

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

創新異質整合智慧型手機相機模組之研究--子計畫六：快速動態反應之液晶透鏡電極與配向設計(2/3) 期中進度報告(完整版)

計畫類別：整合型

計畫編號：NSC 98-2220-E-009-019-

執行期間：98年08月01日至99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：黃乙白

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 06 月 03 日

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

題目：創新異質整合智慧型手機相機模組之研究子計畫六-快速
動態反應之液晶透鏡電極與配向設計

Development of Electrode and Alignment Design for Fast response Liquid Crystal lens

計畫類別：☐ 個別型計畫 ☒ 整合型計畫

計畫編號：96WFA0600335

執行期間：97 年 08 月 01 日至 100 年 07 月 31 日

計畫主持人：黃乙白

共同主持人：無

計畫參與人員：廖凌嶢、李俊賢、林裕閔

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：國立交通大學光電工程學系(所)

中 華 民 國 九 十 九 年 五 月 卅 一 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫年度報告

題目：創新異質整合智慧型手機相機模組之研究子計畫六-快速動態反應之
液晶透鏡電極與配向設計

“Development of Electrode and Alignment Design for Fast response Liquid Crystal lens”

計畫編號：96WFA0600335

執行期限：97 年 8 月 1 日至 100 年 7 月 31 日

主 持 人：黃乙白

參與人員：廖凌峯、李俊賢、林裕閔

一、摘要

本計畫研究的目標為：針對分子轉向式的液晶透鏡，設計快速變換焦距並達到理想聚焦效果的主動式液晶透鏡；本年度的計畫使用電壓強力驅動方法(Over-drive method)，並且以高阻值之高分子透明導電層取代厚介電層結構，改善液晶透鏡聚焦反應時間。同時使用兩種方法，已經可將聚焦反應時間縮短至 0.2sec 之內，並且將操作電壓降低至 3.3Vrms。

此外，為充分了解液晶分子在電壓強力驅動下的反應情況，本團隊使用共焦顯微鏡(FCPM Fluorescence Confocal Polarizing Microscope)，逐層掃描液晶層，並且記錄各層中液晶分子在電壓驅動下的轉動角度，隨時間的連續變化情況。此種方法，比較傳統的干涉圖形，更能顯示液晶分子的實際角度，而非僅呈現相對的相位差。

關鍵詞：Multi-electrode Driving、MeDLC、LC Lens、High Resistance Layer、Confocal、FCPM

The object of the proposal is to design a fast-switching focal length and superior focusing active liquid crystal lens (LC lens), in term of

nematic LC lens. We applied Over-drive method to improve focusing time of LC lens. Moreover, a high resistance polymer layer substitute traditional thick glass layer to improve the response time of LC lens. By using two methods, we have demonstrated less than 0.2 sec focusing time with 60um LC cell gap. The operating voltage was also reduce to down to 3.3 Vrms.

Furthermore, to discover the reaction of LC molecular, FCPM (Fluorescence Confocal Polarizing Microscope) was utilized to scan the LC layer and recorded the exact orientations, which the conventional interference pattern only shows relative phase retardation and cannot investigate these features.

二、計畫緣由與目的

傳統透鏡可由玻璃、聚合物、可穿透性材料等製造產生，並擁有固定之焦距。藉由若干透鏡之組合，加上機械式移動控制，可產生連續變焦式透鏡系統，但若干光學元件之組合會造成體積龐大、笨重等問題。因此，可變焦距式單一透鏡系統將有利於許多應用上。

單一透鏡變焦原理，基礎的概念是藉由材料

本身形狀或折射率梯度地改變造成透鏡中央及邊緣之光程差來產生光會聚集發散的效果。在改變材料形狀方面，一種油水介面的液體透鏡，藉由周圍電極電壓轉換，可使油水界面形狀產生變化，而達到改變焦距的效果；折射率梯度改變方面，聚合物及液晶透鏡則為廣泛應用的例子。由於液晶材料可藉由電場的改變達到良好的控制效果，其相關研究也已經廣泛地應用於液晶顯示器、光學調變器及各種光學控制器中，其相關產業及技術可說是十分成熟，故本計劃將著眼於液晶透鏡之研究，發展出輕薄、低功耗、可變焦距式單一液晶透鏡。

傳統液晶透鏡主要利用液晶分子隨電場轉向排列的特性來改變折射率，進而改變元件焦距[1-9]。現階段較常見的幾種液晶透鏡，都已具備良好的變焦效果，也就是能夠透過不同的控制電壓達到不同的焦距。但在目前液晶透鏡發展都有著聚焦效果不佳、控制電壓過大以及反應時間過慢的缺點。因此，本計畫發展重點目標為：針對分子轉向式的液晶透鏡，設計快速動態反應之電極結構以及配向方法，以期達到良好成像的品質及快速的變焦效果，並使其有效地降低操作電壓。

三、 實驗方法及結果

3.1 概念及設計

使用多電極驅動結構之液晶透鏡，可以達到理想的折射率漸變曲線，並且有效地減少像差；此外單透鏡的焦距已縮減至僅 4cm，搭配多重透鏡可使全焦長(TTL)控制在 1.5cm 內，符合手機鏡頭的規格。

然而，為了達到連續的折射率曲線分佈，必須在不連續的多重電極與液晶層間加入介電層(Dielectric Layer)，此一介電層厚度需達 700 μ m（目前使用 SiO₂ 玻璃），結果造成反應時間增加(>5 秒)且操作電壓過大(34Vrms)的問題。

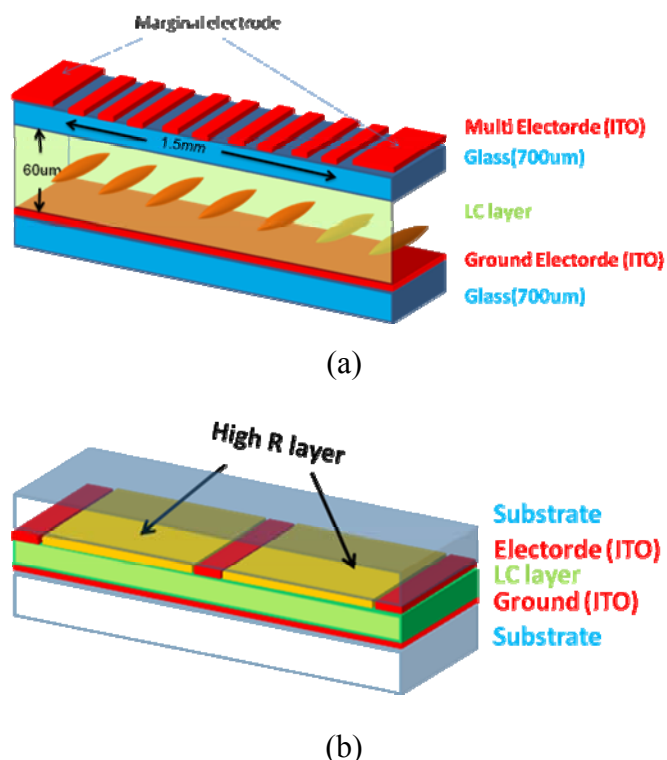
為了降低液晶透鏡的操作電壓，並且減少聚焦反應時間，本團隊提出兩個想法：電壓強力驅動方法(Over-drive method)，以及使用高阻值之高分子透明導電層取代厚介電層結構。前者利用類

似液晶電視螢幕所採用之強力驅方法(Over-drive method)，如圖一(a)在多電極結構外側增加一組電極。在開啟操作電壓之前，先施予極短時間的高電壓，使液晶分子預先產生類似透鏡離型的分佈，藉以減少液晶透鏡聚焦所需的反應時間；後者則是在電極之間，塗佈以高阻值之高分子透明導電層，如圖一(b)所示。藉此造成連續的電壓趨勢分佈。因此，可以取代原先的介電層，改將電極緊貼於液晶層外側。大幅降低液晶透鏡的操作電壓，同時亦可相當程度地減少聚焦反應時間。

藉由此兩種方式，理論上應能夠同時降低聚焦反應時間，以及液晶透鏡操作電壓。以下將會分別討論兩種方法的詳細過程。

3.2 電壓強力驅動方法

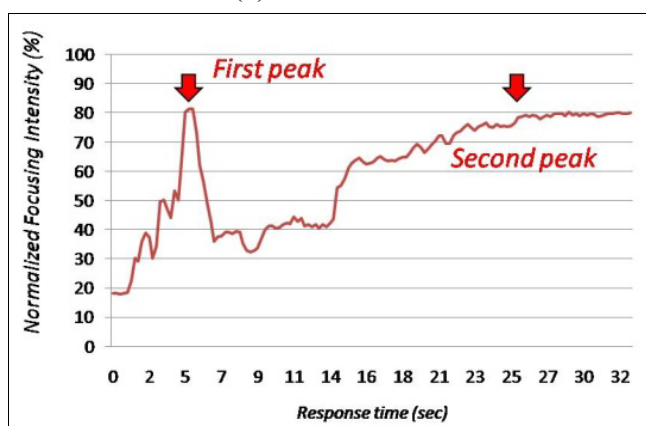
電壓強力驅動方法(Over-drive method，以下簡稱 OD method)，是在原有的多電極結構外側，另外增加一組外側電極(Marginal electrodes)，在開啟操作電壓前，先行施予極短暫的高電壓。待液晶分子形成類似透鏡分佈的離型時，再切換至優化過的操作電壓，使液晶分子維持在聚焦的穩定狀態。



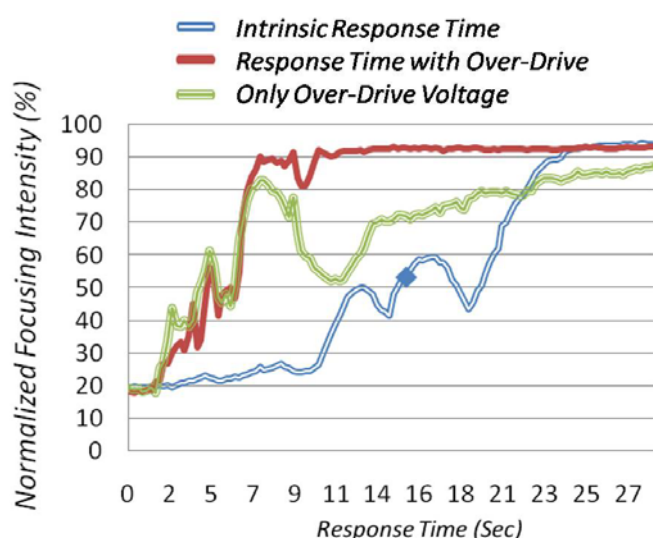
圖一、(a)在多電極結構外側增加一組電極。(b)在電極之間塗佈高阻值透明導電層。

此一方法的優點在於，能夠迫使液晶分子快速轉動至聚焦位置附近，再以優化過的操作電壓使液晶分子微調至完美聚焦位置。藉此，能夠大幅度縮短液晶透鏡聚焦所需的總反應時間。以本團隊所製作之柱狀透鏡實體為例，液晶層厚度為 60um 之液晶透鏡，電極與液晶層間隔 700um 之介電層(使用 SiO₂ 玻璃)，未使用 OD method 前，聚焦總反應時間需 24sec 以上；若先施予 OD 電壓，再切換為優化過的操作電壓，則總反應時間可降低至 7sec。

在僅只施予強力驅動電壓 (Over-drive Voltage) 下，而不切換為一般操作電壓的情況，液晶透鏡會有一瞬間近似於完美聚焦的暫態出現，但隨即消失，液晶分子排列被破壞而離開聚焦狀態，如圖二(a)所示。

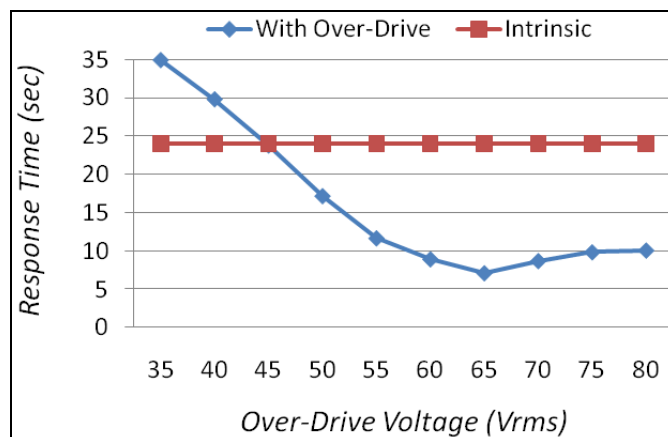


(a)



(b)

圖二、(a)液晶透鏡聚焦光強度隨時間的變化。(b)僅施予 over-drive voltage 下的聚焦光強度變化。



圖三、在不同 over-drive 電壓下的聚焦反應時間。

因此，使用 OD method，在外側電極上施予高電壓，必須在液晶透鏡出現第一次聚焦峰值 (First Peak) 時切換為優化過的操作電壓，將液晶分子排列鎖定在穩定聚焦狀態。以維持持續聚焦的液晶透鏡特性。

其結果如圖二(b)所示，縱軸為透鏡聚焦光強度，橫軸為時間軸。在未使用 OD method 之前，多電極結構之液晶透鏡達到穩定聚焦狀態，需要反應時間為 24sec(如圖之藍色線)。而使用 OD method 後，僅需要 7sec 即可達到完美聚焦狀態(如紅線所示)。

多電極結構之液晶透鏡在不同的 over-drive 電壓下進行 OD method 驅動，並且在液晶透鏡出現第一次聚焦峰值時，切換為一般操作電壓。當 over-drive 電壓過大時，聚焦反應時間出現一反曲點。推測可能是過大的電壓，導致液晶分子過轉所致，如圖三。

如先前所述，倘若僅在外側電極上施予 over-drive 電壓，而不切換為一般驅動電壓。在第一次聚焦峰值後，液晶透鏡聚焦光強度旋即下降，但在數秒後，聚焦光強度重新上升，並且達到穩定態。此一現象與液晶分子的轉動角度有關，將於共焦顯微鏡 (FCPM Fluorescence Confocal Polarizing Microscope) 章節詳述。

3.3 高阻值透明導電層結構

在本團隊提出的電壓強力驅動方法中，雖然已經大幅度降低液晶透鏡的反應時間，但動輒數秒的反應時間還是無法滿足需求，而且所需要的電壓太大(30V_{rms})，導致操作上的不方便。這是因

為傳統結構未能充分運用所施加之能量，大多數的電場等位線都因電場平衡的原因分佈於液晶層外，僅有一小部分真正用於驅動液晶層，使其有透鏡結構的相位差。圖四所示為一傳統液晶透鏡結構，由模擬結果可發現，在透鏡開口範圍僅利用了所施加電壓的一小部分來製造漸變的電廠分布，如此導致不必要的電場消耗，造成液晶透鏡需要施加很大的電壓。

高阻值透明導電層結構 (Transparent High-Resistance coating 以下簡稱 Hi-R coating)。是在液晶透鏡的內側鍍上一種高電阻值的聚合物，並以所連結的電及控制之，希望能產生一連續電壓分佈曲線(voltage gradient distribution)，以期產生液晶透鏡之漸變的相位變化效果。這種方法的好處是，可以讓電壓無須消耗在介電層(玻璃)上，液晶分子緊貼著電極，直接受到電場影響，有助於大幅減低反應時間以及驅動電壓。

本團隊將此結構搭配 OD-method，其 OD 電壓對應反應時間的結果如圖五所示，其中可發現，僅需 15Vrms 的 OD 驅動即可達到大幅降低反應時間至 0.2 秒以下的結果。

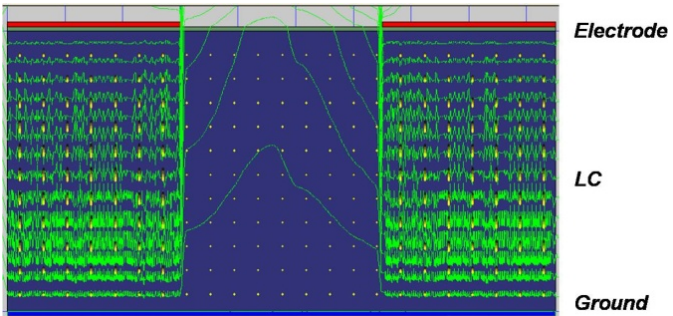


圖 四、基本單電壓控制電極液晶透鏡結構之驅動等電位線分布圖

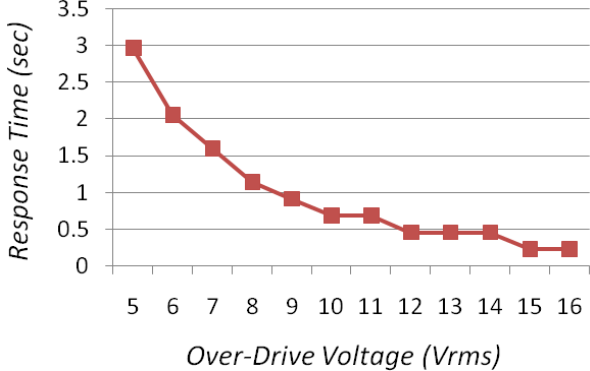


圖 五、在 Hi-R coating 中 OD method 對反應時間的影響。比較本團隊上年度以及本年度之結果。在上

個年度的計畫中，本團隊使用多電極驅動方式大幅提升聚焦品質，在 OD method 的驅動下已將反應時間由原本的 23.5 秒降低至 7.1 秒。在本年度中，本團隊提出全新的結構概念，即 Hi-R coating 之液晶透鏡，在搭配 OD method 的驅動下，更將反應時間大幅縮減至 0.2 秒以下，其結果整理如表一。此一結果已將液晶透鏡的應用層面提升至可實用的階段，更為相關研究問題的解決跨進一大步。

表 一、上年度多電極驅動(External)與本年度 Hi-R coating (Internal)的結果整理。

Structure	Operative Voltage	Over-Drive Voltage	Response Time without OD	Response Time with OD
External Electrodes	65Vrms	31Vrms	23.5sec	7.1sec
Internal Electrodes	15Vrms	3.3Vrms	12.5sec	0.2sec

3.4 共焦顯微鏡 (FCPM)於液晶透鏡之應用

如先前所述，僅在外側電極上施予 over-drive 電壓，在第一次聚焦峰值後，液晶透鏡無法穩定聚焦，聚焦光強度下降。但在數秒後，液晶透鏡將會重新聚焦，而聚焦光強度緩慢上升。

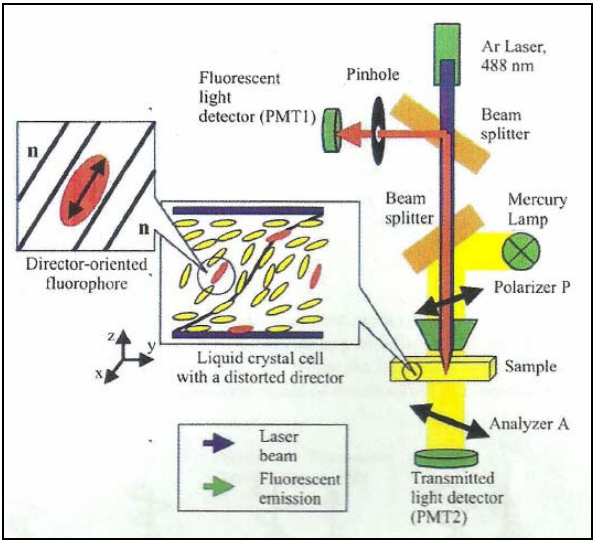


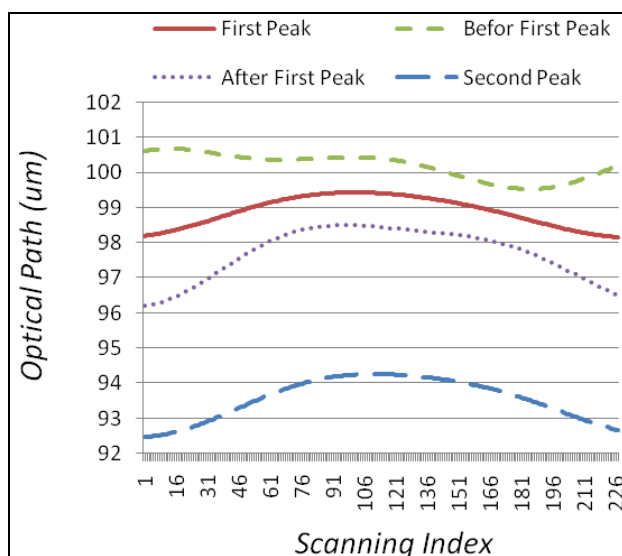
圖 五、FCPM 儀器示意圖。(Pramana – J. phys. Vol.61, August 2003,pp.373-384, Kent, Ohio, USA)

此一現象，本團隊使用 FCPM (Fluorescence

Confocal Polarizing Microscope)儀器進行詳細的探討。首先在液晶分子間混入特定成分、濃度的螢光分子(dye molecule)，並以 FCPM 對液晶層進行逐層掃描時。螢光分子被 FCPM 所射入的偏極化雷射光(波長 488nm)所激發，隨即放射出另一道螢光，如圖五。螢光光強度與雷射光光強度有關係，其中 θ 為螢光分子軸向，與雷射光極化方向之夾角。由於螢光分子順著液晶分子方向排列，因此夾角 θ 亦可以視為液晶分子排列方向，與雷射光極化方向之夾角。

藉由量測螢光強度，可以推算液晶層中任一時間，任一位置的液晶分子，其轉動角度與時間變化的關係。更進一步，由液晶分子轉動角度，可以推算液晶層中任一位置的折射率(n_{eff})，並且計算出液晶透鏡各位置上的光程(Optical Path)隨時間之變化。

圖六顯示，僅施予 over-drive 電壓下，液晶透鏡各位置的光程(Optical Path)隨時間之變化關係。對應液晶聚焦光強度狀況，將第一次聚焦峰值，與第二次聚焦時的光程標示後，即可觀察到，在第一次聚焦峰值與第二次聚焦時，液晶透鏡外側與鏡心之間具有相同的光程差，但其實際的光程則不相同。亦即在前後兩個時間點上，液晶透鏡具有相同的聚焦強度。然而，液晶層內部的液晶分子排列方式並不相同。



圖六、僅施予 over-drive 電壓下，液晶透鏡各位置的光程(Optical Path)隨時間之變化。

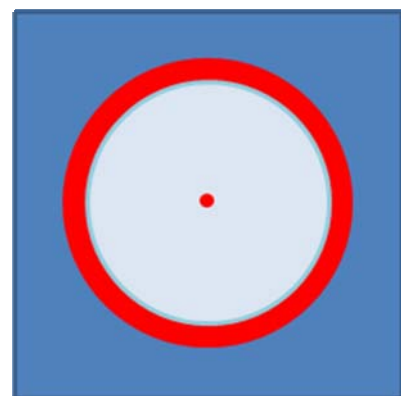
若進一步計算液晶分子旋轉角度與時間變化關係，則發現液晶透鏡外側的液晶分子，旋轉速度較快，且較早與束縛力平衡而停止轉動。反之，在液晶透鏡鏡心處的液晶分子，較晚停止轉動。是以前後共出現兩次相同的聚焦強度。

3.5 Circular Lens structure

目前本團隊所研究之結構皆為柱狀透鏡，但柱狀透鏡只能匯聚縱向的光，而無法匯聚橫向的光。液晶透鏡的最終目標是取代一般透鏡，所以我們的目標是做出圓形透鏡。

在 Hi-R coating 的液晶透鏡結構中，圓形透鏡的樣式是將 ITO 電極做在正中間，外面圍亦繞著一個圓形 ITO 電極，期望液晶分子能對著中央電極呈現均勻分佈，如圖七所示之結構上視圖。

圓形透鏡的結果如圖八所示，可以明顯見到根據先前理論其原型結構亦有良好的聚光效果，Intensity 的 peak 值可達 97%。其最短焦距大約為 3 公分。目前本團隊已經著手設計一三片透鏡的鏡組，期望藉由可調變焦距的兩片液晶透鏡與一固定的鏡片，設計出可變焦的一組變焦透鏡。



圖七、圓形透鏡示意圖，紅色區域是 ITO。

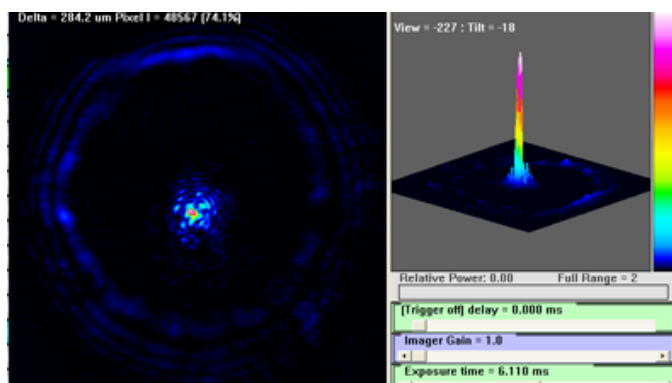


圖 八、球狀透鏡的 Light Intensity Distribution。

四、 結論與討論

本年度計畫最大的進展即是將液晶透鏡的反應速度縮短至0.2秒以下，在60um的液晶層厚度下，亦僅僅需要15Vrms的OD驅動電壓以及3.3Vrms的穩定驅動電壓，此一結果已將液晶透鏡的應用層面帶往另一層次，其實用性亦大幅提升。

在方法上，本團隊提出了兩個主要的方式。其一，在OD method部份，使用預先大電壓驅動，先使液晶透鏡產生近似透鏡相位的轉角分布驅動電壓，大幅降低了原本MeDLC的反應時間(23.5sec->7sec)。在此實驗中，本團隊亦採用了FCPM (Fluorescence Confocal Polarizing Microscope)進行液晶透鏡的液晶分子行為分析，不但能確實了解液晶透鏡的聚光行為，亦可求出絕對的液晶層相位變化，如此可對液晶透鏡進行更準確的研究。

其二，本團隊提出全新的結構概念，即Hi-R coating之液晶透鏡，在搭配OD method的驅動下，更將反應時間大幅縮減至0.2秒以下，而圓形結構的Hi-R coating液晶透鏡亦已完成，接下來將進行透鏡組結合之相關研究。

五、 發表成果

● Journal Paper:

1. Yi-Pai Huang, Lin-Yao Liao, and Chih-Wei Chen, " 2D/3D Switchable Autostereoscopic Display with Multi-electrically Driven Liquid Crystal (MeD-LC) Lenses," Submitted to *J. SID*.

2. Lin-Yao Liao, Yu-Min Lin, Yi-Pai Huang, and Han-Pin David Shieh, "Gradient Driven Liquid Crystal Lens Exhibiting Ultra-fast Focusing by Low Operating Voltages," will be submitted to *Optics Express*.
3. Lin-Yao Liao, Po-Yuan, Shieh, and Yi-Pai Huang, "Over-drive Method for Fast Focusing Liquid Crystal Lens Applications," is under writing.

● Conference Paper:

1. Lin-Yao Liao, Po-Yuan, Shieh, and Yi-Pai Huang, "Marginal Electrodes with Over-drive Method for Fast Response Liquid Crystal Lens Applications," *SID, P-134* (2010)
2. Yu-Min Lin, Lin-Yao Liao, Yi-Pai Huang, Han-Pin David Shieh, and Jih-Fon Huang, "Tunable-Focus Cylindrical Liquid Crystal GRIN Lens Exhibiting Fast Response and Low Operating Voltage," *Taiwan Display Conference* (2010) (to be published)
3. Chun-Hsien Lee, To-Chiang Shen, Lin-Yao Liao, Chih-Wei Chen, Yi-Pai Huang, and Han-Pin David Shieh, "Multi-Electrically Driven Cylindrical Liquid Crystal Lens," *IDMC*(2009)

● Patent:

低耗電且快速聚焦反應液晶透鏡 (已提出申請)

六、 參考文獻

- [1] H. Ren, Y. H. Lin, and S. T. Wu, Adaptive lens using liquid crystal concentration redistribution, *Appl. Phys. Lett.*, 88, 19 (2006)
- [2] H. Ren, Y. H. Fan, S. T. Wu, *Appl. Phys. Lett.* 83, 1515(2003)
- [3] H. Ren, S. T. Wu, *Appl. Phys. Lett.* 81, 3537 (2002)
- [4] H. Ren, S. T. Wu, *Appl. Phys. Lett.* 82, 22 (2003)

- [5] V. V. Presnyakov, K. E. Asatryan, T. V. Galstian, A. Tork, Opt. Express 10, 865 (2002)
- [6] B. Wang, M. Ye and S. Sato: IEEE Photonics Technol. Lett. 18, 79 (2006)
- [7] B WANG, M YE and S Sato , J J Appl. Phys., 45, 7813(2006).
- [8] H. Ren, Y.-H. Fan, S. Gauza, S.-T Wu, J. J. Appl. Phys 43, pp. 652 (2004)
- [9] D. K. Yang, S. T. Wu, “Fundamentals of Liquid crystal devices” (2006)
- [10] S. Sato, “Liquid-crystal lens-cells with variable focal length” , Jpn. J. Appl. Phys, 18, pp. 1679-1684 (1979)
- [11] A. F. Naumov and G. D. Love, “Control optimization of spherical modal liquid crystal lenses” Optics Letters, 23, 13 (1998)
- [12] Igor Guralnik, Mikhail Loktev, and Alexander Naumov, “Modal control principle: a new way to the design of liquid crystal adaptive optics devices” Proc. SPIE Vol. 4338, p.p.171-181.
- [13] A. F. Naumov and M. Yu. Loktev, “Liquid-crystal adaptive lenses with modal control” , OPTICS LETTERS, Vol. 23, No. 13, July 1, 1998.