

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

體積全像技術用於資訊儲存及三維立體顯示之研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 100-2112-M-009-005-
執行期間：100年08月01日至101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
共同主持人：許根玉
計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理人員：林俊華

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 101 年 11 月 02 日

中文摘要：本計畫旨在探索『體積全像技術用於資訊儲存及三維立體顯示之研究』，內容包括兩大項目：(1). 研製低收縮高分子體積全像材料，進行新穎的全像紀錄機制與特性研究，並進行資訊儲存應用研發。(2). 研究全像 3D 顯示器技術，著重於基礎的理論與光學系統設計，顯示器件與光源元件之探討。在低收縮高分子體積全像材料方面，將承續實驗室研發之 PQ/PMMA 高分子體積全像材料的經驗及技術，首先完善兩階段熱聚合製程的技術，發展高光學品質的塊材製程，其次，著重於兩種新穎的全像記錄方式研究：偏極化全像與雙波長全像。我們將以實驗進行光化學分析，研究其記錄的物理機制，提供全像紀錄理論模型建立之基礎，且同時建立各式量測系統進行相關光學實驗分析，量測全像記錄特性，配合相關記錄機制理論模擬比較，建立材料參數提供規範制定與取捨，探索及設計其在光學資訊處理的相關應用。在全像 3D 顯示器技術方面，將以實驗室建立體積全像技術出發，進行應用液晶平面顯示器元件，展示真實立體影像的前瞻性研究。首先，研製大尺寸面積之光感高分子紀錄底片，進行全像光學紀錄與重建實驗，藉以研究全像顯示器所需各項基本特性，同時研究各類型液晶顯示面板的相位及振幅調制特性，嚐試顯示實物全像所需各項特性；其次，進行空間同調重建光源的研究，並以體積全像設計製作，以及研究電腦產生全像技術，設計產生 3D 實物全像片，並加入顯示器參數與波前取樣等因素，模擬其對重建影像品質之影響；最後結合這些概念，以實驗展示單色的全像 3D 顯示器。綜合理論與實驗之執行，吾人預期可以得到許多關鍵性成果，作為後續整合發展全像資訊儲存處理以及全像 3D 影像顯示系統的重要基礎。

中文關鍵詞：體積全像光學、全像高分子記錄材料、光資訊儲存、全像三維立體顯示

英文摘要：We propose to launch a long term theoretical and experimental investigation on the possibility of using volume holographic technology for information storage and display of 3D holographic images. For information storage, based on current research results of developing the PQ/PMMA photopolymer, we will study the key issue for two-step thermo-polymerization technique, and propose a system metric for fabricating bulk sample with good optical quality. Using these materials, novel holographic recordings including polarization hologram and two-

color holographic recording will be explored. The physical mechanism of these novel holographic recordings in our photopolymer materials will be studied and experimentally characterization of recording properties will be performed. The results provide the guidelines for designing and optimizing materials. In addition, according to holographic recording properties of the materials, we will explore their applications on optical information storage and processing.

For display of 3D holographic images, three key enabling technologies will be studied, including concept development and theoretical analysis of novel holographic display system, modulation of display pixel and a spatially coherent lighting. Therefore, in the proposed program, we will first use the developed low-shrinkage photopolymer to record and reconstruct holographic 3D images in order to collect the knowledge and carry out concept design of novel holographic display system. We then focus both theoretical and experimental investigation on the possibility of displaying holographic images using liquid crystal display panels. Specifically, the tasks include (a). modulation and driving properties of the liquid crystal display panels; (b). volume holographic flat spatial coherent backlight; (c). information content for novel design generated by IFTA computer generated holographic method plus wavefront sampling. In the long term investigation, the results of these research tasks can be integrated into a display system of 3D holographic images.

英文關鍵詞： Volume holographic optics, Doped photopolymer materials, Optical information storage and processing, Holographic 3D Displays.

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

體積全像技術用於資訊儲存及三維立體顯示之研究
**Investigations on holographic information storage and
three-dimension display**

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 100-2112-M-009 -005

執行期間：100 年 08 月 01 日至 101 年 7 月 31 日

執行機構及系所：國立交通大學電子物理系

計畫主持人：林烜輝 國立交通大學電子物理系

共同主持人：許根玉 國立交通大學光電工程研究所

計畫參與人員：林俊華(博士生) 國立交通大學光電工程研究所
陳柏霖(博士生) 國立交通大學光電工程研究所

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本計畫除繳交成果報告外，另須繳交以下出國心得報告：

赴國外出差或研習心得報告

赴大陸地區出差或研習心得報告

出席國際學術會議心得報告

國際合作研究計畫國外研究報告

處理方式：除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

中 華 民 國 101 年 10 月 30 日

一、中英文摘要

本計畫旨在探索『體積全像技術用於資訊儲存及三維立體顯示之研究』，內容包括兩大項目：(1). 研製低收縮高分子體積全像材料，進行新穎的全像紀錄機制與特性研究，並進行資訊儲存應用研發。(2). 研究全像 3D 顯示器技術，著重於基礎的理論與光學系統設計，顯示器件與光源元件之探討。

在低收縮高分子體積全像材料方面，將承續實驗室研發之 PQ/PMMA 高分子體積全像材料的經驗及技術，首先完善兩階段熱聚合製程的技術，發展高光學品質的塊材製程，其次，著重於兩種新穎的全像記錄方式研究：偏極化全像與雙波長全像。我們將以實驗進行光化學分析，研究其記錄的物理機制，提供全像紀錄理論模型建立之基礎，且同時建立各式量測系統進行相關光學實驗分析，量測全像記錄特性，配合相關記錄機制理論模擬比較，建立材料參數提供規範制定與取捨，探索及設計其在光學資訊處理的相關應用。

在全像 3D 顯示器技術方面，將以實驗室建立體積全像技術出發，進行應用液晶平面顯示器元件，展示真實立體影像的前瞻性研究。首先，研製大尺寸面積之光感高分子紀錄底片，進行全像光學紀錄與重建實驗，藉以研究全像顯示器所需各項基本特性，同時研究各類型液晶顯示面板的相位及振幅調制特性，嚐試顯示實物全像所需各項特性；其次，進行空間同調重建光源的研究，並以體積全像設計製作，以及研究電腦產生全像技術，設計產生 3D 實物全像片，並加入顯示器參數與波前取樣等因素，模擬其對重建影像品質之影響；最後結合這些概念，以實驗展示單色的全像 3D 顯示器。

綜合理論與實驗之執行，吾人預期可以得到許多關鍵性成果，作為後續整合發展全像資訊儲存處理以及全像 3D 影像顯示系統的重要基礎。

關鍵詞：體積全像光學、全像高分子記錄材料、光資訊儲存、全像三維立體顯示。

Abstract

We propose to launch a long term theoretical and experimental investigation on the possibility of using volume holographic technology for information storage and display of 3D holographic images.

For information storage, based on current research results of developing the PQ/PMMA photopolymer, we will study the key issue for two-step thermo-polymerization technique, and propose a system metric for fabricating bulk sample with good optical quality. Using these materials, novel holographic recordings including polarization hologram and two-color holographic recording will be explored. The physical mechanism of these novel holographic recordings in our photopolymer materials will be studied and experimentally characterization of recording properties will be performed. The results provide the guidelines for designing and optimizing materials. In addition, according to holographic recording properties of the materials, we will explore their applications on optical information storage and processing.

For display of 3D holographic images, three key enabling technologies will be studied, including concept development and theoretical analysis of novel holographic display system, modulation of display pixel and a spatially coherent lighting. Therefore, in the proposed program, we will first use the developed low-shrinkage photopolymer to record and reconstruct holographic 3D images in order to collect the knowledge and carry out concept design of novel holographic display system. We then focus both theoretical and experimental investigation on the possibility of displaying holographic images using liquid crystal display panels. Specifically, the tasks include (a). modulation and driving properties of the liquid crystal display panels; (b). volume holographic flat spatial coherent backlight; (c). information content for novel design generated by IFTA computer generated holographic method plus wavefront sampling. In the long term investigation, the results of these research tasks can be integrated into a display system of 3D holographic images.

In summary, this research will perform an intensive study on novel applications of volume holographic technique. The developed materials and recording technique are expected to be a new invention, and the study will also possibly lead to exploring new physical mechanisms of holographic recording in photopolymer material. The developed display system of 3D holographic images will also be leading technology that can display real 3D images without having to wear a pair of special eyeglasses.

Keywords : Volume holographic optics, Doped photopolymer materials, Optical information storage and processing, Holographic 3D Displays.

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。若考慮一次寫入光資訊的儲存及處理，全像高分子塊材是目前討論較多且較成熟的材料，因此我們亦選擇此種材料為研究對象，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，針對我們的光資訊處理的系統研究，規劃設計材料的參數，這個方面的研究，我們可以延續與交大光電所光計算實驗室密切合作形成一個研究群體，共同研究全像光學資訊儲存之應用；而第二個方向則為基礎性之材料研究，也正是本計畫的重點研究特色，目標在發展新型的全像高分子材料，並探討其記錄特性以拓展新穎應用。我們將持續研究『摻雜式體積全像高分子材料』(doped photopolymer system)，因為，根據我們的研究成果顯示，在曝光記錄後，這樣的系統可達到幾乎沒有一般高分子材料常見的光致體積收縮變化效應，所以可製成光資訊系統所需的任意形狀，這對發展高品質、高密度的全像記憶體是一大利器。而且，利用不同的摻雜元素作記錄與高分子基底作基材，可進一步改善記錄材料各項特性，或建構不同的記錄機制，發展新穎應用之基礎。

2.3 研究方法

由於這項研究是我們過去數年研究體積全像高分子光學材料的經驗累積，知道唯有由光資訊光學的角度，來對體積全像高分子塊材進行基礎而系列之探索，才能建立我們從材料製程分析、全像記錄物理機制的分析、設計材料的參數、材料分析量測到體積全像光資訊之應用等全面性的相關理論與技術，從而進展到探索新的高分子體積全像技術。因此，經多方考量後，本計劃的研究內容包括兩大項目：(1)研製低收縮高分子體積全像紀錄材料，進行新穎的全像紀錄機制與特性研究，並進行資訊儲存應用研發。(2)研究全像 3D 顯示器技術，著重於基礎的理論與光學系統設計，顯示器件與光源元件之探討，以及重建影像之色彩與形狀保真，將架設光學系統，實驗驗證。在研究期間，我們以理論推導、電腦模擬及光學實驗三個方式交叉進行之。

2.4 結果與討論

各項工作均按規劃的進度執行，首先首先承續過去研究成果，完善實驗室在『各式摻雜式體積全像高分子材料』的製程，然後，發展材料新穎全像紀錄的機制分析與設計。其次，以低收縮『體積全像高分子材料』為基礎，研製大尺寸面積之光感高分子紀錄底片，進行材料、光學及全像實驗，藉以研究全像顯示器所需各項基本特性。計畫進行方法及相關成果討論，說明如下：

1. 『摻雜式體積全像高分子材料』之製程條件分析與完善：

我們的研究乃是發展摻雜式體積全像高分子材料，利用其低收縮特性，進行體積全像資訊儲存及處理的應用，因此，製作高品質的聚合高分子材料就成為其中關鍵。我們已經研發出兩階段熱聚合的製程步驟，來研製均勻度及品質均接近光學元件等級的材料。然而，沿用至今，製作的良率仍需靠實驗經驗達成，且樣品的特性會受到影響。故，本計畫的第一項工作，就是要研究製作此材料的關鍵因素。首先，將兩階段熱聚合的製程步驟，敘述如下：我們將達飽和濃度(~0.7 wt. %)的光敏感劑，PQ 粉末與熱起始劑，AIBN 粉末(1 wt. %)添加至 MMA 單體溶液當中，使之均勻混合。隨後在溫度 30 °C 的水浴環境下，以超音波將其震盪一小時，待至溶液透明澄清。為了保證材料的良好光學品質，再以孔徑 0.5 微米的過濾阻體阻絕澄清液內之細小雜質。接著在同溫度下利用磁石攪拌子，將過濾後的液體溶液持續攪拌，讓溶液內發生熱聚合反應而呈黏稠狀。經過此熱聚合階段，將黏稠溶液倒入墊片厚度為 2 釐米的自製玻璃容器中，再置入溫度為 45 °C 的烘箱中烘烤，直到樣品中的單體分子幾乎都因聚合反應而消耗殆盡，液態溶液也轉變成固體塊材。

實際進行實驗時，我們發現兩階段的處理時間長短將會影響材料，第一階段的時間長短將會影響材料的光學品質，第二階段的時間長短可能會影響材料的紀錄特性，如何選擇時間關係，將是材料製成最大的關鍵。在觀察實驗的過程後，我們發現第一階段單體溶液在攪拌時，會因為聚合反應的產生造成容易逐漸變黏，因此對於第一階段攪拌進入第二階段模鑄時間選取，可以靠量測溶液的黏滯係數來決定。因此，我們架設了一個等溫水浴的黏滯係數量測裝置(如圖 1 所示)，測量 30 °C 下攪拌時間與黏滯係數的關係，同時也測量材料因熱聚合收縮與時間的關係，藉以作為決定時間的參考依據，初步的實驗結果如圖 2 所示。

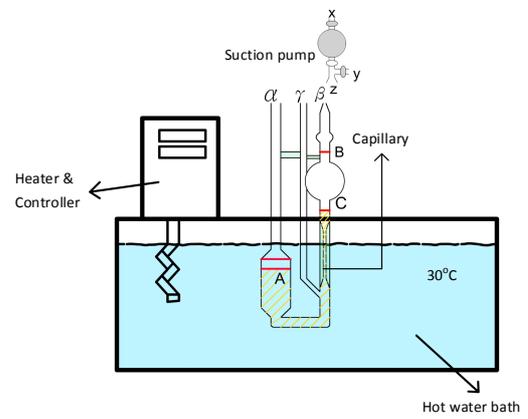


圖 1 等溫水浴的黏滯係數量測裝置

圖中我們可以看到，當時間大於 15 小時時，單體溶液的相對黏滯係數開始急遽上升，這表示熱聚合反應開始產生大量的傳播及聚合單體分子，這時會產生大量的熱與氣泡，因此只要避開這個時間點鑄模，換言之，當測量到材料的黏滯係數 η_r 大於 10 以上，則樣品會有較佳的光學品質。另外，材料鑄模後的收縮率從圖中也可以看到，幾乎與攪拌時間無關，大約為 20%，因此，此數據也告訴我們在鑄模材料塊材時，需保留 20% 以上的預留樣品空間，完成後才能得到完整的樣品。根據此法則我們製作了 2 mm 後 5 英吋的碟片，並架設一個干涉儀來觀察樣品的均勻性，結果如圖 3 所示，只有 1~2 條干涉條紋被觀察到，代表此方法製作的樣品平整度可以達到小於波長(633nm)的數量級，十分驚人。

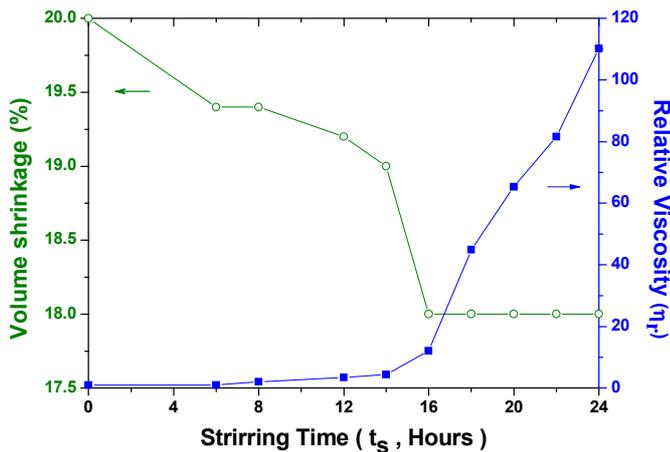


圖 2 單體溶液熱聚合收縮與黏滯係數，隨攪拌時間變化的關係圖

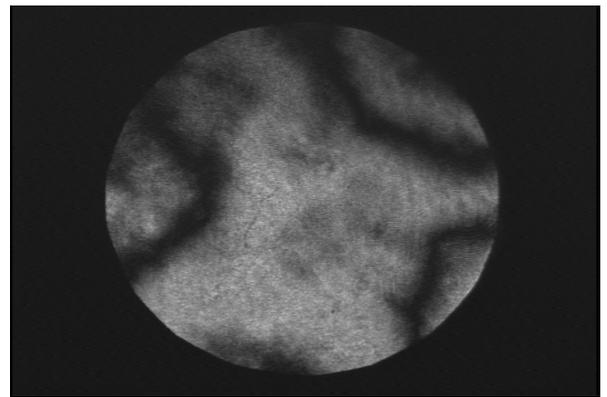


圖 3 干涉儀中樣品的均勻性觀察實驗結果照片

另外，對於第一階段之攪拌時間與第二階段鑄模時間對材料的全像特性影響，我們也實際進行一系列的實驗，在 30 °C 下改變不同的攪拌時間與在 40°C 下改變不同的烘烤時間製程樣品，而對材料的影響，我們則利用實驗室在 貴會補助支持建立的體積全像材料測試平台，進行材料動態範圍(M#)及敏感度(S)的測量評估，結果如圖 4 所示。我們可以看到，攪拌時間的長度對材料的 M# 及 S 影響並不明顯，這表示此階段的製程參數主要是用來決定樣品的光學品質。同時，我們也可以看到烘烤時間較短，材料有較佳的紀錄特性，但大於 3 天後，材料的特性將保持穩定，這些結果顯示我們在製程材料時，參數的選取步驟為：首先，以黏滯係數 η_r 大於 10 以上為指標，選擇攪拌的時間與溫度，讓我們得到較佳光學品質的樣品，其次，烘烤時間需大於 3 天，製成的材料之特性才會保持穩定。

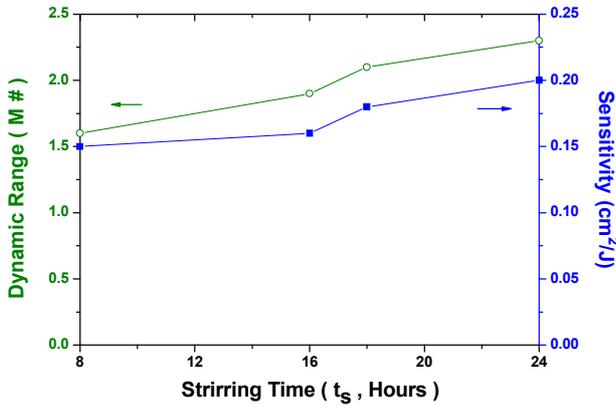


圖 4(a). 材料 M#及 S 隨不同的攪拌時間變化的關係圖

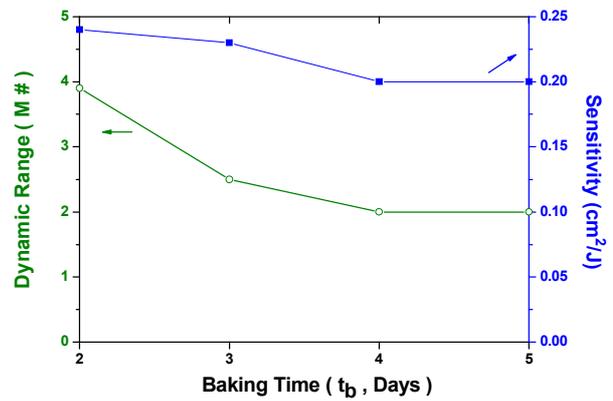


圖 4(a). 材料 M#及 S 隨鑄模烘烤時間變化的關係圖

2. PQ/PMMA 全像高分子進行偏極全像記錄的研究：

其次，我們進行 PQ/PMMA 高分子紀錄偏極化全像特性研究。我們發現這個材料有能力感受入射光的偏極狀態，曝光產生對應偏極狀態的光致雙折射現象，進而可以記錄偏極全像。首先，我們與本校光電系趙于飛教授合作，以其研究群的即時橢圓儀的技術，進行光致雙折射效應的量測，原理如下：我們的 PQ/PMMA 材料，其摻雜的菲醌染料分子是均勻地分散在非晶相(amorphous)之高分子基材中，所以未曝光的 PQ/PMMA 感光高分子為均向性(isotropic)光學材料。然而，此種材料經過某種偏振光之曝照處理，會導致光軸的產生，使它轉變為異向性(anisotropic)光學材料，此現象稱為光致雙折射(photo-induced birefringence)效應，這也是 PQ/PMMA 感光高分子可以記錄偏振全像的主因。為了探討材料在曝光過程中的雙折射特性，我們利用光彈調制偏光儀(photoelastic modulated polarimetry)來量測樣品，其實驗架構如圖 5 所示。實驗上，我們使用 (a)、(b) 兩種不同偏振態的氬離子雷射光(514nm)當作激發光源：(a)線性偏振光，其方位角(azimuth angle)與材料入射平面夾 30 度；(b) 圓偏振光，以四分之一波片將線偏光轉換成圓偏光。另外，激發光源光強度為 19mW/cm²，兩者皆以 $\theta_i=10$ 度斜向入射於材料中；在曝照過程中，我們以光強較弱的氬氖雷射(632.8nm)偵測材料的雙折射效應，此光源的正弦調變相位是以光彈調制器(photoelastic modulator, PEM)在一對正交偏光片間調制之，最後藉由分析紅光輸出強度之傅立葉頻譜諧和項，可

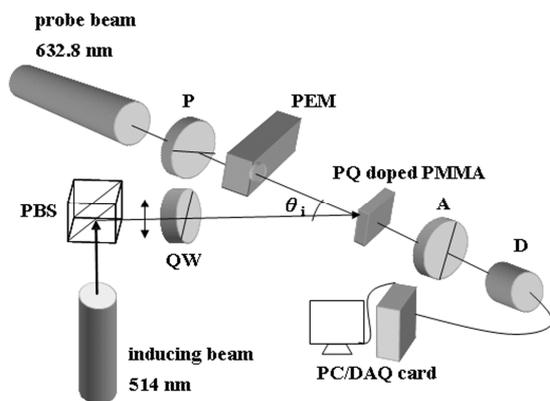


圖 5 光彈調制偏光儀之實驗架構圖

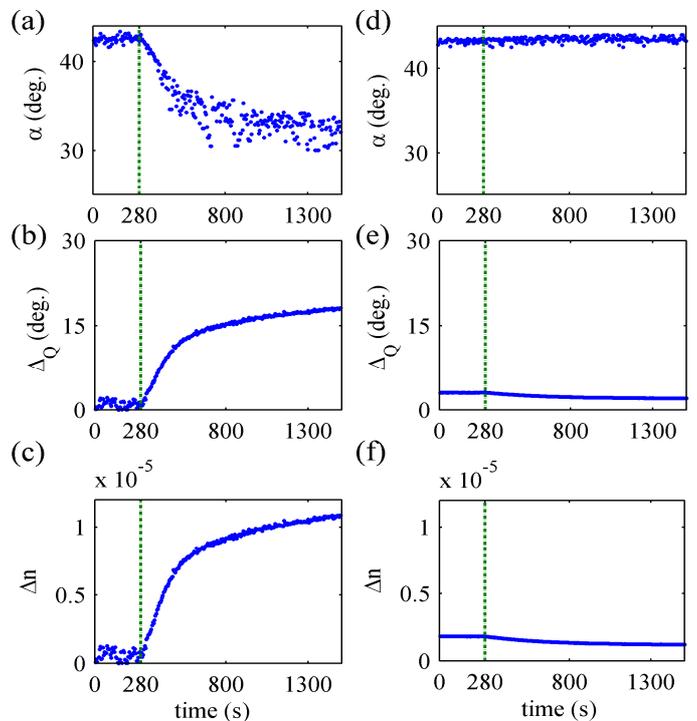


圖 6 材料在激發光源曝照下，所誘發之光軸角度 α 、相位延遲 Δ_Q 和雙折射率 Δn 對時間的響應(圖中虛線：代表材料開始曝照激發光源) (a)~(c)為線性偏振光激發的結果；(d)~(f)為圓偏振光激發結果

計算出材料受光誘發所產生的光軸角度 α 、相位延遲 ΔQ 和雙折射率 Δn 。結果如下圖 6 所示，可以看到三者對曝光能量的動態變化情形。

比較(a)、(d)的曲線，可觀察到材料在線偏光的曝照下，其誘發光軸方位角從原本的 45 度變成接近 32 度左右(飽和數值)，這暗示此樣品從均向性介質轉變成異向性介質，而且光軸方向幾乎與入射光之偏振態方位角(30 度)平行；另一方面，在圓偏光的曝照下，幾乎沒有誘發光軸的改變；不過一開始曝照材料偵測到 3 度的相位延遲 ΔQ ，我們推測是 PMMA 高分子本身對圓偏光的本質雙折射(intrinsic birefringence)效應，如(e)所示。再者，在光強相同的兩種激發光束下，線偏光誘發的雙折射率 Δn 變化量是圓偏光誘發的 16 倍。綜觀以上結果，顯然線偏光激發光源是誘發 PQ/PMMA 材料之線性雙折射效應比較有效的方法，我們可用此量測結果設計進行偏振全像的記錄實驗。

確定此材料具光致雙折射效應後，我們可以進行偏振全像的記錄實驗。首先，先製作 2mm 厚的 PQ/PMMA 樣品，全像光學實驗的紀錄系統，我們使用傳統雙波混合干涉的穿透式記錄架構：記錄光為兩道波長為 514nm 的氬離子雷射同調光束，兩者以空氣中夾角為 30 度對稱入射於塊材樣品中，兩道光強度相同。但與傳統全像不同，我們在此討論這個實驗架構下的兩種偏振記錄模式，分別為兩道相互正交的線偏和圓偏光。在正交線偏光記錄模式下，參考光與信號光分別是相對於入射平面的 s-偏振和 p-偏振光；而正交圓偏光記錄模式的兩道光分別是左旋偏振光和右旋偏振光。這兩種模式分別會在干涉面上產生均勻亮度的偏極化調制干涉條紋如圖 7 所示，可以看到正交線偏光模式將給予橢圓偏極化調制的型式，而正交圓偏光模式，將給予旋轉線偏極化的調制模式，故可以預期的是第二種將可以給予較佳的紀錄效果。

Writing configuration			Modulation pattern in one pitch				
			$\delta = 0$	$\delta = \pi/2$	$\delta = \pi$	$\delta = 3\pi/2$	$\delta = 2\pi$
Linear	 	        					
		        					

圖 7 相互正交之線偏和圓偏光的合成光場在一個光柵週期內的偏振態調變示意圖

記錄時，我們藉由擋住其中一道記錄光，週期性的讀出繞射光，便可以繪出全像繞射效率在記錄過程中的增長情形，而全像繞射效率定義為繞射光強度除以入射光強度。首先，我們研究正交線偏光記錄模式下，以不同記錄光強度寫入偏振全像的繞射效率之動態變化，探討光紀錄強度與全像光柵紀錄的關係，在記錄過程中，我們是以 s-偏振光周期性的讀取，偵測 p-偏振光繞射光的強度計算繞射效率，實驗結果顯示在 PQ/PMMA 樣品中記錄單一偏振全像光柵，其敏感度跟記錄光強度相關，如圖 8(a)所示。當記錄能量太小，材料對互相干涉的兩道正交偏振光幾乎沒有反應，直到光強度超過 10 mW/cm^2 ，材料敏感度才逐漸上升；相反地，光強度太強($>30 \text{ mW/cm}^2$)也會造成繞射效率的降低，而最佳化的記錄條件約在每道光光強為 26 mW/cm^2 ，其繞射效率最高可達 7%。其次，我們以最佳化光強度，進行兩種不同紀錄模式的比較，實驗結果如圖 8(b)所示，相對於線偏光記錄模式，我們觀察到圓偏光記錄對於繞射效率的增長有很明顯的改善，最高數值可以達到接近 40%，大約增加了六倍。再者，兩者記錄到達最高繞射效率的總曝光能量都接近 30 J/cm^2 ，這說明正交圓偏光記錄架構具有較高的材料敏感度，因為在同樣的曝光能量下有較高的繞射效率。

這些實驗結果證實我們的 PQ/PMMA 感光分子具光致雙折射效應，並且可以記錄偏極化全像，若使用它來進行全像光學圖案之多工儲存，則可同時記錄光強度和偏極化體積全像，若材料

的動態範圍非常大，可滿足光學系統可記錄最多全像張數的物理極限，如此的多工方式可以提升材料同一位置的儲存容量，提供更高密度的資料儲存。除此之外，實驗中還觀察到偏極化全像還具有高訊噪比的特性，非常適用於光學影像處理方面之應用，後續的資訊儲存實驗仍在進行中。

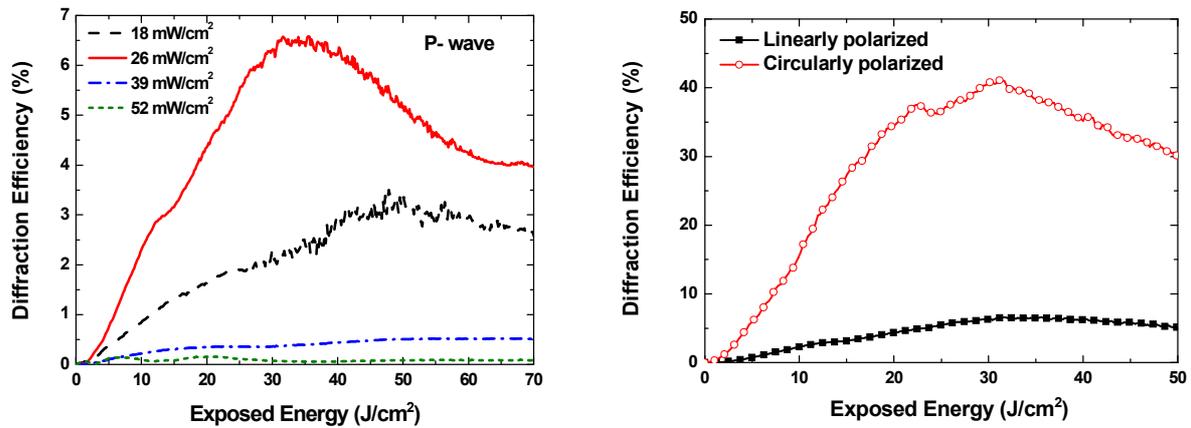


圖 8 偏振全像紀錄時繞射效率之動態變化。

(a).正交線偏光模式，不同記錄光強度之實驗結果；(b)兩種模式紀錄結果比較

3. 雙波長全像(Two-color holographic recording)紀錄性質研究：

另一個，在研究 PQ/PMMA 體積全像高分子的光化學反應時，發現的特性為 PQ 染料分子具有四能階光吸收激發之特性，可以提供高分子材料新穎的雙波長全像紀錄技術。原理說明如下：PQ 分子的結構示如所示，這一類具有 C=O 雙鍵的環狀分子稱為 α -diketone 分子，它們吸收光激發為自由基的能階結構通常具有圖 9 的四能階結構，可以透過光子(gating beam)由 S_0 激發至 S_n ，然後很快的掉入暫穩態 T_1 ，此時分子變成自由基可以引發化學反應，或者在吸收另一個光子(writing beam)的能量，激發至激發態 T_n ，為另一種形式的自由基引發化學反應，通常 $S_0 \rightarrow S_n$ 之躍遷所需的光子能量會大於 $T_1 \rightarrow T_n$ 之躍遷的能量。

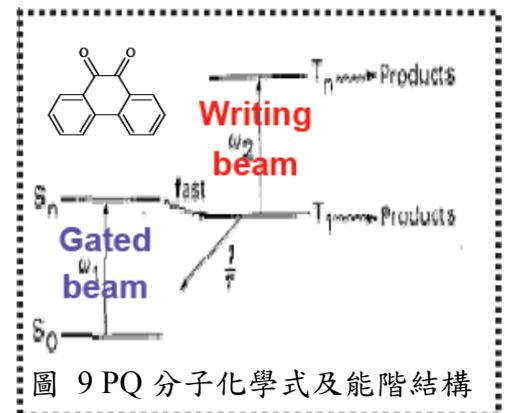


圖 9 PQ 分子化學式及能階結構

換言之，這個機制可以讓我們設計一種新穎的雙波長全像紀錄，舉例來說：我們可以用均勻的短波長光照射來引發 $S_0 \rightarrow S_n$ ，同時引入干涉調制的長波長雷射光引發 $T_1 \rightarrow T_n$ 之躍遷做為全像紀錄，換言之，也就是利用兩個不同波長的光波引發全像紀錄，故稱為雙波長全像紀錄。對 PQ/PMMA 材料，可以藉由觀察其吸收光譜來選取適當的光波長，我們可以選擇波長為 325 nm 為激發光，而紀錄雷射光波長為 647nm，實驗結果如圖 10 所示，紀錄全像光柵的繞射效率隨著紀錄時間變化的關係圖。從其中，我們可以看到若僅有紅光作紀錄，繞射效率非常之弱，幾乎不可能紀錄全像，但加上紫光激發後，繞射效率增加了 1000 倍，同時材料的敏感度也大幅的提升。這個實驗結果顯示材料在執行雙波長全像紀錄之可行性。同時，我們也可以看到，當 325 nm 激發光打開時，繞射效率會急速的上升，而其關上時，繞射效率則維持一個定值，表示雙波長紀錄特係讓材料具有選擇性紀錄的可能性。

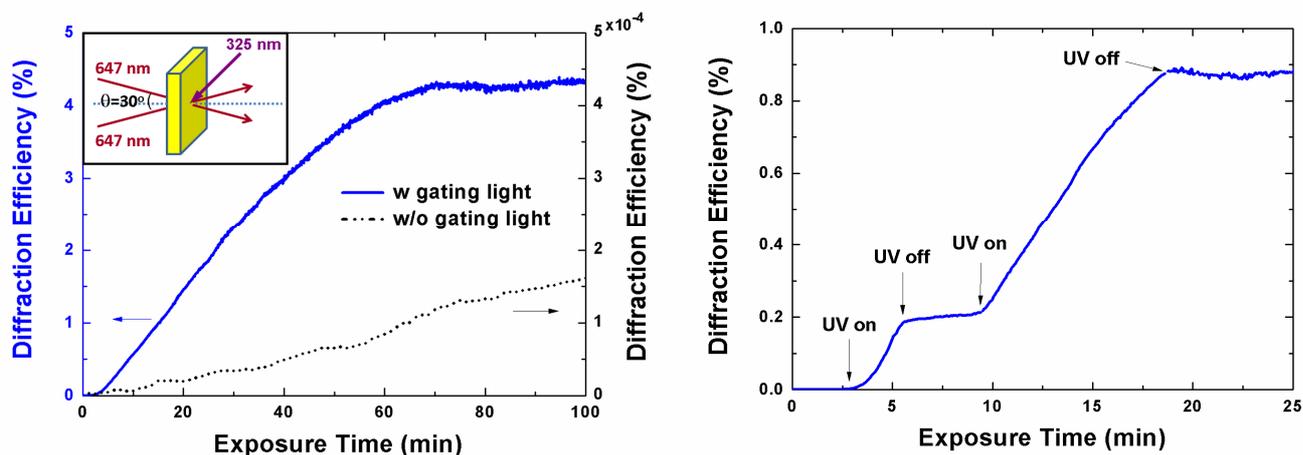


圖 10 雙波長全像紀錄時繞射效率之動態變化。

(a).紀錄全像光柵的繞射效率隨著紀錄時間變化之實驗結果；(b)激發光開關對記錄之影響

三、計畫成果自評

各項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[1-16]。進一步的高分子材料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、期刊及會議論文發表

- Po-Lin Chen, Sheng-Lung Cho, Shiuan Huei Lin, Ken Y. Hsu and Sien Chi, "Two-wavelength holographic recording in thick phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer," Opt. Eng. 51, 030503, 2012.
- Wei-Chia Su, Yu-Wen Chen, Yu-Jen Chen, Shiuan Huei Lin and Li-Karn Wang, "Security optical data storage in Fourier holograms," Applied Optics, Vol. 51(9), 1297-303, 2012.
- V. Marinova, R. C. Liu, S. H. Lin, and K. Y. Hsu, "Quasi-nonvolatile storage in Ru-doped Bi₁₂SiO₂₀ crystals by two-wavelength holography," Optics Express, Vol. 20, No. 18, 19628-19634, 2012.
- Cheng-Jung Ko, Yi-Nan Hsiao, Shiuan Huei Lin, Po-Lin Chen, Wha-Tzong Whang, Ken-Yu Hsu, Yu-Sheng Hsiao and Chun-Chao Chen, "Nitroanilines enhancing the holographic data storage characteristics of the 9,10-phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer," Journal of Applied Polymer Science, 2012, DOI:10.1002/APP.37835
- Ko, Cheng-Jung; Chen, Po-Lin; Hsiao, Yi-Nan; Lin, Shiuan-Huei; Whang, Wha-Tzong; Hsu, Ken Y.; Huang, Kuo-Jung; Che, Chun-Chao; Tseng, I-Hsiang, "Holographic recording characteristics and physical mechanism of zinc methacrylate/nitroaniline-co-doped poly(methyl methacrylate)/9,10-phenanthrenequinone photopolymers," Polymer Engineering and Science, 2012.
- Ko, Cheng-Jung; Lin, June-Hua; Chung, Chun-I; Hsiao, Yi-Nan; Lin, Shiuan-Huei; Chao, Yu-Faye; Whang, Wha-Tzong; Hsu, Ken Y.; Tseng, I-Hsiang; Tsai, Mei-Hui, "Effect of N-substituent on the Holographic recording characteristics of p-Nitro-t-aniline-co-doped poly(methyl methacrylate)/9,10-phenanthrenequinone photopolymers," Journal of Modern Optics, 2012.
- Shiuan Huei Lin, June Hua Lin, Po-Lin Chen and Ken Y. Hsu, "Observation of the two-wavelength holographic recording in phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer," The 8th

International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, St. Petersburg, Russia, July 3-5, 2012.

8. Shiuan Huei Lin, June Hua Lin and Ken Y. Hsu, "Novel holographic recording in phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer and its applications," (Invited paper) to be presented in Information Optics and Optical Data Storage II (PA109), SPIE Photonic Asia, November, 2012.
9. Vera Marinova, Ren Chung Liu, Shiuan Huei Lin, Hung-Chun Lin, Yi-Hsin Lin, and Ken Y. Hsu, "Rh-doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystals - near infrared properties and applications," to be presented in IWH 2012, November, 2012.
10. Shiuan Huei Lin, and Ken-Yu Hsu, "Characterization of Polarization Holographic Recording in Phenanthrenequinone-doped Poly(methyl methacrylate) Photopolymer for Optical Memory," to be presented in IWH 2012, November, 2012.
11. Ren-Chung Liu, Vera Marinova, Shiuan Huei Lin, and Ken-Yuh Hsu, "Two-wavelength holography in Ru-doped $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystals," to be presented in IWH 2012, November, 2012.
12. June Hua Lin, Sheng Lung Cho, Shiuan Huei Lin, Ken Yuh Hsu, and Sien Chi, "Experimental studies on two-wavelength holographic recording in thick phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer," to be presented in IWH 2012, November, 2012.
13. Shiuan Huei Lin, "Novel holographic recording in phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer for holographic memory," (Invited paper) to be presented in IWH 2012, November, 2012.
14. Vera Marinova, Ren Chung Liu, Shiuan Huei Lin, Hung-Chun Lin, Yi-Hsin Lin and Ken Yuh Hsu, "Effect of platinum group doping metals on the near-infrared properties of sillenite crystals," to be presented in OPTIC 2012, December, 2012.
15. Ren Chung Liu, Vera Marinova, Shiuan Huei Lin and Ken Yuh Hsu, "Two-wavelength holography in Ru-doped sillenite crystals," to be presented in OPTIC 2012, December, 2012.
16. June Hua Lin, Shiuan Huei Lin, Ken Yuh Hsu, "Modeling two-wavelength holographic recording in photopolymer doped with α -diketone dye molecules," to be presented in OPTIC 2012, December, 2012.

出席國際學術會議心得報告

計畫編號	NSC 100-2112-M-009 -005
計畫名稱	體積全像技術用於資訊儲存及三維立體顯示之研究
出國人員姓名 服務機關及職稱	林烜輝 國立交通大學電子物理系 副教授
會議時間地點	101 年 7 月 2 日至 7 月 5 日 俄羅斯聖彼得堡市
會議名稱	(中文) 第 8 屆國際光學+光電設計與製作研討會 (英文) The 8 th international conference on Optics and Photonics Design & Fabrication
發表論文題目	(中文) PQ/PMMA 高分子全像材料的雙波長全像紀錄之研究 (英文) Observation of two-wavelength holographic recording in PQ-doped PMMA photopolymer

一、參加會議經過

“The 8th international conference on Optics and Photonics Design & Fabrication”是由日本應用物理學會主辦，俄羅斯聖彼得堡大學光學技術學院合辦之光電學術研討會，此會議兩年舉辦一次，隔屆於日本海外舉辦，今年 7 月 2 日至 7 月 5 日之間於聖彼得堡市舉行。由於這是一個主題會議，故報告的論文主題十分集中，涵蓋各式光學設計、元件製作、光學系統與新穎應用，包含 4 大主題、11 場研討會議以及兩場壁報論文會議，共計有 180 多篇論文發表，204 人次來自 13 個國家的研究學者參與，可以說是光學設計製程主題規模相當大的會議。會議期間，本人除在「光學系統」主題會議擔任主持外，也發表一篇論文，並藉此機會聆聽其他相關子題的演講，並在會議期間與國際學者進行交流討論。

7 月 2 日為會議第一天，首先登場的是研討會大會邀請論文(plenary talk section)，大會邀請三位傑出學者發表論文，首先是由聖彼得堡大學的 V. N. Vasilyev 博士報告，說明電腦輔助光學設計的發展，內容深入淺出介紹自電腦發明後，如何將機械設計中的電腦輔助工具，加入光學設計的理論，發展成為一套十分有用的光學系統設計工具，影響光學發展甚巨，現在已成為光學研究

人員不可或缺的技术，未來也持續加入新的元素，繼續發揮更多的影響。然後是來自德國蔡司公司的 C. Menke 博士發表演講，闡述自由曲面光學元件的挑戰與機會。報告中提出，自由曲面方式將給予光學設計極大的自由度，所以可以研究人員可以發揮的想像力也更多，但同時各式不同的曲面，會給予不同的特性，如何規範設計的標準準則，也變得十分重要，報告中特別討論自由曲面的新的發展方向，包括：像差理論、表面設計與最佳化準則，並說明這兩個因素將是最關鍵的步驟，了解清楚可讓研究人員得到此種設計技術的最大好處。第三篇論文是由日本東京大學 K. Kuroda 教授發表，講述偏極化全像紀錄的理論與實驗結果。黑田博士特別強調將他們發展的模型推展到任一篇振光波全像的紀錄與讀取特性，並從中說明不同偏極化之重建光波對繞射光偏極化的影響，也以實驗證明他們的理論，對我們實驗室發展 PQ/PMMA 材料之偏極化全像紀錄將很有幫助。

當天傍晚還進行了第一個主題，光學設計與模擬。首先由來自 Nikon 公司的 H. Harada 博士發表邀請論文，說明數位相機鏡頭的發展與展望，文中特別強調當相機鏡頭設計已經發展超過數十年，成為成熟的技术，未來的展望將是如何設立更新的準則來發展相機的設計，特別是立體視差照相機的鏡頭，以及傳統相機鏡頭的柔焦清晰度與建層感的判斷準則，也說明這些設計準則將放入 Nikon 各式相機的鏡頭當中，增進其功能，十分有趣，引起與會人員熱烈討論。接下來兩篇論文討論微光學元件對光學微影相機系統與照明的應用，嚐試將目前短 UV 曝光系統的解析度提到更高，這對半導體製程會是一個非常有用的技术。然後，兩篇論文討論天文觀測光學系統之前瞻設計，特別是強調適應性光學元件對其成像解析度的影響，十分有趣。晚上，我們參加大會安排的晚宴，跟許多與會的學者專家進行交流，不管是學術層面或文化交流，都十分有趣，大家相談甚歡，我們也可以藉此提升台灣國際學術知名度，特別是對光學設計這個國內光電發展非強項技术，十分成功。

7月3日為會議第二天，上午的主題為”光學設計與模擬”，共有6篇論文發表。其中，來自美國 QED 技术公司的 G. W. Forbes 博士發表他們在自由形式光

學元件之發展，他提到現今的光學系統要求鏡頭越來越簡單以便符合更多攜帶式電子產品的應用，讓自由形式光學元件的發展更形重要，同時如何將設計法則變得更簡單與更準確式此技術發展的瓶頸，他們提出現在已將調整式正交多項式的設計方式更廣泛用於對稱型的非球面透鏡的評估與設計，這可以推廣至發展自由形式光學元件的設計準則，內容十分新穎有趣，與會人員反應熱烈，這篇論文也獲得大會最佳演講論文。其次，來自日本宇都宮大學的 Y. Miyamoto 研究生發表他們如何利用全像技術進行甜甜圈式的光束產生與偵測，提出設計全像元件來補償光學元件的相位失真將可有效改善此類光束光分佈的正確性，對我們發展全像應用將有許多啟發。中午時間，大會安排文化交流節目，邀請各國與會人員參觀俄羅斯的傳統修道院 Valaam Monastery，讓我們對俄國傳統之宗教東正教有更深一層的了解。下午則進行”光學元件與器件”會議主題，共計有 6 場演講。

7 月 4 日為會議第三天，上午的會議主題為”光學系統 I, II”，共有 12 篇論文發表，其中，本人的演講安排在此天，發表我們研製之光學高分子材料之雙波長全像紀錄特性分析與應用研究，啟發此類材料新的發展方向，本演講主要集中於其光學性質與全像紀錄性質特性等參數研究，獲得十分熱烈之迴響，除了聽眾當場問不少問題之外，還有聽眾於休息時間來進一步討論。其他，也是光學系統的技術與應用相關主題，其中，本校電控系邱一教授也發表一個邀請演講，講述微光機電元件之製作與其在光儲存積體系統的應用，是一篇十分有參考價值的論文。下午的主題則集中在新型技術與綠能應用方面，當日下午的演講，共有 9 篇論文發表，都相當精彩。其中中央大學孫慶成教授的 LED 照明技術的研究演講，相當精彩，獲得熱烈之回響。

二、與會心得

1. 光學設計與製作在光電研究與工業中扮演舉足輕重的角色，歐、美、日各先進國家都有許多大學及公司的研究群積極進行各項相關研究，研究項目從原件之設計、製作、量測、到系統設計、分析、光電材料研發、到系統構裝、應用都

有，範圍廣泛，也已有不少令人注目的成果，顯示這是一個具有潛力的研究領域，然而我們的人力、物力有限，不能像美、日、大陸一樣，每一個題材都作，應該慎重選擇最關鍵性及對我們最有利的題目去研究。

- 2.目前我們的研究水平距世界最先進者仍有一段距離，但在基本觀念及基本技術之掌握已經相當良好，研究成果也有一些自己之特色，這從聽眾反應熱烈及外國學者向我們索取論文資料之情形可看出來。因此，我們應持續在這個基礎上努力向上發展。
- 3.聖彼得堡大學舉辦這個會議相當成功，不論會場佈置、議程安排，以及文化交流都安排得非常好，為各國學者相互交流及參觀最新的光電研究之好機會。本人深覺獲益良多。

三、建議

由於光電科技在高科技產業佔有重要地位，而其發展又極具動態性，因此，建議今後多鼓勵教授及研究生參加各型國際學術會議，以增進吾人在科技競賽中的競爭力量。本人能獲得貴會的補助是吾人之榮幸，另外，新進的研究人員更需要這一份支持，與國際上其他研究團體討論研發成果，並藉此與國際上傑出的研究人員當面研討，以培養更具國際觀的本土研究人力，為我國的科技研發盡一己之力，所以，建議貴會今後能給予更多機會補助新進的教授與研究生參加會議。

四、攜回資料名稱及其內容：

- 1.Technical Digest, The 8th international conference on Optics and Photonics Design & Fabrication。(會議論文摘要及光碟)。

國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2012/11/02

國科會補助計畫	計畫名稱: 體積全像技術用於資訊儲存及三維立體顯示之研究
	計畫主持人: 林烜輝
	計畫編號: 100-2112-M-009-005- 學門領域: 原子分子及光學物理—實驗
無研發成果推廣資料	

100 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：林烜輝		計畫編號：100-2112-M-009-005-					
計畫名稱：體積全像技術用於資訊儲存及三維立體顯示之研究							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	1	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	1	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	6	0	100%	篇	數個計畫共同成果
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	10	0	100%		數個計畫共同成果
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	1	0	100%	件	數個計畫共同成果
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無

專利： 已獲得 申請中 無

技轉： 已技轉 洽談中 無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫旨在探索『體積全像技術用於資訊儲存及三維立體顯示之研究』，內容包括兩大項目：(1). 研製低收縮高分子體積全像材料，進行新穎的全像紀錄機制與特性研究，並進行資訊儲存應用研發。(2). 研究全像 3D 顯示器技術，著重於基礎的理論與光學系統設計，顯示器件與光源元件之探討。綜合理論與實驗之執行，吾人得到許多關鍵性成果，除了可作為後續整合發展全像資訊儲存處理以及全像 3D 影像顯示系統的重要基礎，應用這些成果後續可產出許多關鍵智材，協助國內光電產業的發展。