

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 創新異質整合智慧型手機相機模組之研究--子計畫四：創新液晶變焦透鏡應用於手機相機模組化鏡頭之實現(3/3) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型  
計畫編號：NSC 99-2220-E-009-005-  
執行期間：99年08月01日至100年07月31日  
執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系(所)

計畫主持人：趙昌博

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：陳秋豪  
碩士班研究生-兼任助理人員：黃子凡  
博士班研究生-兼任助理人員：陳緯達

公開資訊：本計畫可公開查詢

中華民國 100 年 10 月 31 日

中文摘要： 本計畫為開發一新型可調變焦距透鏡模組，利用液晶材料之雙折射率特性及液晶分子隨電場方向排列的特性，等效為漸變折射率(GRIN)之特殊光學透鏡，再加以調變不同驅動電壓大小，近而改變液晶透鏡之等效折射率。此折射率可產生焦距隨著電壓大小不同而有所變化，達到變焦之效果，得以取代傳統之玻璃或塑膠鏡片。計畫第一年，首先架構出變焦液晶透鏡之基本理論推導模型，並分析驗證液晶透鏡之光學性質與電場之關係，並運用模擬軟體對電場及光學性質加以佐證，設計出特殊驅動方法之液晶透鏡，並且製作液晶透鏡實體，搭配鏡頭模組驗證理論分析。另外建立標準之光學檢測系統，觀察液晶透鏡之干涉條紋推導出透鏡之光學成像性質，並建構一套焦距量測系統，以配合完成自動變焦液晶透鏡模組之前置作業。第二年開始以第一年所製作液晶透鏡為基礎，並整合整合子計畫五、子計畫六研發材料之新型液晶透鏡，配合第一年所建構之光學檢測系統加以分析實驗，並於第二年後期結合子計畫三之驅動晶片使智慧型照相模組前端部件更趨於完善。第三年將液晶透鏡與驅動晶片封裝與模組化，並加入子計畫一之防手振系統並利用子計畫三之數位影像修正系統補償提升影像品質，後期與CMOS 影像感測器結合，最後完成自動對焦/變焦之液晶透鏡與光學防手振之智慧型像機系統整合。

英文摘要： This proposal is to design a novel tunable lens module using the birefringence property of liquid crystals (LC). The tunability of the designed LC lens in the focus length is made possible by adjusting applied field to turn the LCs inside the lens to desired postures, acting as an gradient index lens (GRIN). This LC lens is best suitable for replacing moving objective lens in the compact cameras module (CCM) for mobile phones to implement the functions of auto-focusing and zooming. It is advantageous to replace conventional lens with lightweight and compact in some applications, include micro-lens module, cellphone component, fixed focal length web camera, blue-ray disk, three-dimension (3D) display, and optical tweezer. One can design positive and negative LC lenses to be combined with CCDs with conventional lens components for the LC lens module in order to performing auto-focusing and zooming.

In recent years, the on-line tunability in the focal length of a common variable focus lens is achieved by the mechanical motion of the individual lenses in CCM. The control mechanism for lens motion is generally complicated, and the movements of the lenses usually need a large space. To remedy the problem, the LC tunable lens is repurposed and used in the CCM herein to save space in mobile phones. In the first year of project execution, it is planned to establish the optical model of the LCs and predict the resulted index change distribution and the focus length. The theoretical predictions

are also validated by commercial software. With the LC lens well designed, the LC lenses are optimized to lead to best focusing capability with a measure defined. Finally, in this year, an inspection machine for measuring the capability of the designed LC lens. In the second year, based on the experience gained in the first year, new LC materials leading to low voltage drives and fast response offered by sub-projects 5 and 6 are adopted for a better tunable LC lens. Also conducted in this year are combining the developed LC lens with the color compensation chip developed by sub-project 3 to achieve high color gamma. In the last year, the naturally-developed LC CMM is integrated with the image stabilizer developed by sub-project 1 to form the novel CCM for camera phones, as proposed by the net-proposal.

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

創新異質整合智慧型手機相機模組之研究

子計畫(四)：創新液晶變焦透鏡應用於手機相機模組化鏡頭之實現

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC99-2220-E-009-005

執行期間：97年08月01日至100年07月31日

執行機構及系所：國立交通大學電機與控制工程學系(所)

計畫主持人：趙昌博 教授

計畫參與人員：陳緯達 交通大學電機與控制工程研究所  
陳秋豪 交通大學電機與控制工程研究所  
黃子凡 交通大學電機與控制工程研究所

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 一 〇 〇 年 十 月 三 十 日

# 目 錄

目 錄.....	II
中文摘要.....	III
英文摘要.....	IV
1. 前言 .....	1
2. 研究目的 .....	2
3. 文獻探討 .....	4
4. 研究方法 .....	5
4.1 多圈電極液晶透鏡 .....	5
4.2 快速反應時間之液晶透鏡 .....	8
4.3 可調光軸之液晶透鏡 .....	10
4.4 低電壓之液晶透鏡設計 .....	14
4.5 負型液晶透鏡 .....	19
4.5.1 負型液晶透鏡設計.....	19
4.5.2 多圈電極製程.....	25
5. 結果與討論 .....	28
5.1 多圈不等寬度電極之液晶透鏡 .....	28
5.2 快速反應時間之液晶透鏡 .....	28
5.3 可調光軸之液晶透鏡 .....	28
5.4 低驅動電壓液晶透鏡 .....	29
5.5 多圈不等寬度電極之液晶負透鏡 .....	29
6. 參考文獻 .....	30
7. 計畫成果自評 .....	33

## 中文摘要

本計畫為開發一新型可調變焦距透鏡模組，利用液晶材料之雙折射率特性及液晶分子隨電場方向排列的特性，等效為漸變折射率(GRIN)之特殊光學透鏡，再加以調變不同驅動電壓大小，近而改變液晶透鏡之等效折射率。此折射率可產生焦距隨著電壓大小不同而有所變化，達到變焦之效果，得以取代傳統之玻璃或塑膠鏡片。計畫第一年，首先架構出變焦液晶透鏡之基本理論推導模型，並分析驗證液晶透鏡之光學性質與電場之關係，並運用模擬軟體對電場及光學性質加以佐證，設計出特殊驅動方法之液晶透鏡，並且製作液晶透鏡實體，搭配鏡頭模組驗證理論分析。另外建立標準之光學檢測系統，觀察液晶透鏡之干涉條紋推導出透鏡之光學成像性質，並建構一套焦距量測系統，以配合完成自動變焦液晶透鏡模組之前置作業。第二年開始以第一年所製作液晶透鏡為基礎，並整合整合子計畫五、子計畫六研發材料之新型液晶透鏡，配合第一年所建構之光學檢測系統加以分析實驗，並於第二年後期結合子計畫三之驅動晶片使智慧型照相模組前端部件更趨於完善。第三年將液晶透鏡與驅動晶片封裝與模組化，並加入子計畫一之防手振系統並利用子計畫三之數位影像修正系統補償提升影像品質，後期與 CMOS 影像感測器結合，最後完成自動對焦/變焦之液晶透鏡與光學防手振之智慧型像機系統整合。

關鍵字：液晶透鏡、可變焦透鏡、自動對焦鏡頭、模組化液晶鏡頭。

## 英文摘要

This proposal is to design a novel tunable lens module using the birefringence property of liquid crystals (LC). The tunability of the designed LC lens in the focus length is made possible by adjusting applied field to turn the LCs inside the lens to desired postures, acting as a gradient index lens (GRIN). This LC lens is best suitable for replacing moving objective lens in the compact camera module (CCM) for mobile phones to implement the functions of auto-focusing and zooming. It is advantageous to replace conventional lens with lightweight and compact in some applications, include micro-lens module, cellphone component, fixed focal length web camera, blue-ray disk, three-dimension (3D) display, and optical tweezer. One can design positive and negative LC lenses to be combined with CCDs with conventional lens components for the LC lens module in order to performing auto-focusing and zooming.

In recent years, the on-line tunability in the focal length of a common variable focus lens is achieved by the mechanical motion of the individual lenses in CCM. The control mechanism for lens motion is generally complicated, and the movements of the lenses usually need a large space. To remedy the problem, the LC tunable lens is repurposed and used in the CCM herein to save space in mobile phones. In the first year of project execution, it is planned to establish the optical model of the LCs and predict the resulted index change distribution and the focus length. The theoretical predictions are also validated by commercial software. With the LC lens well designed, the LC lenses are optimized to lead to best focusing capability with a measure defined. Finally, in this year, an inspection machine for measuring the capability of the designed LC lens. In the second year, based on the experience gained in the first year, new LC materials leading to low voltage drives and fast response offered by sub-projects 5 and 6 are adopted for a better tunable LC lens. Also conducted in this year are combining the developed LC lens with the color compensation chip developed by sub-project 3 to achieve high color gamma. In the last year, the naturally-developed LC CMM is integrated with the image stabilizer developed by sub-project 1 to form the novel CCM for camera phones, as proposed by the net-proposal.

**Keywords:** Liquid crystal lens, tunable focal length lens, auto focusing lens module, compact camera module (CCM).



## 1. 前言

液晶透鏡的發明開始得很早，早在西元 1979 年(Sato[1])就有人利用薄薄一層液晶層達到等同一片傳統玻璃或塑膠透鏡的光學效果，這對傳統透鏡技術帶來極大之衝擊，傳統的玻璃或是塑膠透鏡有體積上的困擾，且單一片玻璃或塑膠透鏡只有單一焦距，並無調變焦距之功能，而液晶透鏡可依據驅動方式的不同調變焦距，大大增加應用性，不僅如此，液晶透鏡可應用於自動對焦功能上。傳統的變焦鏡群組，顧名思義需要兩片以上傳統透鏡組合，並且搭配音圈馬達或是壓電致動器，使鏡群組中的透鏡相對距離改變，以調變鏡群組等效的焦距，然而音圈馬達本身的體積使得傳統自動對焦模組體積大，因此應用新型技術之液晶透鏡在自動對焦的技術上，可輕鬆解決自動對焦模組體積的問題，因為液晶透鏡的製程簡易，主要體積完全來自玻璃的厚度，毋須預留透鏡的移動行程即可達成自動對焦的效果，因此液晶透鏡的技術大大提升光學的應用範疇。

然而，液晶透鏡發展至此仍有許多需要克服的難題，例如透鏡孔徑過小及成像品質不良等缺失，故如何將透鏡孔徑增大及改善成像品質便是未來液晶透鏡發展的重心所在。液晶透鏡主要之聚焦原理就是利用液晶的雙折射率特性及誘電性，因為液晶分子會受電場方向改變姿態，而改變液晶透鏡的等效折射率。然而舊型液晶透鏡因為電極結構的關係，使得透鏡中心電場強度微弱，因而等效折射率的調變不夠理想，且所需的驅動電路對於應用層面產品化的負擔太大，因此利用本子計畫發展新型液晶透鏡，以期改善驅動電壓過大及等效折射率不理想的問題，除此之外，並分析透過液晶透鏡所拍攝出之影像，分析如透鏡調變轉移函數、色散、像差等影像檢測參數，期將液晶透鏡達到最佳化。

另外將液晶透鏡的技術應用於光學變焦(Zoom)也是另一個重要的課題。照相時的光學變焦倍率即將景物放大或縮小之倍率，主要是利用至少一組正、負透鏡即凸透鏡與凹透鏡之相對距離達成，但光學變焦鏡群組所需之移動距離較自動對焦所需之距離來得更長，若只是應用於一般的相機上，光學變焦所需的伸縮行程

## 2. 研究目的

本計劃兼具理論分析與實務操作，將自動變焦系統加入原本薄型化之手機相機模組內，使一般受空間限制而無法自動對焦系統得以實現。本研究更能應用在其他光學領域，如雷射變焦、光鉗 3D 操作及 3D 顯示器，包括電機控制、生物醫療及光學應用，並滿足相關生物產業之需要，並在需要光學變焦的手機相機模組上，設計出焦距可調式液晶透鏡(Tunable-Focusing Liquid Crystal Lens, 簡稱 Tunable LC lens)，藉由液晶的光電特性來取代傳統的玻璃或塑膠光學鏡片。目前光學變焦尚未完全應用於照相手機上，因為光學變焦的功能尚未流行於一般消費大眾中，且光學變焦所需之相機模組體積較一般之自動對焦模組大得多，但是由於液晶透鏡本身的調焦功能，若搭配上音圈馬達可微小調變行程的功能，即可輕鬆達到光學變焦的效果，不需搭配如一般相機龐大的拉伸鏡頭，並且所需額外付出的金額不高，因此將液晶透鏡應用於光學變焦上，必也有其可行之處。今年成果效益國際會議論文四篇；國際期刊論文二篇。利用多圈不等寬度之電極設計方式，模擬、製作以及量測所設計之液晶負透鏡，在將來使其能應用於相機上之變焦系統。

計畫目的為利用液晶透鏡達成自動變焦之目的。另外採取正、負型透鏡之光學設計搭配，產生具有影像放大功能，運用在任何光學變焦。此外並整合透鏡模組與 CCD 感測器，更增加許多彈性。此計畫主軸為設計一新型之負型液晶透鏡(LC lens)，使其可取代相機上之傳統負型透鏡。其電極之設計利用多圈不等寬度電極，彌補傳統餅型變焦液晶透鏡因孔徑過大，造成折射率分佈不若漸進式折射率透鏡(GRIN lens)完美之缺憾，使其折射率分佈更為接近負型漸進式折射率透鏡。此透鏡為對稱型之結構，用以產生對稱之電場分佈。在產生理想負型透鏡之折射率分佈情形下，電極寬度之設計，利用不同位置所需供應給液晶之電壓對位置之斜率和電極寬度成正比之方式，於此論文中總共設計了八圈之電極，並應用於大孔徑 5mm 之透鏡上，設計之結果先以液晶模擬軟體 DIMOS.2D 模擬出等電位線與液晶轉動角度，再利用軟體 MATLAB 計算出折射率分佈，最後經由此折射率分佈推算出相對應之等效焦距。此外，也利用光追跡軟體 TracePro 做光強度分佈之模擬，用以模擬與比較設計之負型液晶透鏡與理想之負型漸進式折射率透鏡於光強度分佈上之差異。而於電極製作之製程上，此論文中採用多層蝕刻之方式，用以避免電極產生破裂之情形，將可使電場分佈更為平順。最後，製作出孔徑比傳統液晶透鏡大之多圈不等寬度之負型液晶透鏡，並藉由量測干涉條紋計

算出其等效焦距。液晶負型透鏡實際成品可由如圖一(a)所示，可以看到其不等寬之八圈電極，並由圖一(b)可得知，本計劃之液晶負型透鏡之實體，由圖中之尺規得知，此樣品之長寬尺寸在 2.5mmX2.5mm 以內，並於實際量測結果，可由圖二驅動電壓與有效焦距之絕對值作圖中得知，此液晶負型透鏡其有效焦距範圍為無窮遠至-350mm 間，而其最大驅動電壓為 0 至 120 伏特。

### 3. 文獻探討

液晶變焦透鏡的構想早在西元 1979 年就由日本 Akita 大學的 Sato 教授所提出[1]，其結構如圖一，此結構雖然仍然利用凸透鏡及凹透鏡作為主要的透鏡功能，但外函一層液晶，並外函驅動電壓對焦距作些微的調整，這一發明顯然衝擊了傳統鏡片領域的既有觀念，不需移動鏡群組的相對位置即可調整焦距，這完全推翻從前舊有的觀念。而後 Sato 教授又提出另一種結構的液晶變焦透鏡[2]，如圖二，其設計一孔洞電極，並施加驅動電壓於電極上，利用圓型電極給予一特殊的電場，使液晶分子依照電場方向排列出一漸進式的轉角，且其等效折射率趨近為一漸進式折射率透鏡，這在液晶變焦透鏡上又是一重大進步，一方面製程容易，只需要簡單的兩片鍍有電極的玻璃即可組裝；另一方面其變焦範圍較大，更可應用於變焦模組上，然而，這一結構仍有需要改進的地方，也將是我們所提出的設計主要改進的重點。除了以上提出的兩個液晶變焦透鏡，Sato 教授及其他不同的實驗團隊尚有其他不同之結構發明，如高阻值電極[3]、六角形孔洞電極[4]、雙液晶層[5]或是四個子電極的液晶透鏡[6]。

## 4. 研究方法

### 4.1 多圈電極液晶透鏡

傳統之液晶變焦透鏡改變玻璃及塑膠鏡片的光學應用思維，輕薄的兩片玻璃可以達到相同的變焦效果，然而液晶透鏡中孔洞型電極的設計尚有其不足且需要改進的地方，許多研究也持續改進液晶透鏡的聚焦品質[7][8]。

本計畫提出新型圓形孔洞電極設計，對於孔洞型液晶變焦透鏡中央電場強度不足部份作出一較好的改善方法。2007年 Sato[9]提出於孔洞電極中間加入一個圓型電極，以改善中間部份電場分佈，但驅動電壓依然有過高的問題，其對應用於手機相機上仍具有電源供給的困難性，因此我們提出一多圈不等寬度電極的設計，試圖克服中央電場強度不足的缺憾，並且於透鏡中間加入七圈環型不等寬度之電極，其寬度依據完美之漸進式折射率透鏡（GRIN Lens）之折射率分佈作最佳化的設計。

漸進式折射率透鏡的示意圖如圖 1，其原理和傳統的玻璃透鏡不同，漸進式折射率透鏡的玻璃材質組成濃度會隨著半徑的改變而改變，因此不同的半徑下相對的折射率也不同，若是入射一平面波，則隨著不同的折射率，出射光的波前就會改變，因此形成聚焦的現象，其焦距與折射率的關係[10]如下：

$$f = \frac{r^2}{2d[n_{\max} - n(r)]} \quad (1)$$

$f$ 、 $d$ 、 $r$ 、 $n_{\max}$ 、 $n(r)$  分別代表焦距、厚度、半徑、最大折射率、不同半徑下的折射率。由式(1)可推得式(2)，

$$n(r) = n_{\max} - \frac{r^2}{2df} \quad (2)$$

本計畫提出的設計就是利用式(2)求得一半徑相對折射率之曲線圖，如圖 2，並且將此折射率等分切割為八等份，所對應之半徑值即為本計畫的不等寬度電極之切割依據，以此作為最佳化的準則可使所設計出來的液晶變焦透鏡更接近完美的漸進式折射率透鏡，若是將液晶的相關係數及我們所設計出的電極寬度即半徑代入式(2)，則相對應的折射率即可求出，並且配合折射率與液晶轉角的關係式，以下式表示[11]：

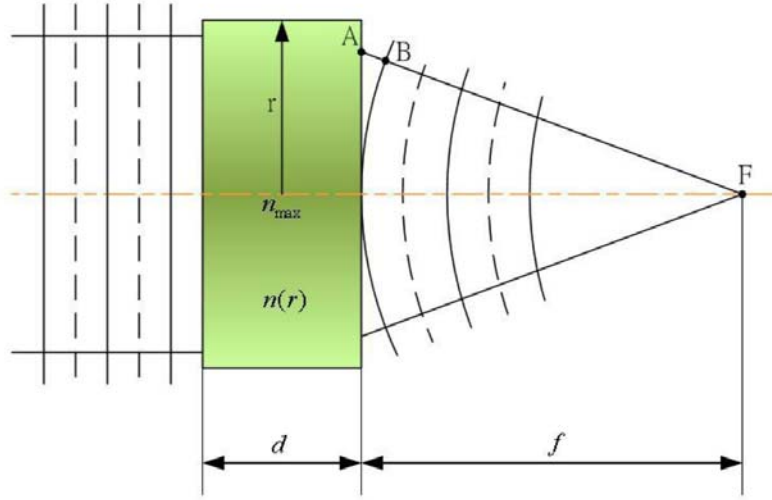


圖 1 漸進式折射率透鏡

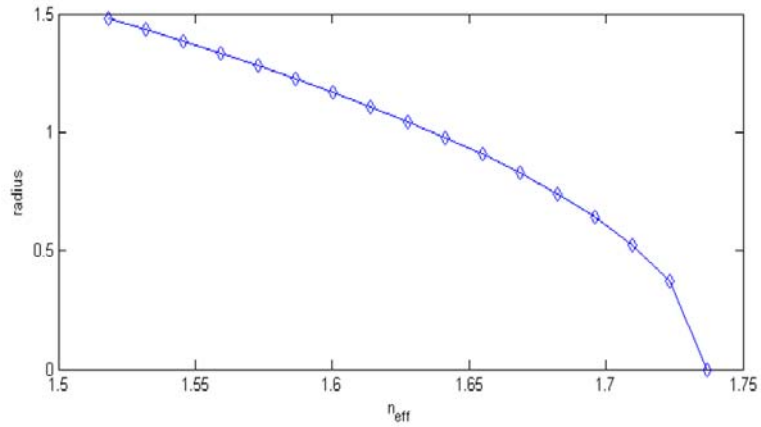


圖 2 半徑相對折射率曲線圖

$$n_{eff}(z) = \frac{n_e n_o}{n_e^2 \sin^2 \theta(z) + n_o^2 \cos^2 \theta(z)} \quad (3)$$

$n_e$  與  $n_o$  分別為垂直於液晶長軸方向及平行液晶長軸方向之折射率， $n_{eff}(z)$  表等效之折射率， $\theta(z)$  表液晶層內不同高度之液晶轉角，且  $\theta_m$  表液晶層中間之液晶轉角，並依據式(3)可得電壓與液晶轉角的關係[12]，

$$V = V_{th} \times \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left\{ \frac{a \left[ 1 + (\kappa - 1) \sin^2 \theta_m \sin^2 x \right]}{a \left[ 1 - \sin^2 \theta_m \sin^2 x \right]} \right\}^{\frac{1}{2}} dx, \quad (4)$$

其中  $a = \left[ 1 + \left( \frac{\epsilon_{\parallel}}{\epsilon_{\perp}} - 1 \right) \sin^2 \theta_m \right]$ ， $\kappa = \frac{k_{33}}{k_{11}}$ ， $V_{th} = \pi \left( \frac{4\pi k_{11}}{|\Delta\epsilon|} \right)$ 。

由以上公式推算所需之驅動電壓，另外輔以使用液晶模擬軟體 DIMOS.2D 建立不等寬度電極液晶變焦透鏡之 2D 剖面，如圖 3。DIMOS.2D 模擬軟體主要可作為電場與液晶相對應的轉角姿態模擬程式，可作為電極設計的第一道最佳化應用，並將液晶旋轉分佈資料輸出使用 MATLAB 進行計算以得相對之折射率分佈圖，如圖 4。將本研究所設計之電極，使用氧化銅錫玻璃進行蝕刻製作，並使用二氧化矽作為絕緣層，實際電極結構如圖 5 所示。

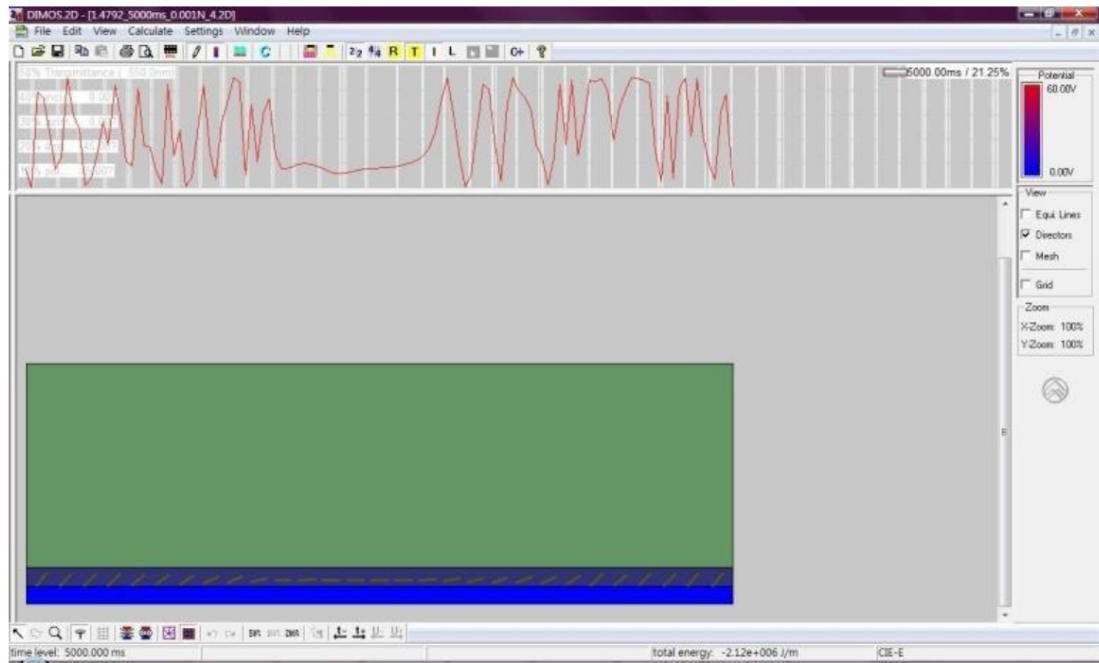


圖 3 DIMOS.2D 使用介面及多圈不等寬度液晶透鏡 2D 剖面圖

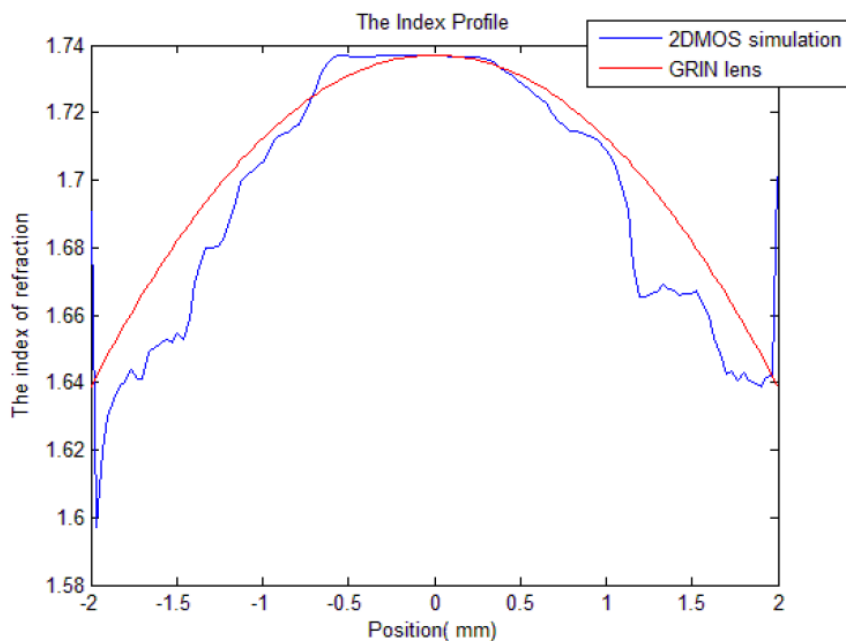


圖 4 理想漸變折射率與孔鏡關係圖

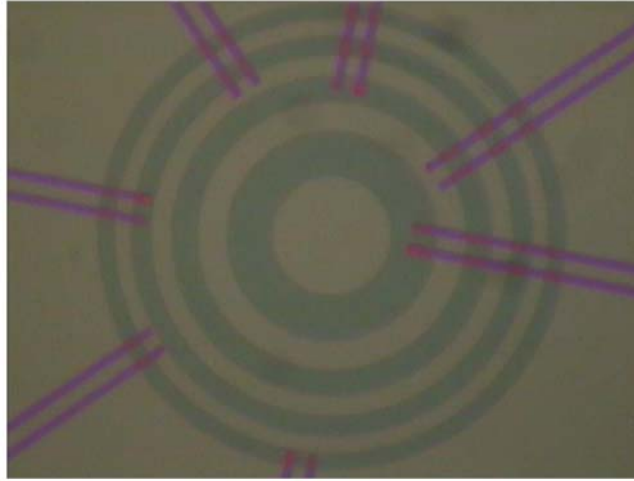


圖 5 電極結構

#### 4.2 快速反應時間之液晶透鏡

以全新的電極設計，使用環-餅狀(ring and pei)的電極設計，並搭配合適的驅動方式及使用雙頻液晶“MLC-2048” (Dual Frequency LC, DFLC)，可有效降低液晶 (LC) 透鏡的響應時間。與傳統液晶透鏡相比，這種新的電極結構設計，只需兩層 ITO 玻璃與特殊電極設計-圓環及圓餅的電極圖案，藉由三個步驟的電極控制模式，除加快驅動液晶透鏡聚焦能力，也可消除液晶分子驅動時常見的轉向錯誤。驅動時利用不同的驅動頻率可降低反應時間小於 5 秒，這樣的技術可大幅改善定焦液晶透鏡及孔洞式液晶透鏡的反應時間[13][14][15]。

傳統之孔洞型液晶透鏡於上層 ITO 玻璃中為圓孔形電極，新設計將於中間圓孔中多增加一個直徑 2mm 的電極環，用以加快驅動液晶分子作動(rising time)及恢復作動(falling time)，新型的驅動方式可將液晶分子的動作分為三個時期：起始轉向→對焦→回復，液晶透鏡在初始驅動轉向及回復時，不須產生對焦的均勻電場分佈，因此驅動時僅需注意液晶分子轉向問題。在環形電極及圓餅電極的間距為 15 $\mu\text{m}$ ，每一層 ITO 玻璃的厚度為 0.55mm 且上方鍍有 450 $\text{\AA}$  的 ITO 薄膜，兩層 ITO 玻璃間距為 50 $\mu\text{m}$ ，並灌入雙頻液晶“MLC-2048”。在一般室溫下，MLC-2048(來自 Merck)的相位交越頻率(cross-over frequency)為 10kHz，且在 1kHz 時雙折射率( $\Delta n$ )為 0.22；50kHz 時介電常數( $\Delta \epsilon$ )為 3.31。

圖 6 為新型環-餅狀電極設計的干涉條紋，新型環-餅狀電極的驅動方式與傳統孔洞式液晶透鏡不同，如圖 7 所示，依液晶分子動作的三個時期分別以不同方



式驅動，第一期液晶分子起始轉向，將同時施加電壓於環狀電極及圓餅電極，以相同且均勻的電場使液晶分子轉向一致，並可以防止在製作預傾角度(rubbing)時可能產生的液晶轉角分佈不連續現象。第二期將產生聚焦現象，圓餅電極將不給電，僅靠環型電極進行驅動，液晶分子將依照電場強弱分布而改變轉向，進而達到對焦效果。第三期液晶分子回復起始狀態，將同時施予 1kHz 到 50kHz 的電壓於環型電極與圓餅電極，液晶分子將會反向且快速地回歸原始排列狀態，由圖 8(a)中，在液晶分子回復時期給予不同驅動頻率將有效減少回復時間，提高整體響應時間，如圖 8(b)所示，相較於傳統驅動方式，不施予電壓時的液晶回復時間，新型驅動方式將可有效將回復時間降於 5 秒。

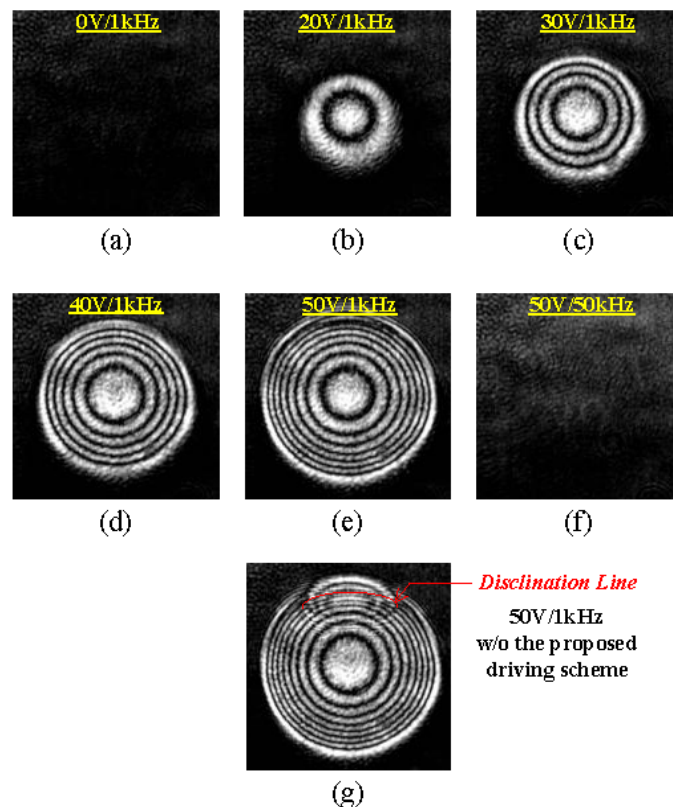


圖 6 Interference patterns with the lens aperture in 2 mm (a-e) with the applied voltage varying from 0 V to 50 V. (f) with 50 V/50 k Hz applied voltage. (g) with disclination line.

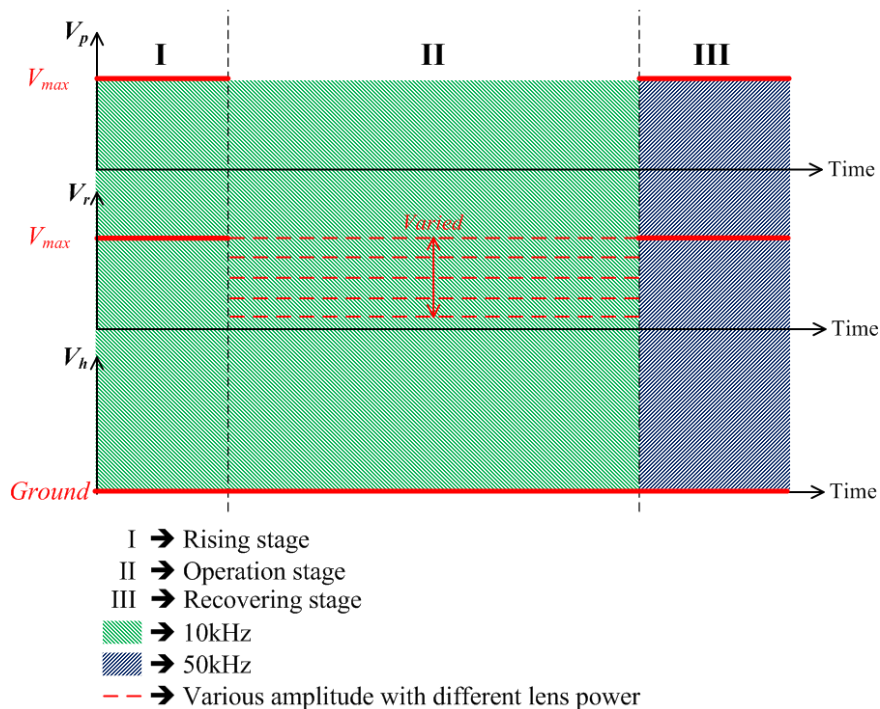


圖 7 The driving scheme of the ring-and-hole type LC lens

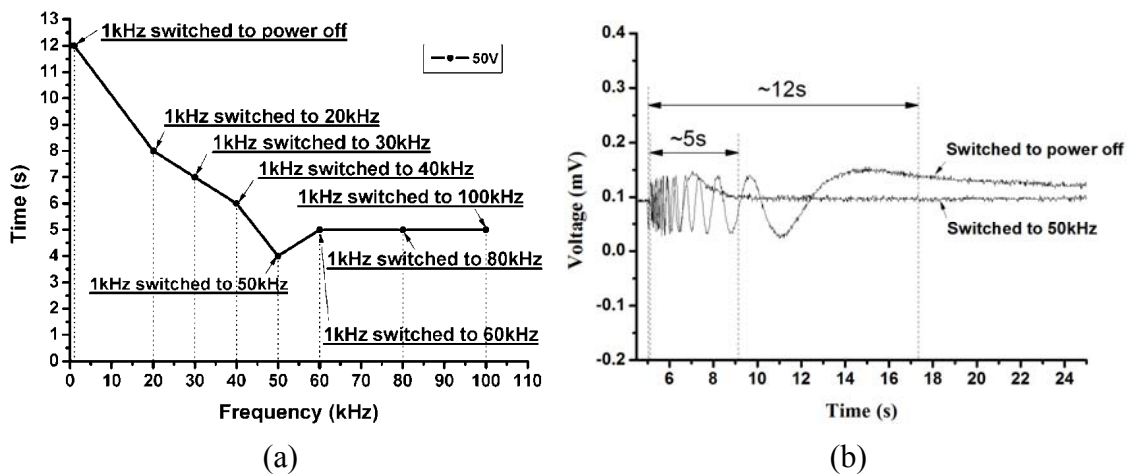


圖 8 (a)The falling time of the ring-and-hole type LC lens at different driving frequency;  
 (b) Illustrated falling time of driving 50kHz frequency and natural reinstatement

### 4.3 可調光軸之液晶透鏡

孔洞式液晶透鏡可藉由不均勻電場達到聚焦效果，也可利用電場大小改變焦距[16][17][18][19]，本研究利用此特性將兩個不同電壓的液晶透鏡組合為同一個透鏡，期可達到可調光軸之液晶透鏡，其構想示意圖如圖 9 所示。本研究將孔洞

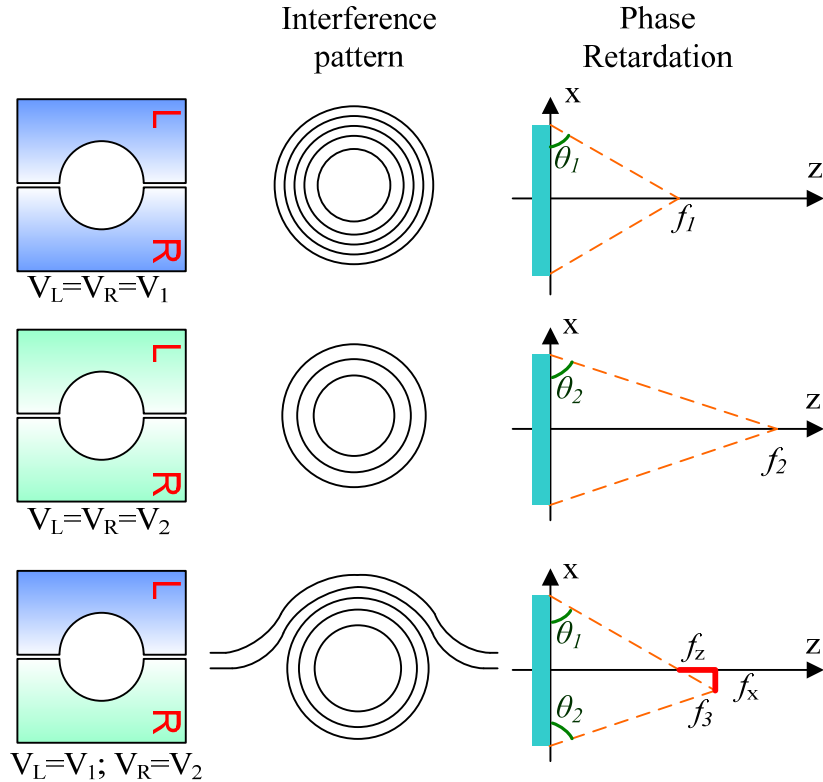


圖 9 雙電極構想示意圖

式液晶透鏡之上層電極左右分成兩等份電極，其結構圖如圖 10(a)所示，上層 ITO 右電極給予  $V_R$  的電壓，上層 ITO 左電極給予  $V_L$  的電壓，利用  $V_R$  與  $V_L$  的差值，影響此液晶透鏡之聚焦點位置。當  $V_R \neq V_L$  時，焦點可產生一個聚焦角度改變，焦距也會隨之改變，因此可達到更多變的聚焦效果。

在 2DIMOS.2D 當中建立雙電極液晶透鏡模型，為簡化模擬過程，模擬時簡化下層 ITO 玻璃部分，此模擬將記錄在液晶驅動後三秒的二維液晶排列方式。液晶受到電場後轉動速度快，理論上為當電壓給予  $\pm 40V$  時，液晶轉動的上昇時間(Raise Time)為  $4.6 \times 10^{-14}$  秒，考慮到為確保液晶分子受電場影響已達穩態，因此本模擬將記錄驅動後三秒的液晶排列方式。首先，將固定  $V_R$  電壓為  $\pm 40V$ ，改變  $V_L$  電壓，以分析聚焦光軸偏移現象。

雙電極液晶透鏡僅可達到一維之光軸調變，因此將設計三等份電極，期可以最少數量之電極達到二維的光軸調變。在三電極設計上，電極大小將決定控制電壓的大小，為使電極可以均分三等份，將使用三個  $120^\circ$  的扇形電極組成類孔洞型液晶透鏡如圖 10(b)。設計上，液晶透鏡的電極由兩個同心圓構成，以每  $120^\circ$  分割成一個電極，共分為三個電極可各別驅動，若將每個電極簡化為等效拉力，

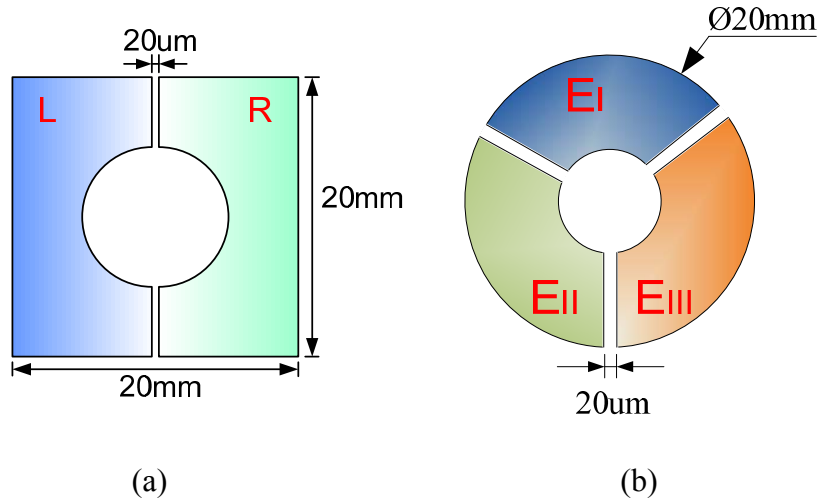


圖 10 可調光軸液晶透鏡電極結構圖(a)雙電極設計；(b)扇形電極設計

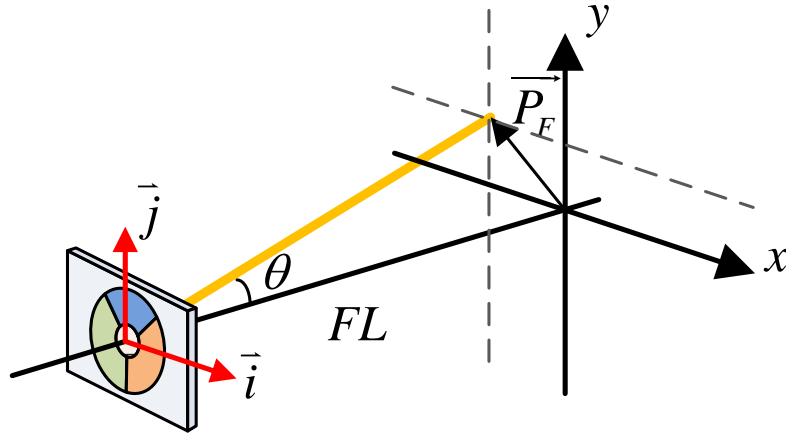


圖 11 聚焦點上幾何光學關係

且皆作用於焦點上，改變電極驅動電壓表示為三力大小的改變，則焦點可因三力作用移動至平面上任一點。光軸偏移角度如圖 11 所示，光學對焦點( $\vec{P}_F$ )可表示為

$$\vec{P}_F = \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha (V_{II} - V_{III}) \vec{i} + \frac{1}{2} \beta (2V_I - V_{II} - V_{III}) \vec{j} \quad (5)$$

其中  $V_I$ 、 $V_{II}$  及  $V_{III}$  為三個電極分別給予的電壓值， $\alpha$  及  $\beta$  為修正常數項。

圖 12 為變焦液晶透鏡的實體照片，分別為雙電極、扇形三電極及四電極液晶透鏡。圖 13 為雙電極液晶透鏡的干涉條紋，由量測結果可知，當施予不同電壓於左右電極時，對焦點也會隨著改變，但根據干涉條紋的完整度可知，聚焦現

象還是很完整。圖 14 為扇形三電極在光束分析儀 (beam analyzer) 下的量測結果，扇形三電極分別在三個電壓給予自 80V~60V 不同電壓，光學聚焦點平均移動量為  $4.778(\mu\text{m}/\text{V})$ ，光軸平均偏移角度為  $0.0179(^{\circ}/\text{V})$ 。

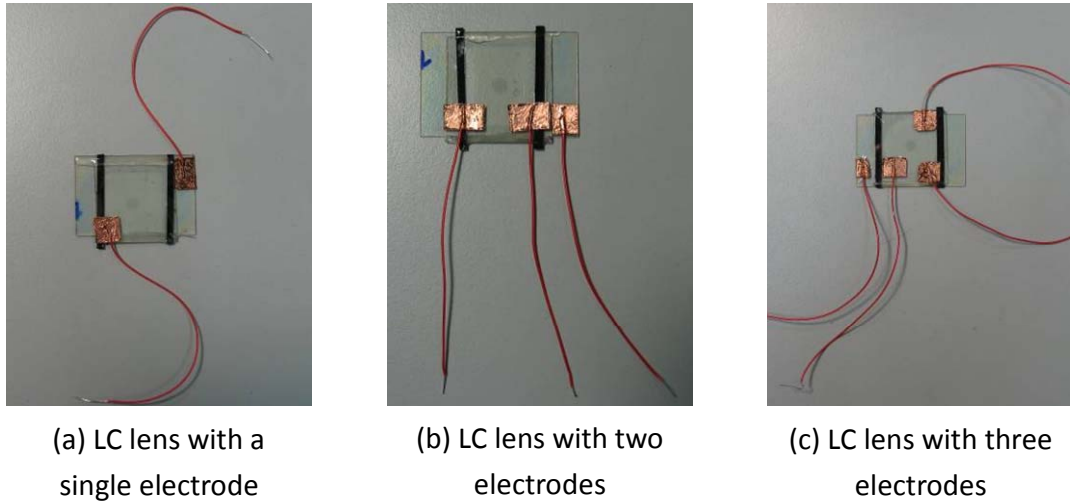


圖 12 可調光軸式液晶透鏡

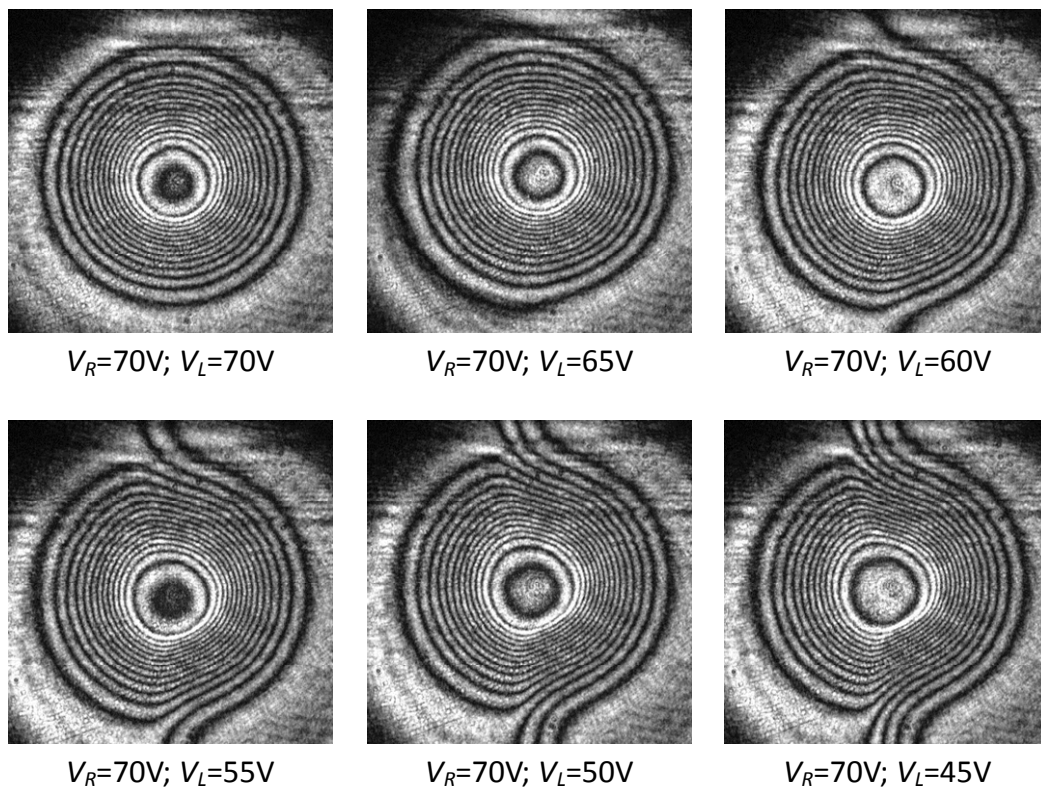


圖 13 雙電極液晶透鏡之干涉條紋

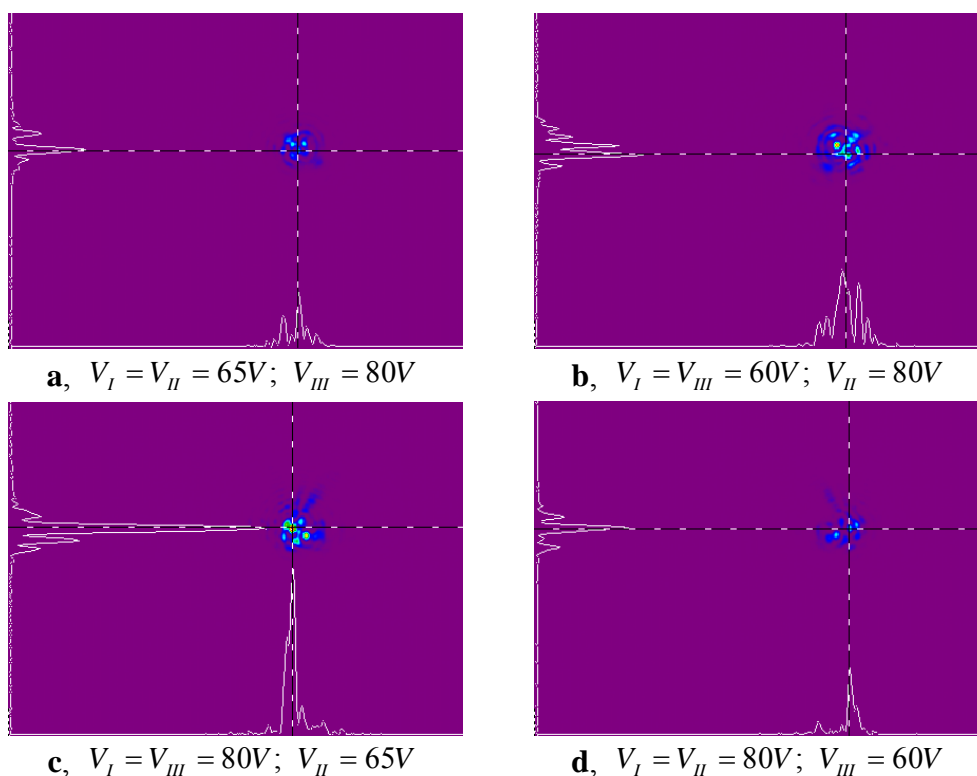


圖 14 扇形三電極之液晶透鏡聚焦能量分佈圖

#### 4.4 低電壓之液晶透鏡設計

利用不等寬的多個環型電極設計一種新型的液晶透鏡，期可改善傳統孔洞式液晶透鏡折射率分佈不均勻的現象，並可藉此降低施加電壓[20]。環型電極數量和寬度，將依完美對焦所需要的折射率分佈進行預先設計，以產生近乎完美的聚焦。此新型多環電極將依據梯度折射率透鏡(GRIN Lens)的折射率分佈作為完美折射率而進行設計，並且將多環電極與液晶分子緊貼，以提高驅動時電場對液晶分子的影響，藉此降低驅動電壓，在相同的聚焦效果內，將使驅動電壓降到 10V 以內，以增加液晶透鏡實際應用範疇。另外，為了得到平滑的折射率分佈，將會在 ITO 電極與液晶分子間塗佈一層絕緣層。

GRIN Lens 的折射率分佈將沿徑向方向呈現梯度分佈[21]，其擁有如同傳統透鏡的光聚焦/發散現象，但卻沒有傳統透鏡的形狀，並可移動鏡片達到對焦或變焦的效果。GRIN Lens 於徑向的折射率分佈為

$$n_G(r) = n_{G,\max} - \frac{r^2}{2d_G f} \quad (6)$$

其中  $r$  為透鏡半徑、 $n_{G,\max}$  為最大的折射率、 $d_G$  為透鏡厚度、 $f$  為焦距。式(6)也

可表示為徑向的 GRIN Lens 折射率分佈，因此焦距可表示為

$$f = \frac{r^2}{2d_{LC} [n_{LC,max} - n_{LC}(r)]} \quad (7)$$

其中  $n_{LC,max}$  為液晶透鏡最大的折射率、 $d_{LC}$  為液晶透鏡厚度。由式(7)，液晶透鏡的焦距與半徑平方呈正比，並與透鏡厚度與折射率分佈差異呈反比。新設計的液晶透鏡依照廣泛的應用範圍，如手機相機模組，將朝突破高折射率分佈差異或高透鏡厚度時，焦距過短的限制，如式(6)，若要得到最短焦距，則需要提高鏡片厚度( $d_{LC}$ )或提高折射率差( $n_{LC,max} - n_{LC}(r)$ )，鏡片厚度增加時，驅動電壓也需增加； $n_{LC,max}$  為液晶對平行光軸光線(extraordinary ray)的折射率( $n_e$ )，基於液晶分子原理及液晶透鏡原理， $n_{LC}(r)$  為隨著對鏡片邊界的距離液晶對垂直光軸光線(ordinary ray)的折射率( $n_o$ )分佈，因此液晶透鏡中心圓的半徑( $R$ )為

$$R = \sqrt{2d_{LC}f [n_{LC,max} - n_{LC}(R)]} = \sqrt{2d_{LC}f [n_{LC,max} - n_{LC,min}]} = \sqrt{2d_{LC}f [n_e - n_o]} \quad (8)$$

根據上述設計原則，如圖 15(a)所示鏡片的折射率為鏡片徑向位置的反比，經由式(8)可得知最小有效焦距與透鏡直徑大小關係如圖 15(b)所示，由此可知，若要得到最小焦距，則需使用較小直徑的透鏡。在手機相機模組當中，多選用直徑 2mm 透鏡，而由圖 15(b)中可知其焦距約為 182.8mm。

傳統孔洞式液晶透鏡結構如圖 16 所示，圖 16(a)為上下兩層蝕刻電極圖案的

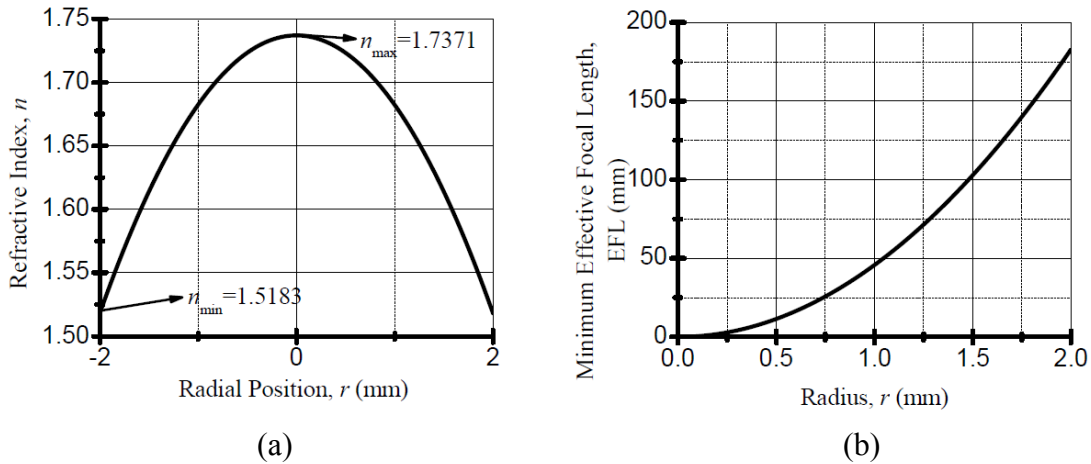


圖 15 (a)直徑 2mm GRIN Lens 的折射率分佈；

(b)最小有效焦距與透鏡直徑關係

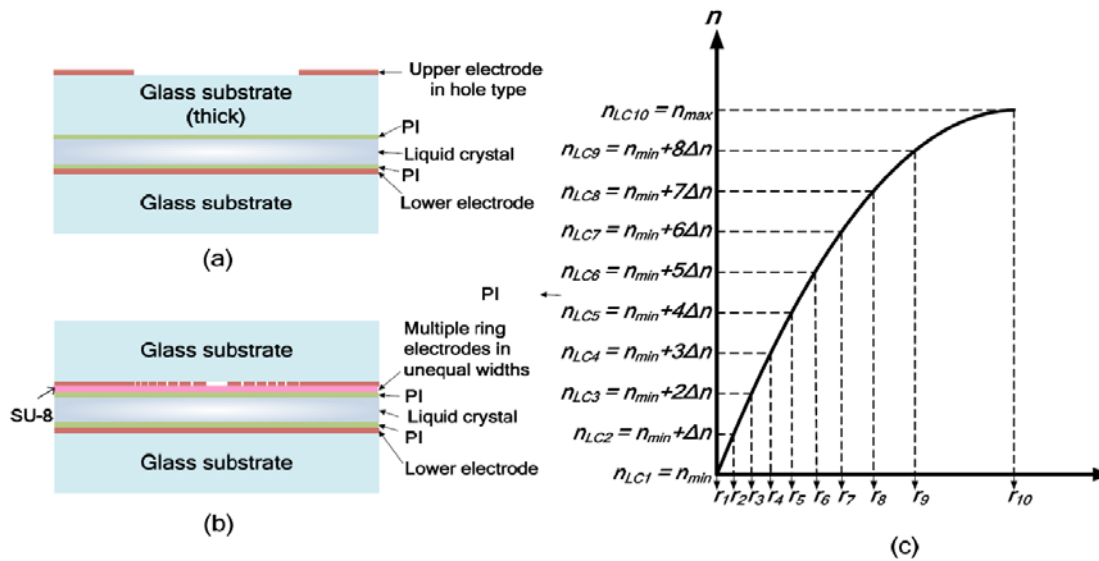


圖 16 (a) 孔洞式液晶透鏡結構圖；(b) 低電壓液晶透鏡結構圖；  
(c) 環電極寬度與折射率對照圖

ITO 玻璃中間夾著液晶層，而低電壓液晶透鏡則將上層 ITO 轉置，將 ITO 電極直接接觸液晶層，電極與液晶中間僅隔著 SU-8 的絕緣層，如圖 16(b)，其中上層電極的環電極寬度則如圖 16(c)所示，將每一環的寬度與相對折射率所畫成的曲線近似於 GRIN Lens 的折射率分佈。另外，使用 2DIMOS.2D 模擬低電壓液晶透鏡於 4V~10V 的轉向分佈，並經由 MATLAB 計算後得知折射率分佈，並將其與 GRIN Lens 的折射率分佈相比，如圖 18 所示，利用不等寬度多環電極驅動液晶透鏡時，僅使用低電壓驅動即可達到與 GRIN Lens 類似的折射率分佈，其中在第 9 個環電極的折射率分佈，卻皆不如預期，預測因受到中央原電極的干擾，但其相較於傳統孔洞型液晶透鏡，已多有改善。

不等寬度多環電極之低電壓液晶透鏡的電極設計圖如圖 17(a)所示，其中與等寬多電極相同，使用垂直電極，避免因電壓傳輸線影響液晶透鏡聚焦狀況，而圖 17(b)則標示出每個環電極之垂直電極的位置，圖 17(c)為低電壓液晶透鏡實體圖，其中液晶層將選用默克公司的 E7 進行實驗，其  $n_o$  為 1.5183； $n_e$  為 1.7371； $K_{11}$  為 1.1； $K_{22}$  為 5.9； $K_{33}$  為 17.1；而介電常數  $\epsilon_{||}$  為 19.28； $\epsilon_{\perp}$  為 5.21。



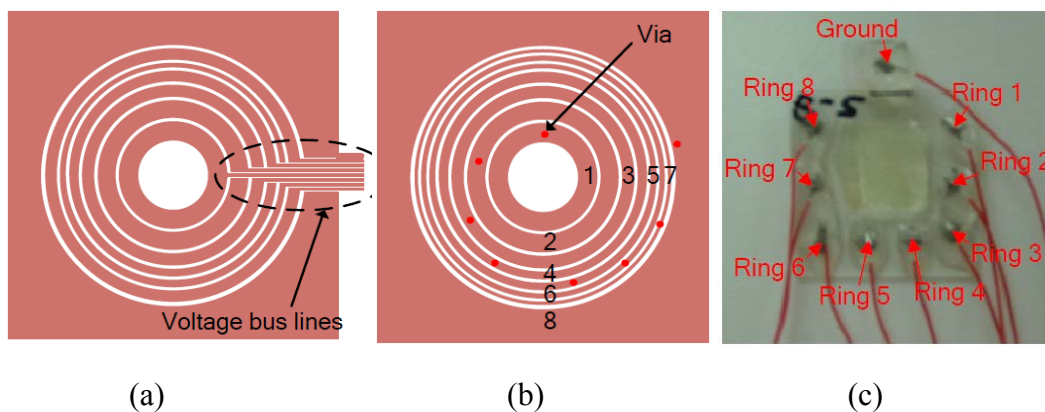


圖 17 (a) 低電壓液晶透鏡電極設計圖；(b) 低電壓液晶透鏡電極圖  
(含垂直電極位置)；(c) 低電壓液晶透鏡實體圖

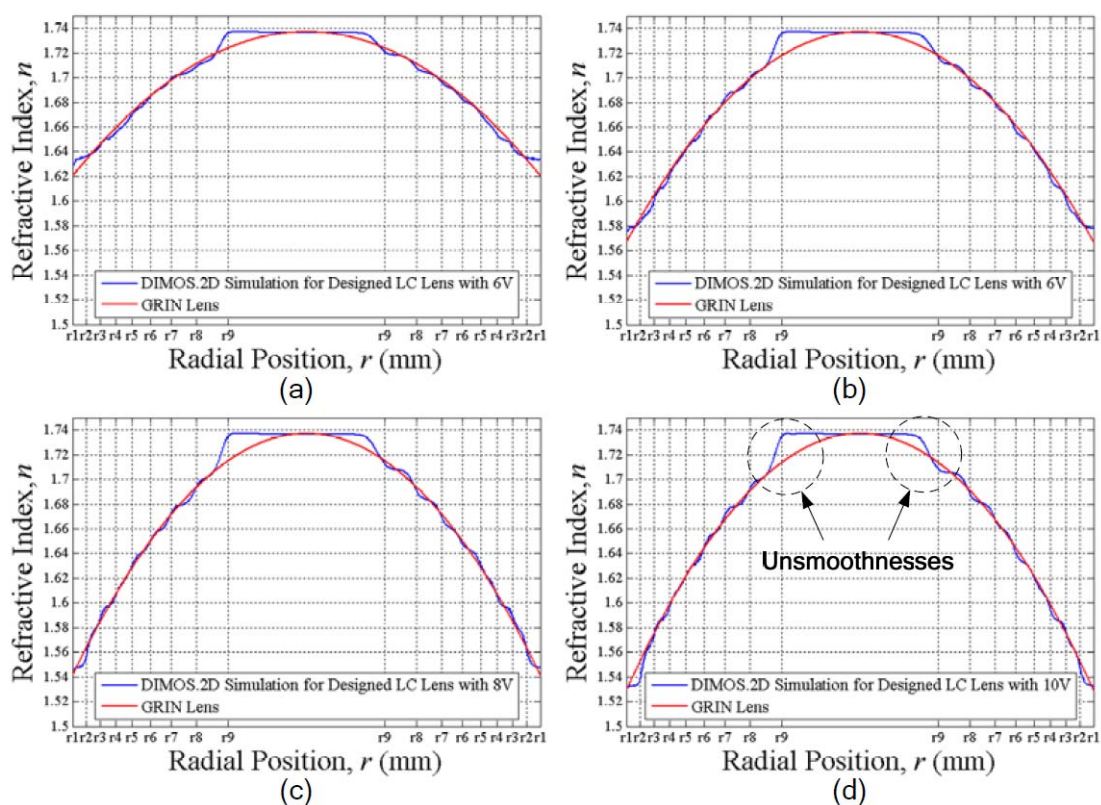


圖 18 低電壓液晶透鏡模擬折射率分佈圖  
(a) 4V；(b) 6V；(c) 8V；(d) 10V；

經由干涉條紋可清楚得知，多環不等寬電極之低電壓液晶透鏡其干涉條紋完整，皆無液晶轉角分佈不連續現象，且於低電壓驅動下，即可得到完美的聚焦效果，進一步將低電壓液晶透鏡製於 CMOS 光學系統前進行實驗，圖 20(a)為未聚

焦前所擷取的影像；圖 20(b)為聚焦後所擷取的影像，使用多環不等寬電極之低電壓液晶透鏡，可確實進行對焦的動作，取得清楚影像。

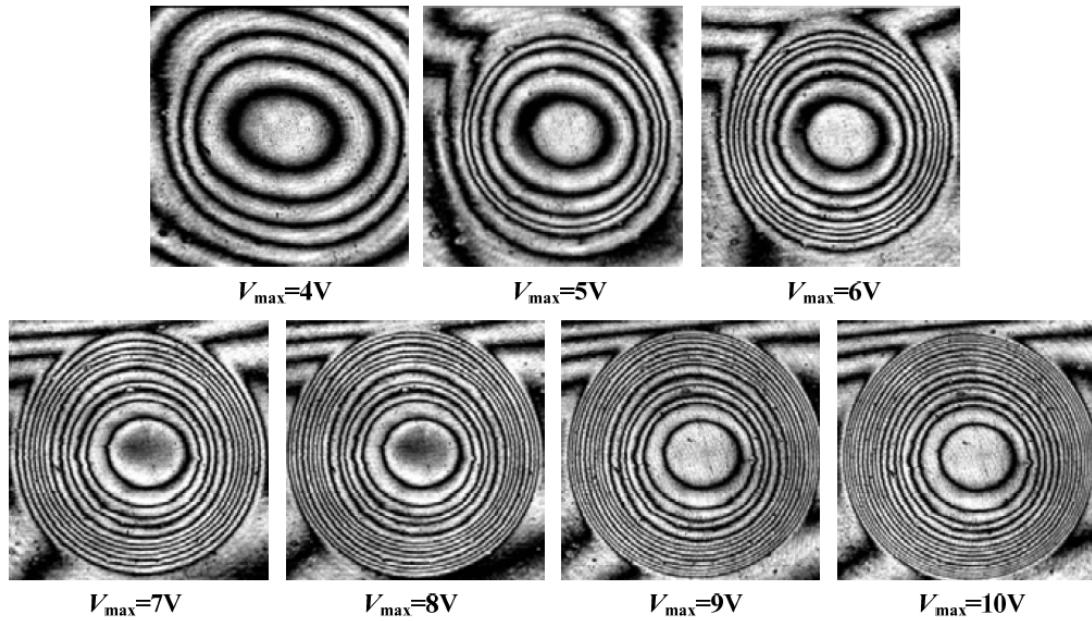


圖 19 低電壓液晶透鏡干涉條紋自 4V 到 10V

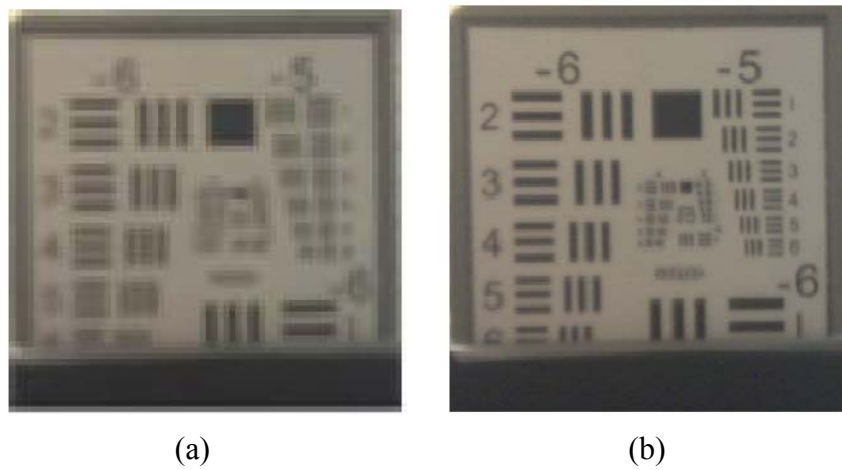


圖 20 液晶透鏡於 CMOS 系統拍攝圖 (a)無對焦；(b)對焦

## 4.5 負型液晶透鏡

### 4.5.1 負型液晶透鏡設計

設計一新型之液晶負透鏡(LC negative lens)，使其可取代相機上之傳統負型透鏡。傳統的負透鏡因受限於影像品質及需合適的折射率分佈，僅製作出 3mm 的液晶負透鏡[22][23][24]，為解決其問題，新型之液晶負透鏡，其電極之設計利用多圈不等寬度電極[25]，彌補傳統餅式(pie-type)變焦液晶透鏡若孔徑過大，造成折射率分佈不如漸進式折射率透鏡(GRIN lens)完美之缺憾[26]，使其折射率分佈更為接近負型漸進式折射率透鏡。此透鏡為對稱型之結構，用以產生對稱之電場分佈。在產生理想負型透鏡之折射率分佈情形下，電極寬度之設計，以最內圈電極所需供應給液晶之電壓對位置之斜率為參考斜率，利用不同位置之電壓對位置之斜率對參考之斜率比和電極寬度成反比之方式，總共設計了八圈之電極，並可應用於大孔徑 5mm 之透鏡上。

以 GRIN Lens 的徑向折射率分佈應用於液晶透鏡折射率設計依據，以 E7 的液晶參數作為液晶透鏡設計依據，波長為 633nm 時有最大的折射率差異為 0.2188，液晶透鏡半徑為 2.5mm，液晶透鏡中液晶層厚度為 50 $\mu$ m，在此架構下，

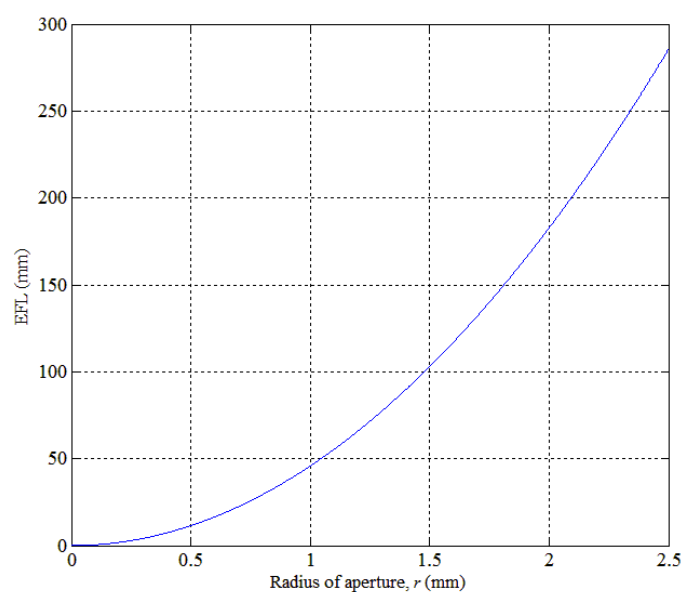


圖 21 透鏡直徑與有效焦距關係圖

液晶透鏡之最小焦距為-286mm，經式(7)可得到各種孔徑液晶透鏡的最小焦距，其有效焦距與液晶透鏡孔徑關係如圖 21 所示，而折射率分佈則可表示為

$$n(r) = 0.035008r^2 + 1.5183 \quad (9)$$

而透鏡各徑向位置的液晶負透鏡折射率分佈如圖 22 所示，假設光束垂直  $z$

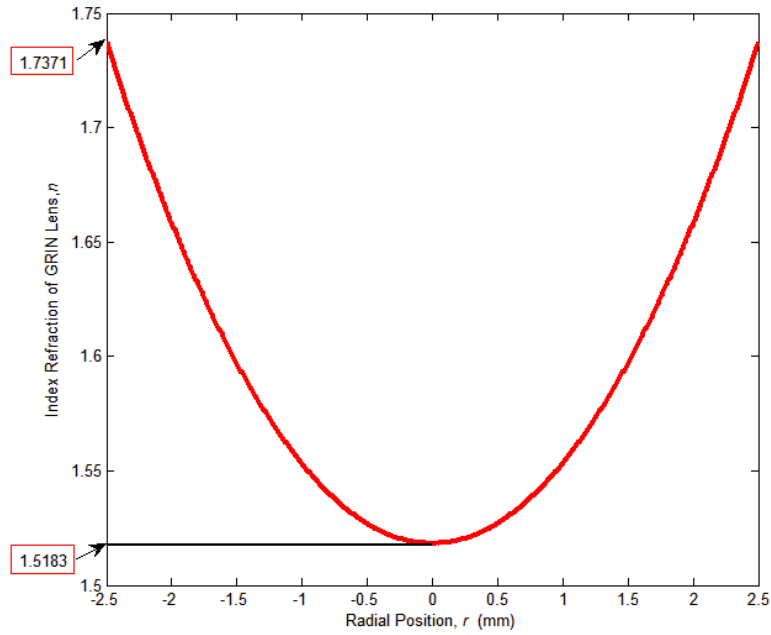


圖 22 GRIN Lens 於透鏡徑向位置上的折射率分佈

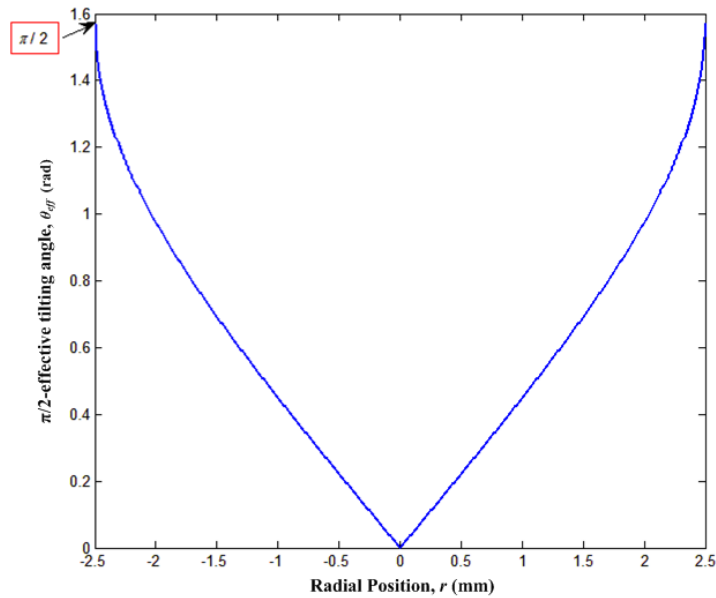


圖 23 透鏡徑向位置與液晶轉角關係圖

方向行進，且光折射現象僅因光束通過液晶層而引起，利用惠更斯法(Huygens method)液晶透鏡中光束經各旋轉角度( $\theta_{eff}$ )液晶分子的等效折射率( $n_{eff}$ )為

$$n_{eff}(\theta_{eff}) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta_{eff} + n_o^2 \sin^2 \theta_{eff}}}, \quad (10)$$

其中 $\theta_{eff}$ 為液晶分子對於垂直方向的角度。等效簡化 GRIN 負透鏡的折射率分佈與液晶透鏡等效折射率，式(9)與式(10)可合併為

$$\theta_{eff}(r) = \cos^{-1} \left[ n_o \sqrt{\frac{\left[ \frac{n_e^2}{(1.5183 + 0.035008r^2)^2} \right] - 1}{(n_e^2 - n_o^2)}} \right]. \quad (11)$$

式(11)表示為完美折射率分佈的液晶層所需要的角度分佈，其折射率分佈與液晶旋轉角度如圖 24 所示。若於兩 ITO 電極上施予電壓，並使液晶層產生如同 GRIN Lens 的折射率分佈，根據 GRIN Lens 折射率公式可計算出液晶透鏡中不同逕向位置的最佳電壓分佈，其電壓自透鏡邊界依序為 5.37, 2.46, 1.95, 1.62, 1.38, 1.19, 1.08, 0.99 and 0.91V，如圖 25 所示。環電極的寬度則與各環之間電壓差斜率成正比。

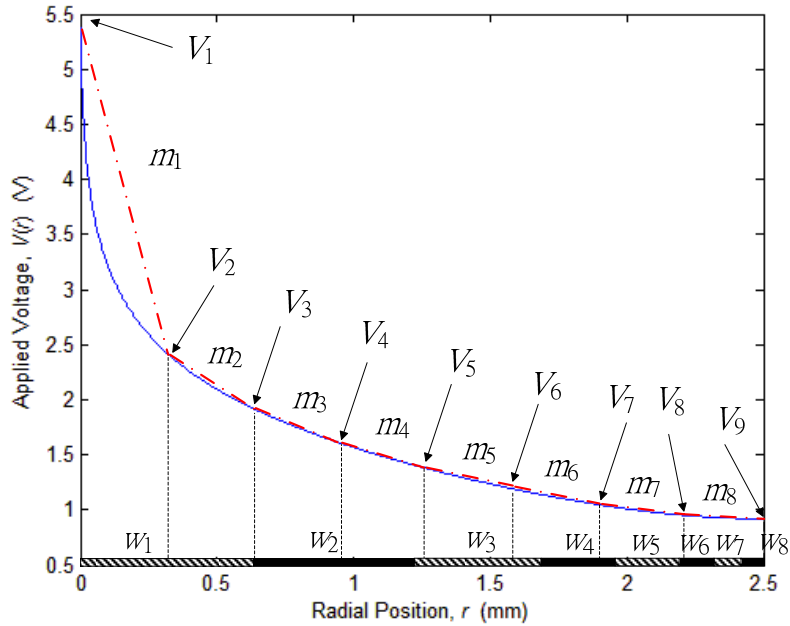


圖 24 環電極寬度與電壓分佈圖

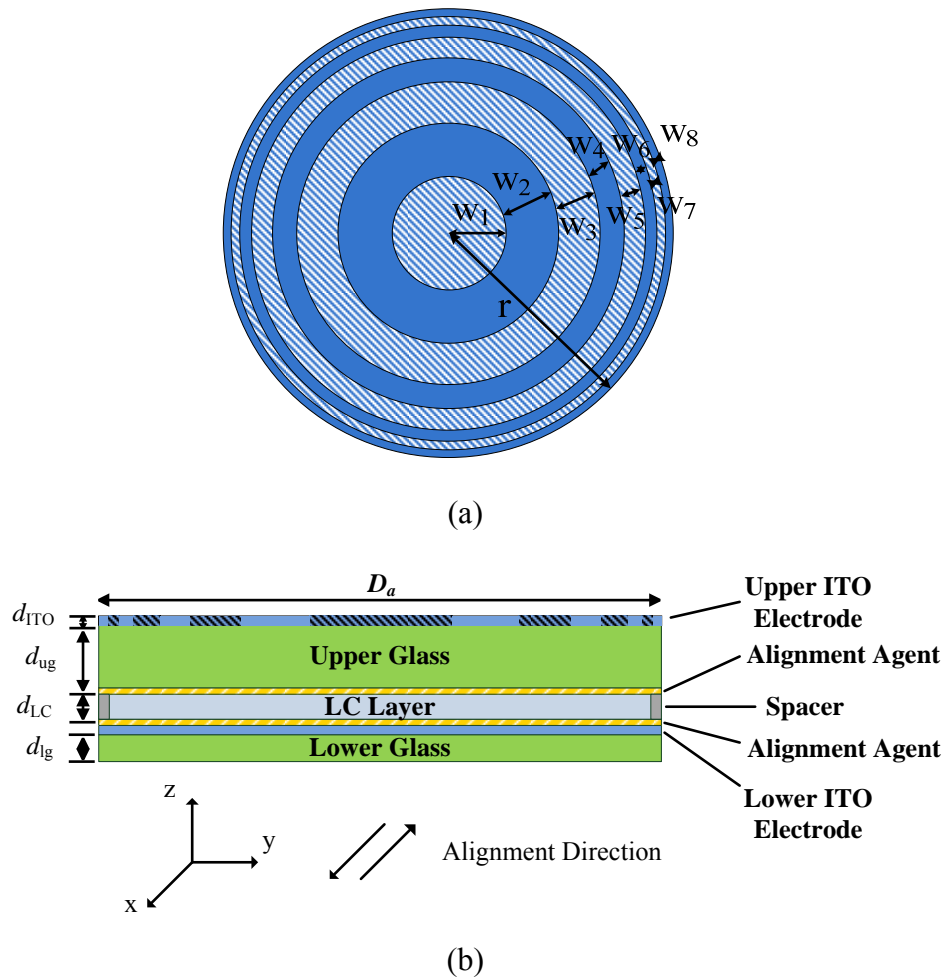


圖 25 (a) 多環不等寬負型透鏡之電極結構圖；  
 (b) 多環不等寬負型液晶透鏡結構圖

液晶負透鏡的表面電極及各層結構如圖 25 所示，液晶負透鏡由兩層 ITO 玻璃組成，ITO 薄膜約為 90~100nm、上層 ITO 玻璃厚度為 700 $\mu$ m，ITO 上蝕刻有八個環電極圖案、中間液晶層厚度為 50 $\mu$ m、下層玻璃厚度為 300 $\mu$ m，ITO 為整面無蝕刻薄膜。

設計前期先以液晶模擬軟體 DIMOS.2D 模擬出等電位線與液晶轉動角度，再利用軟體 MATLAB 計算出折射率分佈，最後經由此折射率分佈推算出相對應之等效焦距。此外，也利用光追跡軟體 TracePro 做光強度分佈之模擬，用以模擬與比較設計之液晶負透鏡與理想之負型漸進式折射率透鏡於光強度分佈上之差異。

DIMOS.2D 可在二維空間中，模擬液晶透鏡橫剖面的光電特性及液晶轉向分

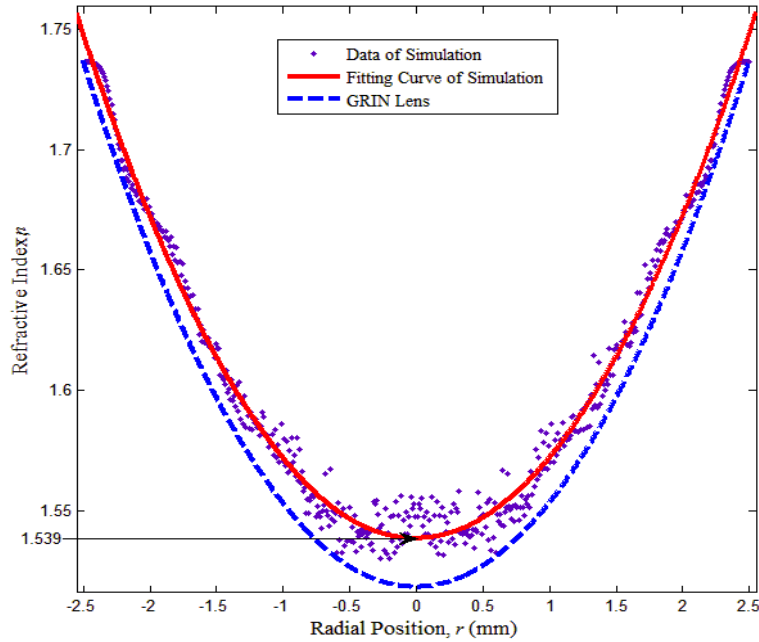


圖 26 負型液晶透鏡 DIMOS.2D 模擬結果

佈，在模擬軟體中依序設定不等寬度的電極、絕緣層(玻璃)、液晶層和底層平面電極，模擬後可得到液晶分子旋轉角度分布，依照液晶分子旋轉角度計算出液晶透鏡折射率分佈。圖 26 中為模擬結果，將所有位置上 DIMOS.2D 所模擬出的液晶折射率分佈進行曲線擬和，可得折射率  $n(r)$  為

$$n(r) = 0.03357r^2 + 0.00007175r + 1.539 \quad (31)$$

而此液晶負透鏡焦距為-298mm，對照負型 GRIN Lens 焦距為-286mm，證明此法可製作出近似於負型 GRIN Lens 折射率分佈的短焦距負透鏡。

另外，使用 LAMBDA 的 TracePro 光學模擬軟體，可進一步探討使用液晶負透鏡時，光強度的變化，該軟體可有效模擬光線追跡的光學系統，將以平行光源對 5mm 孔徑的負型 GRIN Lens 與液晶負透鏡分別進行模擬，如圖 27 所示，基於幾何光學理論，若負透鏡為入射平行光源，於一倍焦距外的觀察面，可接受到光面積為平行光面積的兩倍，在此架構下建立模擬系統，其模擬結果如圖 28 所示，其中圖 28(a)無透鏡下觀察面的光通量、圖 28(b)為經負型 GRIN Lens 後的光通量、圖 28(c)為經液晶負透鏡後的光通量，結果顯示使用負型 GRIN Lens 與液晶負透鏡的光通量相似。

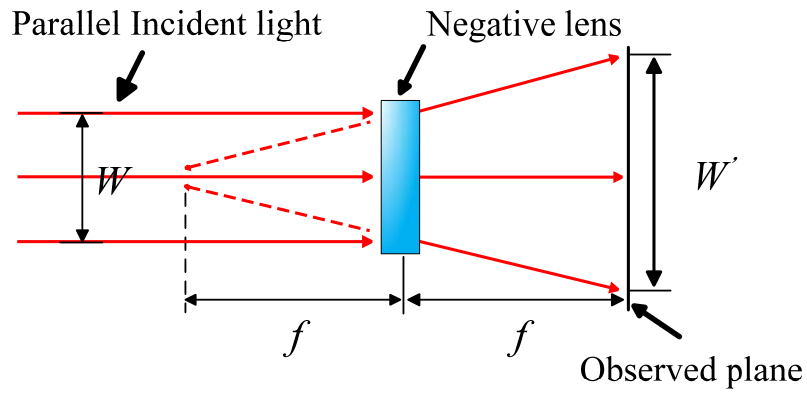


圖 27 負型透鏡之幾何光學圖

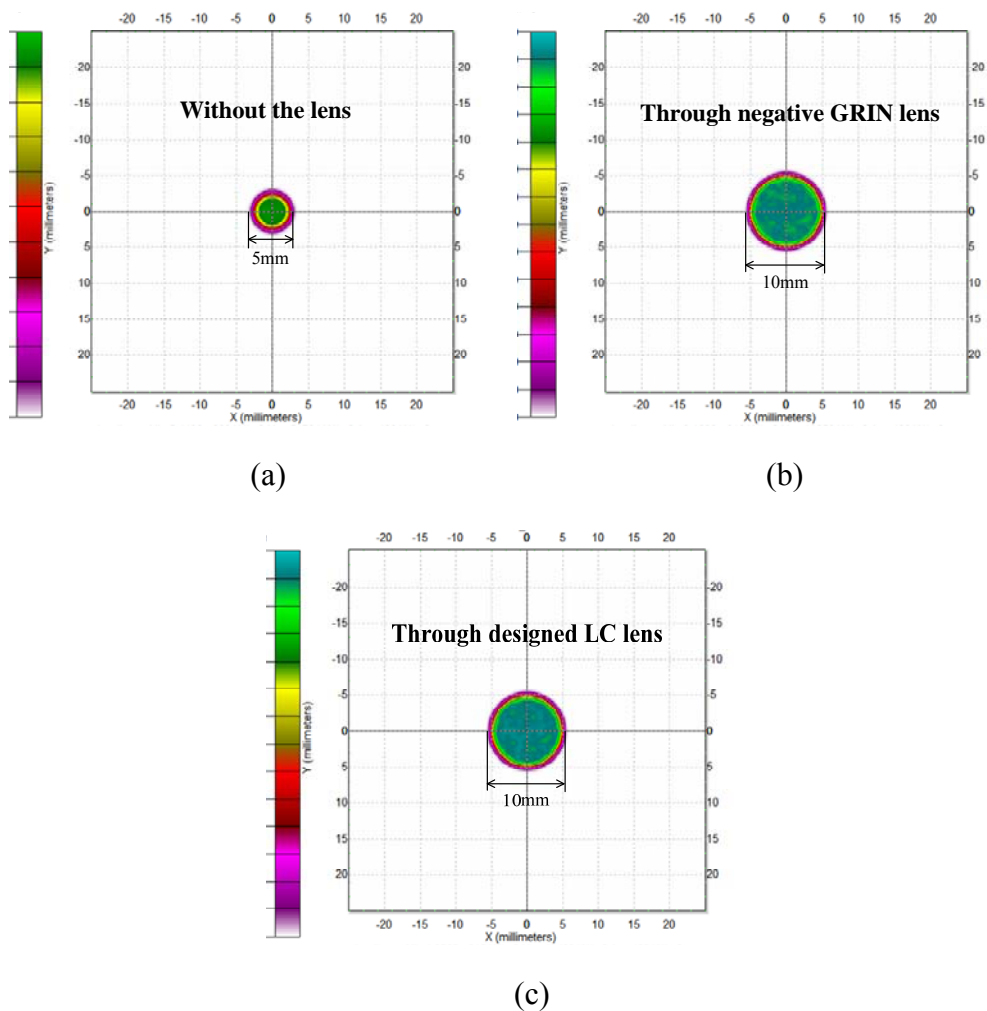


圖 28 光強度分佈模擬結果(a) 未經過任何透鏡；(b) 經 GRIN Lens；  
(c) 經負型液晶透鏡



#### 4.5.2 多圈電極製程

電極製作之製程上，採用多層蝕刻之方式，用以避免電極產生破裂之情形，將可使電場分佈更為平順。電極委託自強基金會製作，並使用透光率為 94% 的 ITO 玻璃進行製作，其八個環電極如圖 29(a) 所示，圖 29(a) 為傳統電極，圖 29(b) 為多層電極製作的電極，圖中並標示出隱埋集電線位置。其蝕刻的光罩如圖 30(a)-(f) 所示，此為晶圓製程使用的光罩，包含八個環電極、奇數電極的孔、偶數電極和絕緣層 SU-8。圖 31 為製程示意圖，其中製程(1)~(2)為電極的傳導線，並徑向延伸至 ITO 玻璃外緣，以利封裝時接線，製程(3)~(7)製作雙數電極，並製作垂直電極，避免電極間的互相干擾及導通，製程(8)蝕刻雙數電極的電極線，製程(9)~(11)製作奇數電極及其垂直電極，製程(12)蝕刻奇數電極的電極線，製作出的多層電極如圖 29(b) 所示，以此法製作的電極，可取代原本在每個電極間須間隔的空間，並藉此加快反應速度，圖 32(a) 為顯微鏡下實際蝕刻出的電極圖案。

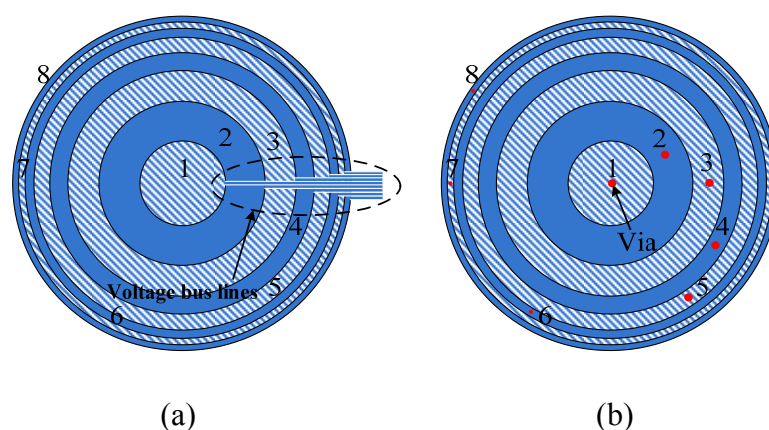


圖 29 (a) 負型液晶透鏡電極設計圖；(b) 負型液晶透鏡電極圖

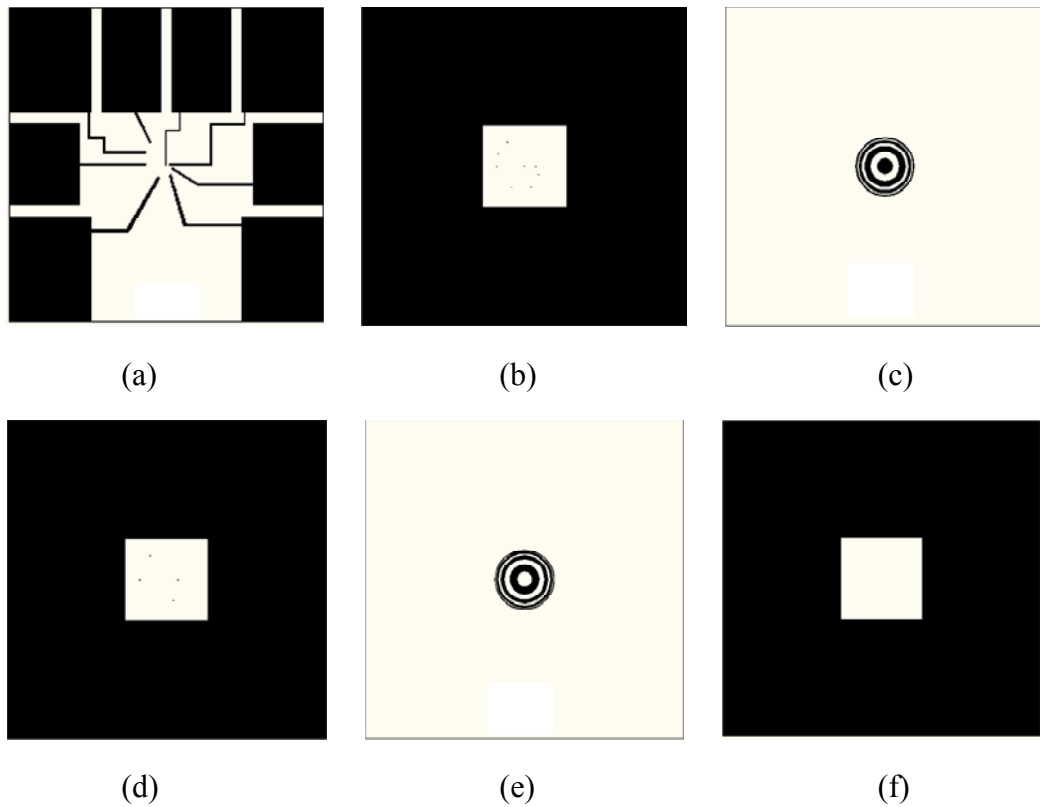


圖 30 光罩圖 (a) 垂直電壓連接線; (b) 雙數環電極之垂直電極點; (c) 雙數環電極; (d) 單數環電極之垂直電極點; (e) 單數環電極 (f) 絕緣層 SU-8

最後，成功地製作出孔徑比傳統液晶透鏡大之多圈不等寬度之液晶負透鏡，如圖 32(b)，並藉由量測干涉條紋計算出其等效焦距；製作之透鏡孔徑為 5mm，最小等效焦距為-357.9mm，並可將其應用於相機上。

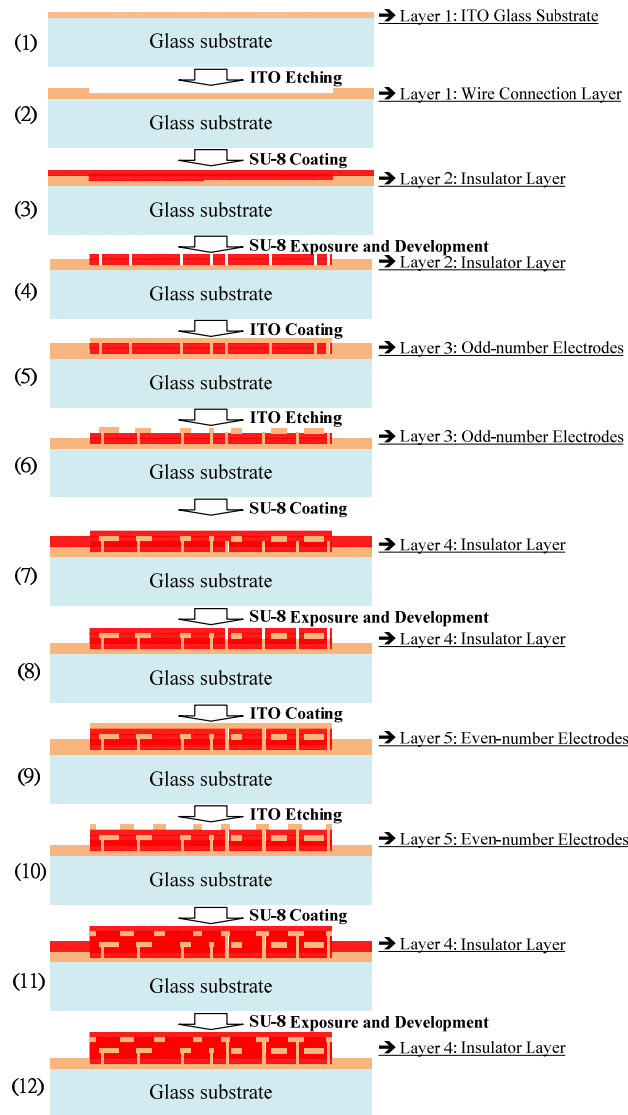
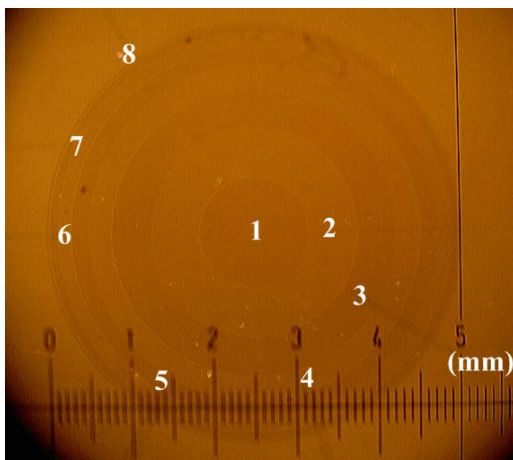
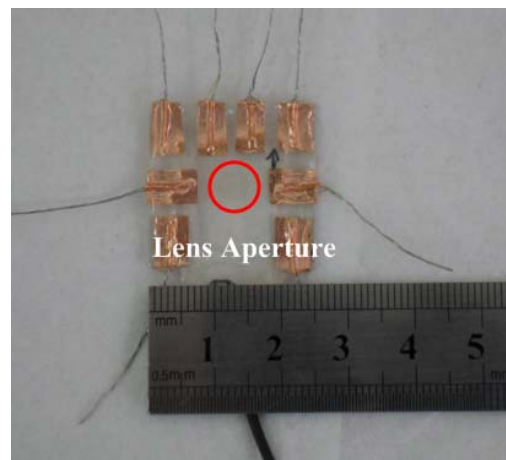


圖 31 不等寬多環電極負型液晶透鏡製程



(a)



(b)

圖 32 (a) 不等寬多環負型液晶透鏡電極圖 (b) 負型液晶透鏡實體圖。

## 5. 結果與討論

### 5.1 多圈不等寬度電極之液晶透鏡

本計畫提出了一個多圈不等寬度電極之液晶透鏡，與原有之孔洞型透鏡比較，本計畫提供了更多的電壓控制變因，使其更可完美控制液晶轉向，得到接近漸進式折射率透鏡的折射率分佈，但由於受到所使用之 ITO 玻璃厚度的限制，其所需之最大驅動電壓尚有過高之疑慮，因此目前希望將電極設計於液晶層內部，如此一來可大大提昇驅動電壓，然而若將電極直接接觸液晶層將使電場分佈較隔著一層玻璃時來得不平順，且液晶轉角分佈在電極間隔處將有不連續現象產生，因此之後將考慮於電極部份塗佈一層 SU-8 材料作為介電層，減緩液晶分子的不連續現象，使電極可作在液晶層內部，不僅可大幅降低驅動電壓，又可充分影響液晶層之分子分佈，使不連續現象因為適當厚度的 SU-8 介電層之影響降到最低，這將是未來要持續努力的地方。

### 5.2 快速反應時間之液晶透鏡

在加速液晶透鏡反應速度的研究上，本研究設計特殊雙層電極，使用雙頻液晶，搭配新穎的變頻控制方式，將液晶透鏡驅動分為三個時期：液晶分子起始轉向、對焦、液晶分子回復，與傳統孔洞式液晶透鏡相同為兩層 ITO 玻璃結構，在不增加液晶透鏡厚度的情況下，即可達到加快反應速度。另外，因第一時期先進行全部液晶分子起始角度的驅動，因此也可避免液晶驅動時液晶轉角分佈不連續現象的問題，此研究提出一新穎控制方法，不僅解決液晶透鏡反應時間過長，也可避免液晶轉向分佈不連續的現象，使用此法可有效將液晶透鏡驅動時間由 12 秒降低至 5 秒。

### 5.3 可調光軸之液晶透鏡

光軸可調的液晶透鏡可應用於變焦透鏡、閃光燈或 3D 影像取向等，將傳統孔洞式電極均分為三個  $120^\circ$  的扇形電極，以最少的電極數量，即可有效控制光軸偏移各種角度及方向，並以簡單的控制法預測其角度及方向，本研究所製作出的液晶透鏡，光學聚焦點平均移動量為  $4.778(\mu\text{m}/\text{V})$ ，光軸平均偏移角度為  $0.0179(^\circ/\text{V})$ 。

#### 5.4 低驅動電壓液晶透鏡

使用多圈不等寬電極設計，期可於低電壓驅動下，使液晶透鏡之折射率分佈近似於完美的 GRIN Lens 折射率分佈，研究中將傳統孔洞式液晶透鏡電極設計改為使用八個環電極，並使用不等寬的電極設計，基於 GRIN Lens 的折射率分佈，將液晶透鏡環電極寬度分別計算出來，並經由 2DIMOS.2D 與 Matlab 軟體計算，可得知在中心最高電壓改變時，各環電極之驅動電壓分佈。由模擬結果可知，於中心最大電壓為 4V 至 10V 驅動液晶透鏡時，其折射率分佈皆近似於 GRIN Lens。另外，為使液晶透鏡可完美呈現聚焦現象，將傳統電極傳導線改由垂直電極方式，以避免傳導線區域液晶分子轉向不連續的現象。實驗結果可得知，使用多環不等寬電極之液晶透鏡，在低驅動電壓下，即可得到良好之聚焦效果。

#### 5.5 多圈不等寬度電極之液晶負透鏡

延續前兩年成果，設計並製造液晶負透鏡，結合 CMOS 影像擷取系統，以驗證液晶透鏡於成像系統上的功效。以負型 GRIN Lens 的折射率分佈為設計目標，並計算出液晶負透鏡之最佳化折射率分佈，由此模擬結果設計出 8 圈不等寬度的環電極，並經由 2DIMOS.2D 與 TracePro 光學模擬軟體的驗證，可知八圈電極的液晶透鏡折射率分佈與負型 GRIN Lens 雷同，並且經平行光源進入後，液晶負透鏡與負型 GRIN Lens 有相同的光學結果。

在製程上，為使八個環電極的傳導線不干擾液晶透鏡聚焦品質，設計多環電極及垂直電極，並搭配 SU-8 絕緣層的使用，將奇數電極與雙數電極分開製作，可有效降低液晶透鏡厚度，且其折射率分佈可近似於負型 GRIN Lens 的液晶透鏡。

## 6. 參考文獻

- [1] S. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.* 18, 1679 (1979)
- [2] M. Ye and S. Sato, "Optical properties of liquid crystal lens of any size," *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, pp. L571-L573, 2002.
- [3] Philip J. W. Hands, Andrew K. Kirby and Gordon D. Love, "Adaptively addressed liquid crystal lenses," *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v 5518, Liquid Crystals VIII, p 136-143, 2004
- [4] M. Ye, Shin Hayasaka and S. Sato, "Liquid Crystal Lens Array with Hexagonal-Hole-Patterned Electrodes" *Jan. J. of Appl. Phys.*, vol. 43, No. 9A, pp. 6108-6111, 2004
- [5] B. Wang, M. Ye, S. Sato, "Liquid crystal lens with stacked structure of liquid-crystal layers", *Optics Communications*, v 250, n 4-6, Jun 15, pp. 266-273 (2005)
- [6] Mao YE, Bin WANG, Marenori KAWAMURA, and Susumu SATO, "Image Formation Using Liquid Crystal Lens", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 10A, 2007, pp. 6776-6777
- [7] M. Ye, B. Wang, and S. Sato, "Development of High Quality Liquid Crystal Lens" *SPIE*, vol. 6487, pp. 64870N-64870N-12, 2007.
- [8] C.-W. Chiu, Y.-C. Lin, P. C.-P. Chao, and A. Y.-G. Fuh, "Achieving High Focusing Power for a Large-aperture Liquid Crystal Lens with Novel hole-and-ring Electrodes," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 19277-19284, November 2008.
- [9] M. Ye, B. Wang, S. Sato, "Liquid crystal lens with focus movable in focal plane", *Optics Communications*, v 259, n 2, Mar 15, pp. 710-722 (2006)
- [10] E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley, New York, 1987)
- [11] F. C. Frank, "Liquid Crystals: Theory of liquid crystal," *Discuss. Faraday Soc.* 25, 19, (1958)
- [12] M. F. Schiekol and K. Fahrenschon, "Deformations of nematic liquid crystals with vertical orientation in electric fields", *Appl. Phys. Lett.* vol. 19, pp. 391 (1971)

- [13] M. Ye, and S. Sato, "New Method of Voltage Application for Improving Response Time of a Liquid Crystal Lens," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, vol. 433, pp. 229-236, 2005.
- [14] M. Ye, B. Wang, and S. Sato, "Driving of Liquid Crystal Lens without Disclination Occurring by Applying In-Plane Electric Field," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 42, pp. 5086-5089, 2003.
- [15] S. Jobling, Y. Williams, J. Liou, and I. C. Khoo, "Low Voltage Behavior and Electro-optical Switching Properties of Dual-frequency Nematic Liquid Crystals," *NSF EE REU PENN STATE Ann. Research Jour.*, vol. III, 2005
- [16] M. Ye, B. Wang, and S. Sato, "Liquid Crystal Lens with Focus Movable in Focal Plane" *Optics Communications*, Vol. 259, 710-722, 2006.
- [17] H. Ren, D. W. Fox, B. Wu, and S.-T. Wu, "Liquid Crystal Lens with Large Focal Length Tunability and Low Operating Voltage", *Optics Express*, Vol. 15, No.18, 11328-11335, 2007.
- [18] W. Tai and R. Schwarte, "Design of an aspherical lens to generate a homogenous irradiance for three-dimensional sensors with a light-emitting-diode source", *Applied Optics*, Vol. 39, No.31, 5801-5805, 2000.
- [19] T. Galstian, V. Presniakov, K. Asatryan, and A. Tork, "Electrically Variable Focus Polymer-Stabilized Liquid Crystal Lens Having Non-Homogenous Polymerization of a Nematic Liquid Crystal/Monomer Mixture" United States Patent, US 7218375, 2007.
- [20] C.-W. Hsueh and P. C.-P. Chao, "A novel liquid crystal lens with multiple ring electrodes in unequal widths," Master Thesis, NCTU (2008).
- [21] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley, (2002).
- [22] B. Wang, M. Ye, and S. Sato, "Liquid crystal negative lens," *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**(7A), 4979-4983 (2005).
- [23] B. Wang, M. Ye, and S. Sato, "Liquid crystal lens with focal length variable from negative to positive values," *IEEE Photo. Tech. Let.* **18**(1), 79-81 (2006).
- [24] M. Ye, B. Wang, Y. Sato, M. Kawamura, R. Yamaguchi, and S. Sato, "Transient properties during positive-negative switching of liquid crystal

- lens,” *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **480**, 44-48 (2008).
- [25] Y.-Y. Kao, Paul C.-P. Chao and C.-W. Hsueh, “A new low-voltage-driven GRIN liquid crystal lens with multiple ring electrodes in unequal widths,” *Opt.*
- [26] T. C. Kraan, T. van Bommel, and R. A. M. Hikmet, “Modeling liquid-crystal gradient-index lenses,” *J. Opt. Soc. Am. A* **24**(11), 3467-3477 (2007).
- [27] *Exp.* **18**(18), 18506-18518 (2010)



## 7. 計畫成果自評

### 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：本研究相關成果

本計劃兼具理論分析與實務操作，將自動變焦系統加入原本薄型化之手機相機模組內，使一般受空間限制而無法自動對焦系統得以實現。本研究更能應用在其他光學領域，如雷射變焦、光鉗 3D 操作及 3D 顯示器，包括電機控制、生物醫療及光學應用，並滿足相關生物產業之需要。設計出焦距可調式液晶透鏡(Tunable-Focusing Liquid Crystal Lens, 簡稱 Tunable LC lens)，藉由液晶的光電特性來取代傳統的玻璃或塑膠光學鏡片。今年成果效益國際會議論文五篇；國際 SCI 等級期刊論文三篇，已送審國際期刊論文兩篇。

而三年計畫總產出共有國際會議論文八篇，其中兩篇為 EI 等級；國際 SCI 等級期刊論文五篇；已通過國內專利一項，國內申請中專利一項，撰寫中專利兩項；另外本研究計算延伸之學術成果將陸續彙整後，發表於國內外各學術期刊。

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)

本子計畫期許發展新型液晶透鏡取代傳統玻璃或是塑膠鏡片組成之鏡群組，預期可以大大減少鏡群組之體積。舊有之液晶透鏡，由於透鏡孔徑大時將導致許多成像品質的問題，因此若要應用於「自動對焦」的商品化上，無法直接將舊有之液晶透鏡直接放置於相機模組的感測器前，因為舊有之液晶透鏡的孔徑過小，將限制入射光的範圍，使得感測影像受到限制，導致影像品質不佳。因此本計畫設計之新型液晶透鏡可大幅改善此一問題，因為本計畫之新型液晶透鏡由最基本之電極結構作改良，增加液晶透鏡的孔徑大小，可將液晶透鏡放置於感測器前，更直接地調變焦距，使得透鏡對入射光的影響達到最低，如此一來更可減少相機模組的體積，更利於生產製造商利用剩餘之空間體積增加其餘消費功能替產品加分，使產品更受消費大眾所青睞。

本子計畫之關鍵技術在於開發一新型之透鏡以取代傳統之玻璃級塑膠鏡片，利用液晶材料之雙折射率特性及液晶分子隨電場方向排列的特性等效為一特殊之光學透鏡，再加以調變驅動電壓即可改變液晶透鏡之等效折射率產生變焦之效果。亦即利用單一變焦液晶透鏡即可等效習知傳統技術之自動對焦鏡群組。

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2011/10/31

國科會補助計畫	計畫名稱: 子計畫四: 創新液晶變焦透鏡應用於手機相機模組化鏡頭之實現(3/3)		
	計畫主持人: 趙昌博		
	計畫編號: 99-2220-E-009-005-	學門領域: 晶片科技計畫--整合型學術研究計畫	
研發成果名稱	(中文) 孔洞同心圓與多層孔洞電極式液晶透鏡		
	(英文) A liquid crystal lens with combined hole-ring electrodes structure and multilayer hole electrodes		
成果歸屬機構	國立交通大學	發明人 (創作人)	趙昌博, 丘祺緯, 林育正, 薛傑文
	<p>(中文) 本專利為設計一新型液晶變焦透鏡, 不同於習知液晶變焦透鏡的電極材料與結構, 本專利之電極材料僅使用鍍有氧化銦錫(ITO)透明電極之玻璃; 下電極為一接地電極, 而上電極結構有三: 第一為液晶層上方之電極為孔洞同心圓雙電極, 外圍孔洞內徑依設計可為2公厘至7公厘, 內圈同心圓環直徑可為1公厘至6公厘; 另一為上方堆疊兩層電極為兩層氧化銦錫(ITO)透明電極之玻璃, 兩電極之孔洞內徑可為2公厘至7公厘; 第三為將二之兩層氧化銦錫(ITO)透明電極鍍於單一玻璃之上下平面, 以減少玻璃平板體積。本專利之新型液晶變焦透鏡設計準則依循漸變折射率透鏡(GRIN lens)聚焦原理與習知液晶變焦透鏡之設計理論, 以此二原理加以最佳化本專利的新型液鏡變焦透鏡結構, 設計過程亦搭配液晶特性之模擬軟體建立數學模型, 以作為設計液晶變焦透鏡前的評估與參考。遵循數學模型之最佳化設計, 對上方兩電極施予適當之不同電壓, 將產生液晶變焦透鏡所需之不均勻電場。藉此電極結構與施於其上之不同電壓設計不僅可改善習知液晶變焦透鏡中心電場的不足, 亦可提供另一種不同於習知液晶變焦透鏡之驅動方法, 以消除因液晶層轉向不同所產生disclination line現象。</p> <p>(英文) In recent years, the on-line tunability in the focal length of a common variable focus lens is achieved by the mechanical motion of the individual lenses in CCM. The control mechanism for lens motion is generally complicated, and the movements of the lenses usually need a large space. To remedy the problem, the LC tunable lens is proposed and used in the CCM herein to save space in mobile phones. In the first year of project execution, it is planned to establish the optical model of the LCs and predict the resulted index change distribution and the focus length. The theoretical predictions are also validated by commercial software. With the LC lens well designed, the LC lenses are optimized to lead to best focusing capability with a measure defined.</p>		
產業別	電機及電子機械器材業; 光學及精密器械製造業		
技術/產品應用範圍	可應用於光電、通訊、消費電子產業; 可用於相機手機鏡頭、生醫光鉗系統		
技術移轉可行性及預期效益	可將技術轉移給鏡頭生產廠商、照相機模組廠商等		

註: 本項研發成果若尚未申請專利, 請勿揭露可申請專利之主要內容。

99 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：趙昌博		計畫編號：99-2220-E-009-005-					
計畫名稱：創新異質整合智慧型手機相機模組之研究--子計畫四：創新液晶變焦透鏡應用於手機相機模組化鏡頭之實現(3/3)							
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	3	0	100%	件	
		已獲得件數	1	2	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	3	3	100%	人次	
		博士生	2	2	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	5	7	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	8	8	100%		
		專書	0	0	100%	章/本	
	專利	申請中件數	0	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（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 style="text-align: center;"><b>其他成果</b></p> <p>(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>本子計畫期許發展新型液晶透鏡取代傳統玻璃或是塑膠鏡片組成之鏡群組，預期可以大大減少鏡群組之體積。舊有之液晶透鏡，由於透鏡孔徑大時將導致許多成像品質的問題，因此若要應用於「自動對焦」的商品化上，無法直接將舊有之液晶透鏡直接放置於相機模組的感測器前，因為舊有之液晶透鏡的孔徑過小，將限制入射光的範圍，使得感測影像受到限制，導致影像品質不佳。因此本計畫設計之新型液晶透鏡可大幅改善此一問題，因為本計畫之新型液晶透鏡由最基本之電極結構作改良，增加液晶透鏡的孔徑大小，可將液晶透鏡放置於感測器前，更直接地調變焦距，使得透鏡對入射光的影響達到最低，如此一來更可減少相機模組的體積，更利於生產製造商利用剩餘之空間體積增加其餘消費功能替產品加分，使產品更受消費大眾所青睞。</p> <p>本子計畫之關鍵技術在於開發一新型之透鏡以取代傳統之玻璃級塑膠鏡片，利用液晶材料之雙折射率特性及液晶分子隨電場方向排列的特性等效為一特殊之光學透鏡，再加以調變驅動電壓即可改變液晶透鏡之等效折射率產生變焦之效果。亦即利用單一變焦液晶透鏡即可等效習知傳統技術之自動對焦鏡群組。</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）

本計畫兼具理論分析與實務操作，將自動變焦系統加入原本薄型化之手機相機模組內，使一般受空間限制而無法自動對焦系統得以實現。本研究更能應用在其他光學領域，如雷射變焦、光鉗 3D 操作及 3D 顯示器，包括電機控制、生物醫療及光學應用，並滿足相關生物產業之需要。設計出焦距可調式液晶透鏡(Tunable-ocusing Liquid Crystal Lens, 簡稱 Tunable LC lens)，藉由液晶的光電特性來取代傳統的玻璃或塑膠光學鏡片。今年成果效益國際會議論文五篇；國際 SCI 等級期刊論文三篇，已送審國際期刊論文兩篇。

而三年計畫總產出共有國際會議論文八篇，其中兩篇為 EI 等級；國際 SCI 等級期刊論文五篇；已通過國內專利一項，國內申請中專利一項，撰寫中專利兩項；另外本研究計算延伸之學術成果將陸續彙整後，發表於國內外各學術期刊。

## 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）

本子計畫期許發展新型液晶透鏡取代傳統玻璃或是塑膠鏡片組成之鏡群組，預期可以大大減少鏡群組之體積。舊有之液晶透鏡，由於透鏡孔徑大時將導致許多成像品質的問題，因此若要應用於「自動對焦」的商品化上，無法直接將舊有之液晶透鏡直接放置於相機模組的感測器前，因為舊有之液晶透鏡的孔徑過小，將限制入射光的範圍，使得感測影像受到限制，導致影像品質不佳。因此本計畫設計之新型液晶透鏡可大幅改善此一問題，因為本計畫之新型液晶透鏡由最基本之電極結構作改良，增加液晶透鏡的孔徑大小，可將液晶透鏡放置於感測器前，更直接地調變焦距，使得透鏡對入射光的影響達到最低，如此一來更可減少相機模組的體積，更利於生產製造商利用剩餘之空間體積增加其餘消費功能替產品加分，使產品更受消費大眾所青睞。

本子計畫之關鍵技術在於開發一新型之透鏡以取代傳統之玻璃級塑膠鏡片，利用液晶

材料之雙折射率特性及液晶分子隨電場方向排列的特性等效為一特殊之光學透鏡，再加以調變驅動電壓即可改變液晶透鏡之等效折射率產生變焦之效果。亦即利用單一變焦液晶透鏡即可等效習知傳統技術之自動對焦鏡群組。