再生步驟時，因讀取光沒有被完全利用，致使重建出來的參考光非常微弱。在紀錄它時極易受環境干擾且需耗費相當長的曝光時間，因此常會失敗。
- (2). 紀錄介質中有某些部分的曝光量會在其他部份低於飽和量時便已到達或超過這個飽和量，因而記錄下來的影像和原來的影像有差異，產生誤差，也因此限制了儲存的影像數量。

因此，我們認為使用純相位圖片作為輸入圖片，讓紀錄時的物光光強是均勻的，將能對前述的兩個問題有所改進，這已列為我們接下來的研究目標。

## 參考文獻

- [1]. H.J. Coufal, D. Psaltis, G.T. Sincerbox, Holographic Data Storage, Springer, Berlin, 2002.
- [2]. F. Yu, S. Yin, Photorefractive Optics, San Diego, Academic Press, 2000.
- [3]. F.H. Mok, Opt. Lett. Vol.18, p.915, 1993.
- [4]. G.W. Burr, I. Leyva, Opt. Lett. Vol.25, p.499, 2000.
- [5]. P. Yeh, Introduction of photorefractive nonlinear optics, John Wiley, New York. p.43, 1993.
- [6]. Staebler, D. L., Burke, W. J., Phillip, W., and Amodei, J. J., "Multiple Storage and Erasure of Fixed Holograms in Fe-doped LiNbO<sub>3</sub>", Appl. Phys. Lett., Vol. 26, pp. 182, 1975.
- [7]. Mok, F. H., "Angle-multiplexed Storage of 5000 Holograms in Lithium Niobate," Opt. Lett., Vol. 18, No.11, pp. 915-917, 1993.
- [8]. Yariv, A., "Interpage and Interpixel Cross Talk in Orthogonal (Wavelength-Multiplexed) Holograms," Opt. Lett., Vol. 18, pp. 652-654, 1993.
- [9]. Barrera, H J.F. et al., "Multiplexing encrypted data by using polarized ligh," Opt. Commun., Vol. 260, pp. 109-112, 2006.
- [10].Denz, C., Pauliat, G., Rossen, G., and Tschudi, T., "Potentialities and Limitations of Hologram Multiplexing by Using The Phase-encoding Technique," Appl. Opt., Vol. 31, No. 26, pp. 5700-5705, 1992.
- [11].Sun, C. C., Yeh, S. P., Lin, Y. N., Su, W. C., and Ouyang, Y., "High Longitudinal Selectivity of Shifting Multiplexing in Volume Holograms," Opt. Laser Tech. Vol. 34, pp.523-526, 2002.
- [12].Sun, C. C., Su, W. C., Wang, B., Chiou, A. E. T., and Ouyang, Y., "Lateral shifting sensitivity of a ground glass for holographic encryption and multiplexing using phase conjugate readout algorithm," Opt. Commun. Vol. 191, pp. 209-224, 2001.
- [13].Sun, C. C., Hsu, C. Y., Ouyang, Y., Su, W. C., and Chiou, A. E. T., "All-optical Angular Sensing based on Holography Multiplexing with Spherical Waves," Opt. Eng. Vol. 41, pp. 2809-2813, 2002.
- [14].Hu, G. W., Chang, C. C., Lin, C.Y., and Yau, H. F., "Hybrid holographic multiplexing for data storage and application to optical encryption," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41, pp. L518-L520, 2002.
- [15].Su, W. C., Sun, C. C., Chen, Y. C., and OuYang, Y., "Duplication of phase key for random phase encrypted volume holograms," Appl. Opt., Vol. 43, pp. 1728-1733, 2004.
- [16].Campbell, S., Yeh, P., Gu, C., Lin, S. H., Cheng, C. J., and Hsu, K. Y., "Optical Restoration of Photorefractive Holograms Through Self-Enhanced Diffraction," Opt. Lett., Vol. 20, pp. 330-332, 1995.
- [17].Chang, C. C., Chen, T. C., Yau, H. F., and Ye, P. X., "Self-Pumped and Mutually Pumped Phase Conjugation Using Pentagon-Shaped BaTiO<sub>3</sub> Crystal," Optical

- Material, Vol. 18, No.1, pp. 143-146, 2001.
- [18]. Chang, C. C., Liu, J. P., Lee, H. Y., Lin, C. Y., Chang, T. C., and Yau, H. F., "Decryption of A Random-Phase Multiplexing Recording System," Opt. Com., Vol. 259, pp. 78-81, 2006.

林清陽等  
亂相編碼多工之相位鑰匙再生研究