

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

寬頻液晶空間相位調制器

**Broad Band Liquid Crystals Spatial Light
Modulator**



研究生：梁為弘

指導教授：孔慶昌 教授

潘犀靈 教授

中華民國九十八年七月

寬頻液晶空間相位調製器

研究生：梁為弘

指導教授：孔慶昌博士

潘犀靈博士

國立交通大學光電工程學系碩士班

摘要

由於阿秒雷射系統中需要運用從紅外光至紫外光下的光源，因此我們目的製作可調變此波段下的脈衝光源的液晶空間相位調變器。

觀察液晶面板技術中，其結構的各部份對於非可見光的波段有極高的吸收度，常使用的導電薄膜為氧化銦錫，其對於紫外光和紅外光有極高的吸收。為滿足寬頻波段使用，由鎢化錫和氧化銦錫奈米柱結構取代為導電膜。對於鎢化錫薄膜我們改變濺鍍的時間和使用的濺鍍功率。氧化銦錫奈米柱結構則是使用 e-gun 改變厚度和製程參數，找到可使高穿透並且可接受片電阻之最佳化製程參數。我們也探討各種不同配向膜製作上最佳配向參數需要，以及對於紅外光與紫外光的使用上優劣比較。液晶雖已經使用 80% 以上穿透率的液晶，卻會受到紫外光的影響，造成元件性質被改變。對 355nm 波長脈衝光做元件光生命期的量測，可以找出在 355nm 波段使用下元件生命期和調變能力的改變與入射脈衝光的雷射光束尺寸以及單位面積紫外光源強度的關連性。

Broad Band Liquid Crystals Spatial Light Modulator

Graduate student: Wei-Hong Liang

advisor: A.H. Kung

Ci-Ling Pan

Institute of Electro-Optical Engineering,
National Chiao Tung University

Abstract

The goal of this project is to develop a liquid crystal spatial light modulator (SLM) that covers the range from the ultraviolet to the infrared that is suitable for use in modulating light in the attosecond regime.

Commercial SLMs are primarily for use in the near-ir and the visible from 1600 nm to 430 nm. They use ITO as the electrode material that has a high absorption in the uv and the infrared. In order to satisfy our requirement, we tested both TiW and nanorod ITO as replacement of ITO as the electrode material. TiW was deposited onto the substrate by DC sputtering. For nanorod ITO we used e-gun deposition. In both cases the deposition parameters were optimized to vary the thickness and resistivity of the thin film electrode for the most suitable performance. For the alignment layer suitable materials include Nissan 130B, MAP, DMOAP and Fe_2O_3 .

We fabricated a number of devices and compared their performance as SLM in the uv and the ir. We find that in the uv the performance of the devices degrade with time although the overall device transmission is greater than 80%. Lifetime tests were done at 355 nm to obtain a connection between the lifetime and the beam size as well as the incident intensity of the uv light.

誌謝辭

因為實驗上的需要，在碩班的日子中幾乎是每個禮拜在交大台大兩頭跑。而在實驗上，常常需要進入一個陌生的環境去學習新的技術等等。這樣的鍛鍊，讓我自己有了獨立思考與凡事需要靠自己的做事態度，也讓我對面對問題的韌性達到很大的進步。而在這麼多實驗室間來往後瞭解到，要結合多種不同技術達成目標，不同技術領域間的良好溝通是絕對必需的。這也使從前缺乏與人溝通能力的我得到了非常大的鍛鍊。

感謝碩班兩年原分所的孔慶昌博士，也就是我的指導教授之一，對於我的指導。教授所展現出來的研究精神和待人處事的方法，都值得我在未來的人生中再三學習。感謝交大光電所教授，現任清大物理系教授的潘犀靈博士，也就是我的另一個指導教授每個禮拜對於實驗上所遇到的問題，提出建議。這使我在實驗進度上能夠一步步達到我所想要的目標。感謝趙如蘋教授提供液晶實驗室的各項器材和儀器以供我實驗上的需要，雖然我不是交大電子物理的碩士班學生，但是花最多時間的地方卻是在液晶實驗室。因此真的非常感恩液晶實驗室對於一個外系所我的包容。感謝台大光電所彭隆瀚教授實驗室外借我 metal sputter 的使用，讓我完成 TiW 導電薄膜的製作。感謝成大光電所許家榮教授對於我配向薄膜 MAP 使用上的指教與幫忙。

接下來感謝不同實驗室的幫忙，首先感謝中央研究院原子分子所孔慶昌實驗室。謝智明學長在實驗上量測的幫忙以及不厭其煩讓我瞭解對於系統上的的困惑。感謝裴善莊學長在元件對紫外光量測上建議，對於我進行這部份的實驗有非常大的幫忙。以及他對未來人生規劃的剖析更是精闢，讓我受用無窮。感謝王菘豐學長教導我 metal

sputter 上的使用。感謝賴建任學長對於 smooth table 程式的提供。感謝陳威廷、詹翰松和陳蔚然學長以及小丟學妹在實驗上或多或少的幫助與指教。感謝徐維駿同學在碩班兩年不管是學業、實驗以及生活中的互相幫忙與排解苦悶。

感謝交大光電所潘犀靈實驗室的 Moya、Mika、林晏徵、林瑜良和楊承山在碩班短短兩年中的和樂相處。

感謝交大光電所余沛慈實驗室的余敏翔和楊勁生同學對於 Nanorod ITO 的提供，沒有你們不求回報的持續幫忙我可能沒有辦法完成我的碩士論文十分重要的部份。

感謝液晶實驗室的家任、卓凡學長能夠認識你們讓我深深感到博班也能有顆年輕的心。感謝阿達學長在實驗上的幫助。感謝阿鈺、正彬、小白熊、哲瑄、瑋達、夢秋和天昱，能夠認識你們這群好朋友算是我這輩子的福氣。

感謝醫光科技公司的張小姐，耐心的替我處理購買靶材的相關業務。

最後我要感謝我的爸爸，由於他工作上的專業領域正可以給我這個懵懵懂懂的碩班學生很多的建議與正確的方向。爸爸感謝您對於我人生起步的幫忙，我會牢記在心。未來的日子我可以過得更踏實。

目錄

中文摘要	-----	i
英文摘要	-----	ii
誌謝辭	-----	iii
目錄	-----	v
圖目錄	-----	vii
表目錄	-----	xi
一、	諸論	1
二、	液晶空間相位調變器的實驗方法之原理	3
2-1	液晶空間相位調變器的操作原理	3
2-2	液晶樣品的量測原理	4
2-2-1	瓊斯矩陣法 (Jones matrix method) 分析	4
2-2-2	液晶元件穿透率量測原理	5
2-2-3	樣品間隙(cell gap) 的量測原理	8
三、	元件製作原理、流程及實驗方法介紹	11
3-1	元件製作	11
3-1-1	元件製作	11
3-1-2	各類配向膜配向原理、製作流程	17
3-1-3	金屬濺鍍機 (Metal Sputter) 原理與實驗	20
3-1-4	黃光製程原理和實驗	22
3-2	IR 至 UV 光源下電壓調變光相位的實驗	25
3-3	元件於紫外光波段脈衝雷射下生命期的量測	27
3-4	阿秒雷射系統(attosecond technology)的實驗方 法和 LC-SLM 系統中的定位	28
四、	實驗結果分析與討論	31
4-1	元件中材料不同造成的穿透率差異	31
4-1-1	元件基板穿透率量測結果	31
4-1-2	元件配向膜穿透率量測結果	32
4-1-3	元件液晶穿透率和性質量測結果	33

4-1-4	TiW 導電薄膜製程參數對穿透率和電性的影響--	36
4-1-5	Nanorod ITO 導電薄膜製程參數對穿透率和電性的影響-----	40
4-1-6	替換材料前後元件於各波段穿透率比較-----	42
4-2	中紅外光 2406nm 至紫外光 355nm 光源下，元件電壓調變光相位結果-----	44
4-3	阿秒雷射系統中元件的操作-----	40
4-4	垂直配向（ Vertical Alignment ）結構中使用液晶 MCL-6608 在製程參數不同造成的配向效果差異-----	49
4-5	紫外光 355nm 光源下元件操作生命期的量測----	55
4-5-1	紫外光對液晶元件的破壞-----	55
4-5-2	光源 Intensity 的量測-----	58
4-5-3	Intensity 對應元件生命期的量測-----	60
4-5-4	cross polarizer 下不同 Intensity 的紫外光源對於液晶元件破壞比較-----	58
五、	結論和未來展望-----	66
參考文獻	-----	67

圖目錄

Fig. 2-1	入射光偏振方向和液晶夾角與液晶長短軸座標系	4
Fig. 2-2	電壓對應穿透率量測裝置圖	5
Fig. 2-3	電壓對於液晶傾斜造成 TE, TM 偏振光感受到折射率對應橢圓球的關係圖	7
Fig. 2-4	TE, TM 偏振光感受到折射率, 對應入射方向與液晶分子夾角的關係圖	8
Fig. 2-5	量測樣品厚度的實驗架設圖	9
Fig. 2-6	empty cell 中實際光路情形	9
Fig. 3-1	五個 channel 的 LC-SLM 其結構圖	11
Fig. 3-2	牛頓環對應於樣品均勻度的示意圖	15
Fig. 3-3	one pixel 的液晶樣品內部結構圖	16
Fig. 3-4	Alkoxysilane 的分子式示意圖	19
Fig. 3-5	Silane 分子的水解和自聚過程	19
Fig. 3-6	Silane 鍵結於基板的過程	20
Fig. 3-7	DMOAP 和 MAP 分子鍵結在基板上的情形	20
Fig. 3-8	金屬濺鍍機	21
Fig. 3-9	LC-SLM 調變 2.4 μ m 波段脈衝光的實驗設置圖	25
Fig. 3-10	LC-SLM 調變 632nm, He-Ne laser 實驗設置圖	25

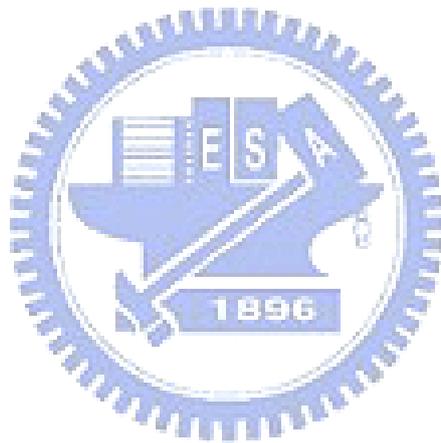
Fig. 3-11	LC-SLM 調變 355nm 波段脈衝光的實驗設置圖-----	25
Fig. 3-12	別是使用 21.3mW 的 355nm 脈衝光在元件上 0 和 1 小時的 紫外光源照射後的電壓穿透率結果-----	28
Fig. 3-13	阿秒雷射系統的實驗架設圖-----	29
Fig. 4-1	紫外光(250nm)至中紅外光(2500nm) 基板的穿透光譜	31
Fig. 4-2	各配像膜加上高穿透基板的穿透率，從紫外光(250nm)至 中紅外光(2500nm)-----	32
Fig. 4-3	不同種類液晶的穿透光譜，從紫外光(250nm)至中紅外光 (2500nm)-----	33
Fig. 4-4	混合成 E7 的四個純物質 (5CB, 7CB, 80CB, 5CT) 分子 結構-----	34
Fig. 4-5	PCH5 的分子結構-----	35
Fig. 4-6	70W 鍍膜 TiW 的導電基板和整體穿透率-----	36
Fig. 4-7	50W 鍍膜 TiW 的導電基板和整體穿透率-----	37
Fig. 4-8	30W 鍍膜 TiW 的導電基板和整體穿透率-----	38
Fig. 4-9	導電薄膜 Nanorod ITO 不同厚度和製成條件穿透率光譜 -----	40
Fig. 4-10	600nm 厚度下的 nanorod ITO 的 SEM 結果-----	41
Fig. 4-11	Nanorod ITO 和原始 ITO 穿透率的比較-----	41

Fig. 4-12	各類代表性元件整體穿透率-----	43
Fig. 4-13	2406、632 和 355 的 VT curve 和對應的 phase modulation Curve-----	45
Fig. 4-14	2406 到 401nm 的 VT curve-----	47
Fig. 4-15	不同種類光源的 VT curve 轉換成 phase modulation 2406nm~602nm-----	
Fig. 4-16	LC-SLM 調變 632nm, He-Ne laser 實驗設置圖-----	25
Fig. 4-17	不同深度轉速 MLC-6608 的配向結果-----	52
Fig. 4-18	scale 固定在 11，不同轉速的配向效果-----	58
Fig. 4-19	355nm 雷射光元件照射前後 cross polarizer 下照片 -----	55
Fig. 4-20	301nm 雷射光元件照射前後 cross polarizer 下照片 -----	56
Fig. 4-21	未配向下 PCH5+fused silica 紫外光照射的影響---	58
Fig. 4-22	初估不同 Intensity 下元件變異程度-----	59
Fig. 4-23	初估不同 Intensity 下元件的生命期-----	60
Fig. 4-24	beam waist=0.68mm, 結束生命期時與 0hour VT curve 的 對照圖-----	60
Fig. 4-25	beam waist=0.15mm, 結束生命期時與 0hour VT curve 的	

對照圖----- 61

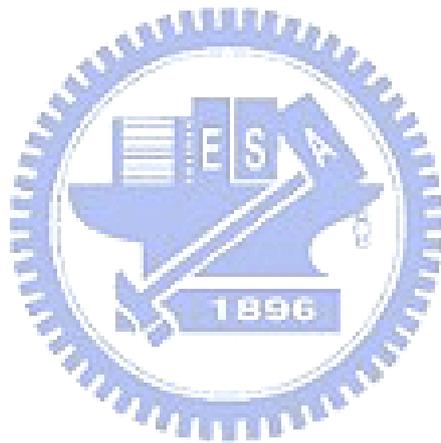
Fig. 4-26 不同 beam size 實際照相----- 62

Fig. 4-27 元件經 355nm 光源照射後當達到我們定義的生命期後，
cross polarizer 下不同 beam size 的結果----- 65



表目錄

圖表一	不同材料下最後完成元件，在紅外光和紫外光的穿透率 -----	42
圖表二	元件各部位於紅外光和紫外光使用上優劣的比較----	44



第一章 緒論

隨著時代的進步，對於顯示器的需求也變的越來越高。此時所使用的背光源過多的吸收或反射造成太多能量的浪費都是問題。想在可見光範圍達到高穿透，面板業界導電膜通常使用氧化銦錫 (Indium tin oxide (ITO) thin films) [1]及高穿透的液晶[2]與配向膜。

因此我們想將相同液晶調變技術應用於阿秒雷射技術 (attosecond technology) [3, 4]，利用液晶基本原理，製作調變光相位和強度之元件。

由於阿秒技術基本原理是由產生的多道距離相同頻率寬度光源，將這些光源調至相位一樣下，轉換到時域下的 pulse width 將會最窄，這就是此技術的基本原理。此多道間隔相同頻率寬度的光源波長範圍是從紅外光 (infrared) 延伸至紫外光 (Ultraviolet) [5-10]。而本實驗主要就是為了能提供達到此波段內光相位和強度調變的元件。

實驗中為了克服一般導電薄膜 (conductive films) ITO 的吸收 [11-13]，我們嘗試用不同導電薄膜作為電極。液晶和配向膜方面則配合不同的結構做不同液晶的選擇，例如：垂直結構 (Vertical Alignment Structure) 使用負型液晶 (Negative dielectric liquid crystal) [14]，平行樣品 (Anti-Parallel Alignment Structure) 使用正型液晶。並且此元件最終必須滿足高穿透的特性。

不同結構為了達到垂直或者水平排列的目的，配合不同種類的配向方式。實驗中嘗試使用類似矽烷 (silane) 水溶液的 Map 或 DMOAP、聚亞醯胺 (Polyimide (PI)) [15, 16] 以及離子束轟擊法

(Ion-Beam) [17] 鍍上氧化鐵作為配向膜，並做磨刷配向 (Rubbing alignment) 由其附著於基板上的狀態對液晶分子做配相。以上元件各部位製作方法都必須找到最佳化的製程條件達到我們的目的。

實驗中將展現量測元件於紅外至紫外光的液晶相位調變結果，並探討紫外光照射後對於元件特性的影響，對量測結果作探討。以及元件如何在阿秒雷射系統中扮演他的角色，達到不同波段脈衝光各自同時調變的目的。



第二章

中紅外光至紫外光可用之液晶空間相位調變器的實驗方法與原理

本章將介紹如何對產生阿秒雷射系統中的 I R 至 U V 波段之脈衝雷射，使用液晶空間相位調變器[18]的操作原理和液晶樣品的量測原理，其量測原理包含樣品間隙(cell gap)的量測、液晶元件穿透率的量測、元件對於紫外光波段耐光強度的量測以及使用不同驅動波形下對於元件液晶行為的影響等等。

2-1 液晶空間相位調變器的操作原理

(2-1-1)和(2-1-2)公式引用於 2-2-1 章節的推導。以下當入射偏振光偏振方向和液晶配向方向夾零度，我可以此 LC-SLM 使用外加驅動電壓單純的控制電場改變的相位 (phase) 卻不會改變光強度 (Power) 的大小。

PM(phase modulator)

$$\begin{aligned} \theta &= 0 \\ E_x &= E_o \left(e^{i n_{eff} k d} \cos^2 \theta + e^{i n_{\perp} k d} \sin^2 \theta \right) = E_o e^{i n_{eff} k d} \\ \dots\dots\dots n_{eff} &= n_{eff}(\theta) = n_{eff}(V_{rms}) \\ I_x &= |E_x|^2 = I_0 \left(\cos^2 \left(\frac{\Delta n}{2} k d \right) + \cos^2(2\theta) \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{2} k d \right) \right) = I_0 \end{aligned} \quad (2-1-1)$$

而當入射偏振方向和液晶配向方向夾 45° ，可將 LC-SLM 當做光強度調變器使用。但是與此同時電場的相位也會受到改變。

AM(amplitude modulator)

$$\begin{aligned} \theta &= 45^\circ \\ I_x &= |E_x|^2 = I_0 \left(\cos^2 \left(\frac{\Delta n}{2} k d \right) + \cos^2(2\theta) \sin^2 \left(\frac{\Delta n}{2} k d \right) \right) \\ &= I_0 \left(\cos^2 \left(\frac{\Delta n}{2} k d \right) \right) \\ \dots\dots\dots \Delta n &= n_{eff} - n_{\perp} = n_{eff}(V_{rms}) - n_{\perp} = \Delta n(V_{rms}) \end{aligned} \quad (2-1-2)$$

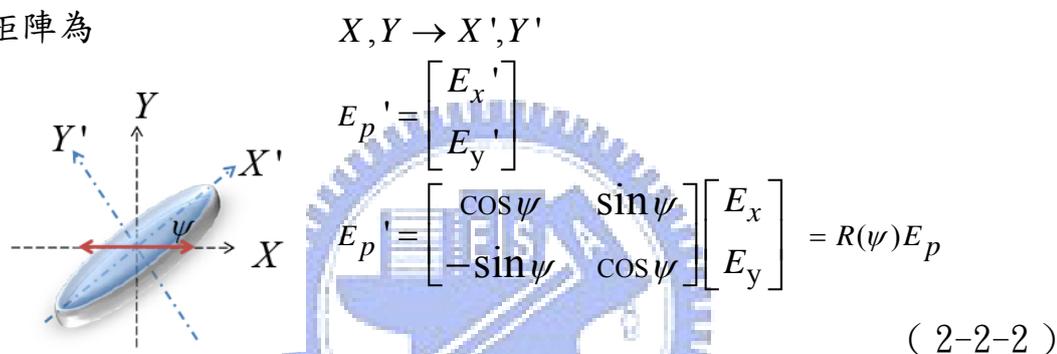
2-2 液晶樣品的量測原理

2-2-1 瓊斯矩陣法(Jones matrix method)分析

瓊斯矩陣法用於分析偏振光通過液晶樣品後的行為，以下是入射偏振光和液晶分子夾角對應折射率(index of refraction)關係。假設入射光的偏振狀態(polarization state)為

$$E_p = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (2-2-1)$$

將入射極化在 XY 座標系的分量投影在液晶元件的快慢軸方向，其轉換矩陣為



$$X, Y \rightarrow X', Y'$$

$$E_p' = \begin{bmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{bmatrix}$$

$$E_p' = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = R(\psi) E_p \quad (2-2-2)$$

Fig. 2-1 入射光偏振方向和液晶夾角與液晶長短軸座標系。

E_p' : 轉置於快慢軸分量的偏振狀態

$E_{x'}$: 入射光在慢軸(slow axis)分量

$E_{y'}$: 入射光在快軸(fast axis)分量

$R(\psi)$: 座標轉換矩陣

在將 XY 分量轉換到液晶座標軸後，接著要通過液晶層，其所對應的 $E_{x'}$ 看到 n_{eff} 而 $E_{y'}$ 看到 n_{\perp} ，所以光通過液晶層的偏振狀態為：

$$E_{LC} = \begin{bmatrix} e^{in_{eff}kd} & 0 \\ 0 & e^{in_{\perp}kd} \end{bmatrix} E_p' = W_o E_p' \quad (2-2-3)$$

d : 液晶層厚度

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \lambda: \text{入射光波長}$$

最後再將此液晶元件在液晶快慢軸的分量轉置回直角座標系

$$E_p'' = \begin{bmatrix} E_x'' \\ E_y'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} E_{LC} = R(-\psi)E_{LC} \quad (2-2-4)$$

所以最中我們可以將通過液晶層的矩陣分析寫成下式：

$$E_p'' = R(-\psi)W_oR(\psi)E_p \quad (2-2-5)$$

入射偏振光 E_p 通過液晶元件用 $R(-\psi)W_oR(\psi)$ 為代表，最後偏振光為 E_p''

2-2-2 液晶元件穿透率量測原理

分析液晶元件穿透率量測的實驗架設，需要偏振片 (Polarizer)，液晶元件 (Liquid crystal cell) 和檢偏片 (Analyzer)，裝置圖如下：

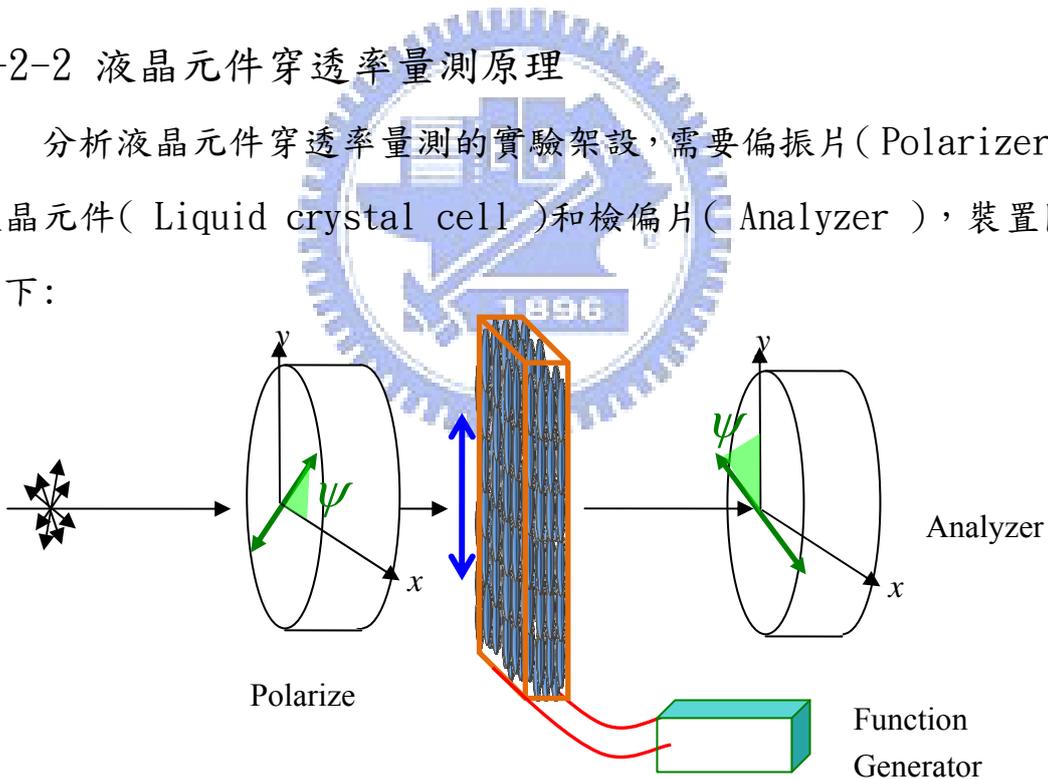


Fig. 2-2 電壓對應穿透率量測裝置圖。

此裝置圖光偏振通過的過程和結果可以用上述的瓊斯矩陣分析：
當入射沒偏振光為 random 的情形時可將其向量表示式，在直角

座標系下表示為：

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-2-6)$$

最後的穿透電場為：

$$E' = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} R(-\psi) W_o R(\psi) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} E_p$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}, \quad W_o = \begin{bmatrix} e^{i n_{eff} kd} & 0 \\ 0 & e^{i n_{\perp} kd} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} E' &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i n_{eff} kd} & 0 \\ 0 & e^{i n_{\perp} kd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ E' &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i n_{eff} kd} & 0 \\ 0 & e^{i n_{\perp} kd} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \psi \\ -\sin \psi \end{bmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i n_{eff} kd} \cos \psi \\ -e^{i n_{\perp} kd} \sin \psi \end{bmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i n_{eff} kd} \cos^2 \psi + e^{i n_{\perp} kd} \sin^2 \psi \\ e^{i n_{eff} kd} \sin \psi \cos \psi - e^{i n_{\perp} kd} \sin \psi \cos \psi \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ e^{i n_{eff} kd} \sin \psi \cos \psi - e^{i n_{\perp} kd} \sin \psi \cos \psi \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{2} e^{i(\frac{n_{eff} + n_{\perp}}{2})kd} \sin 2\psi (e^{i(\frac{n_{eff} - n_{\perp}}{2})kd} - e^{-i(\frac{n_{eff} - n_{\perp}}{2})kd}) \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 \\ i e^{i(\frac{n_{eff} + n_{\perp}}{2})kd} \sin 2\psi \sin(\frac{n_{eff} - n_{\perp}}{2} kd) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} \quad (2-2-7) \end{aligned}$$

上述為最後的偏振光情形，因 analyzer 的關係，其只具有 y 方向的分量。而最後的穿透光強度為 I：

$$\begin{aligned} I &= (E')^\dagger (E') \\ &= \frac{1}{2} \sin^2(2\psi) \sin^2\left[\frac{(n_{eff} - n_{\perp})kd}{2}\right] \quad (2-2-8) \end{aligned}$$

因此可知當

$$\psi = 45^\circ, I = \frac{1}{2} \sin^2 \left[\frac{(n_{eff} - n_\perp)kd}{2} \right]$$

而此式中的

$$n_{eff} = n_{eff}(\theta) = n_{eff}(\theta(Voltage_{rms}))$$

$$= n_{eff}(Voltage_{rms}) \quad (2-2-9)$$

由此可知當我入射偏振和液晶方向夾 45° 時，其造成穿透率改變的變數只剩下了驅動電壓($Voltage_{rms}$)，也就是我們所外加讓液晶元件感受到的方均根電壓。

Fig.1說明將入射偏振於直角座標系轉置於液晶的快慢軸(f(fast axis), s(slow axis))座標系之後，所看到實際偏振光對應於液晶帶來的感受。當入射方向垂直於入紙面為ordinary ray，此時index $n_o = n_\perp$ (fast axis)。當平行於紙面為extraordinary ray，此時index $n_e = n_{eff}$ (slow axis)。而Fig.1最左邊圖，為未加電壓之下液晶的情況，液晶會躺的很接近基板的水平方向（若預傾角(Pretilt Angle)很小）。在中間的圖，當驅動電壓大於臨界電壓($Voltage_{threshold}$)液晶開始出現較大的傾斜。這也造成了偏振光感受到的 n_{eff} 開始對電壓做改變。右圖是其對應的折射率橢球。

Fig. 2內其對應折射率橢球的公式可以看到實際上 o-ray、e-ray 所對應的值。

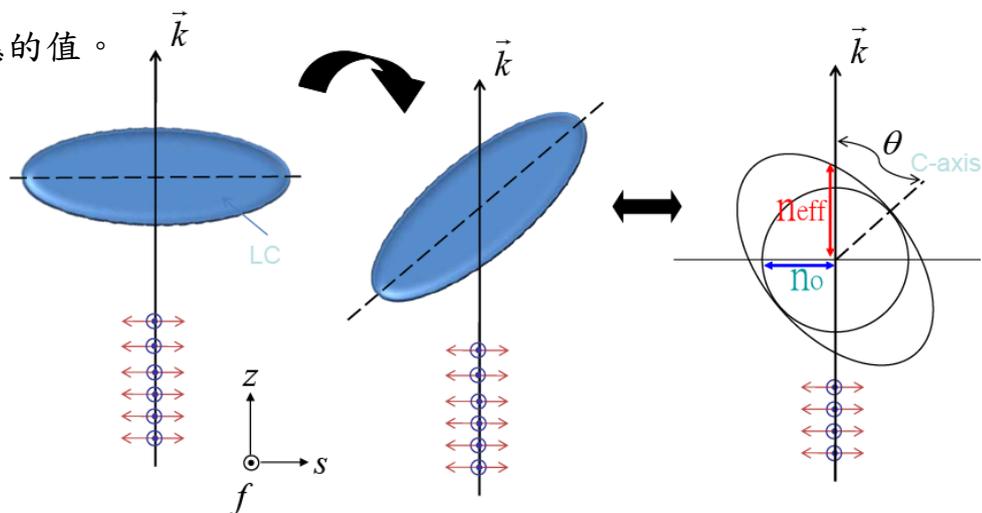


Fig. 2-3 電壓對於液晶傾斜造成 TE, TM 偏振光感受到折射率對應橢圓球的關係圖。

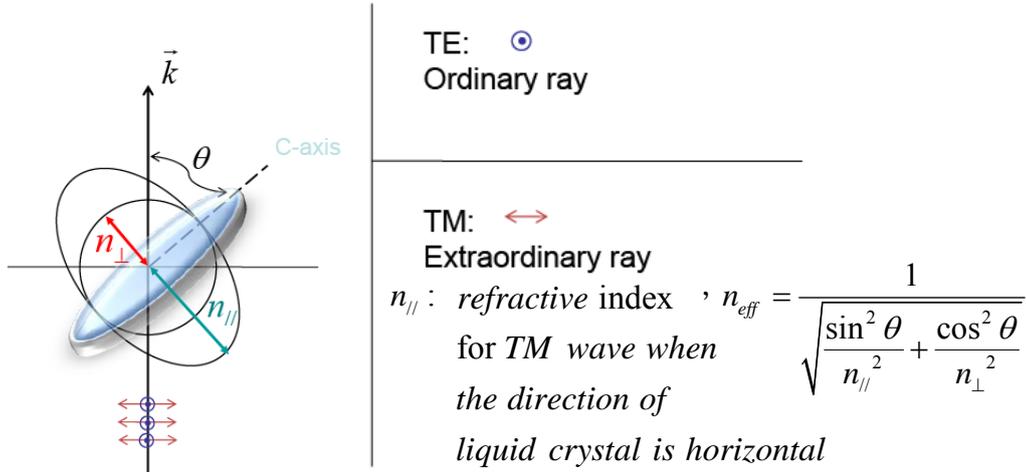


Fig. 2-4 TE, TM 偏振光感受到折射率，對應入射方向與液晶分子夾角的關係圖。

2-2-3 樣品間隙(cell gap)的量測原理[19]

為了得知液晶元件的其他物理量，例如：pretilt 或造成光相位調變的大小等。若想推測這些物理量，都必須知道樣品間隙(cell gap)大小，對其的影響。一般的樣品製作中想要做出兩片玻璃的間隙，必須在之中加入已知厚度的間隔物(spacer)，例如：細小的玻璃棒(glass rods)或聚酯薄膜(mylar)等。這些間隔物雖然是已知厚度的物體，可是卻因為在製作的過程中的微小粒子存在於玻璃間，或因 spacer，玻璃本身就不均勻，造成一個樣品的不同位置厚度往往有很大的差距。因此想要知道樣品某點的厚度，需要經過實際的量測。

本實驗利用具高穩定性的 He-Ne Laser 作為 laser source。通過樣品會經過多重的反射，這些多次反射光相互間會因為所走光程差的不同造成干涉現象，其中因為太多次的反射會造成光強度太低而沒有干涉的作用，最有貢獻的是一次穿透光 Ray1 和兩次反射光 Ray2。而此現象和入射光與反射面的夾角又有所關聯。因此旋轉樣品角度造成光強度的明暗變化。以下為實驗設置圖：

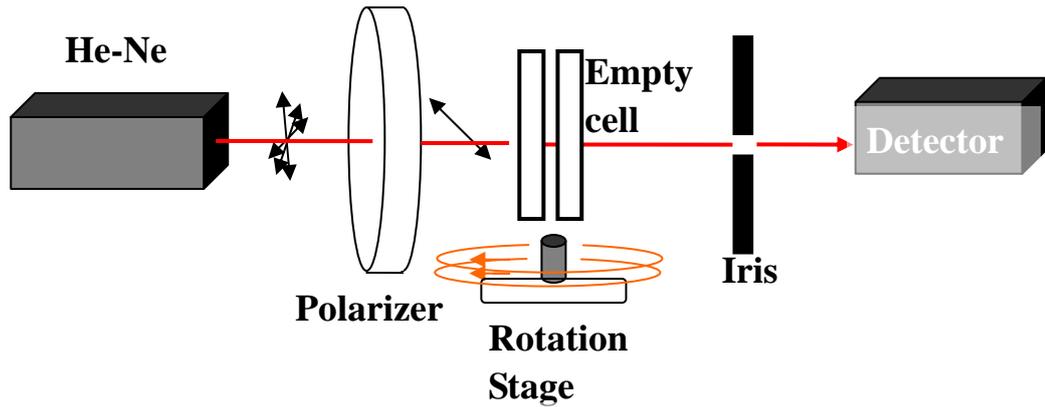


Fig. 2-5 量測樣品厚度的實驗架設圖。

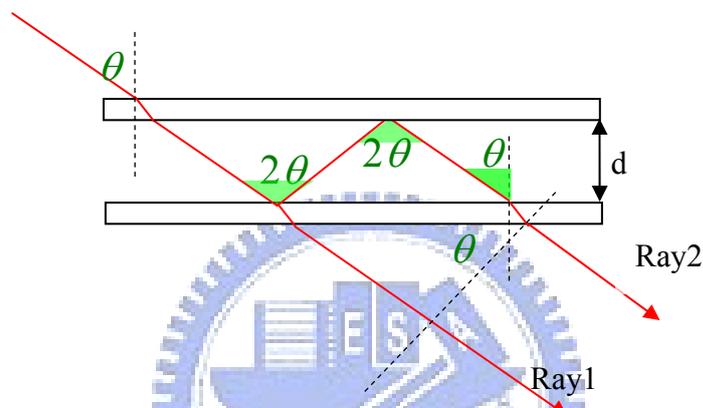


Fig. 2-6 Empty cell 中實際光路情形。

對照此圖可以知道兩道光 Ray2 和 Ray1 的光程差 δ 為：

$$\begin{aligned}
 \delta &= \frac{2d}{\cos\theta} - \frac{2d}{\cos\theta} \sin^2\theta \\
 &= 2d \left(\frac{1}{\cos\theta} - \frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} \right) \quad (2-2-10) \\
 &= 2d \cos\theta
 \end{aligned}$$

當這兩道光的光程差 δ 為波長的整數倍，為建設性干涉，所以當光強度最大值發生一個週期的此兩點必經過了一個波長的光程差。所以現在只要抓某兩點最大值就可知道差距幾個波長光程差的各數，在找此各點對應的角度，即可回推出 cell gap d 。

$$\delta_m = 2d \cos \theta_1 = m\lambda$$

$$\delta_{m+n} = 2d \cos \theta_2 = (m+n)\lambda$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \delta_{m+n} - \delta_m &= 2d \cos \theta_2 - 2d \cos \theta_1 \\ &= (m+n)\lambda - m\lambda \end{aligned}$$

$$\therefore d = \frac{n\lambda}{2(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)}$$

(2-2-11)



第三章 元件製作原理、流程及實驗方法介紹

3-1 元件製作

3-1-1 元件製作

主要分為以下兩種，其製程過程略有差異

a. 使用於 2406, 1203, 802, 602, 481, 401nm 脈衝光六個 channel 可以同時調變相位的元件：

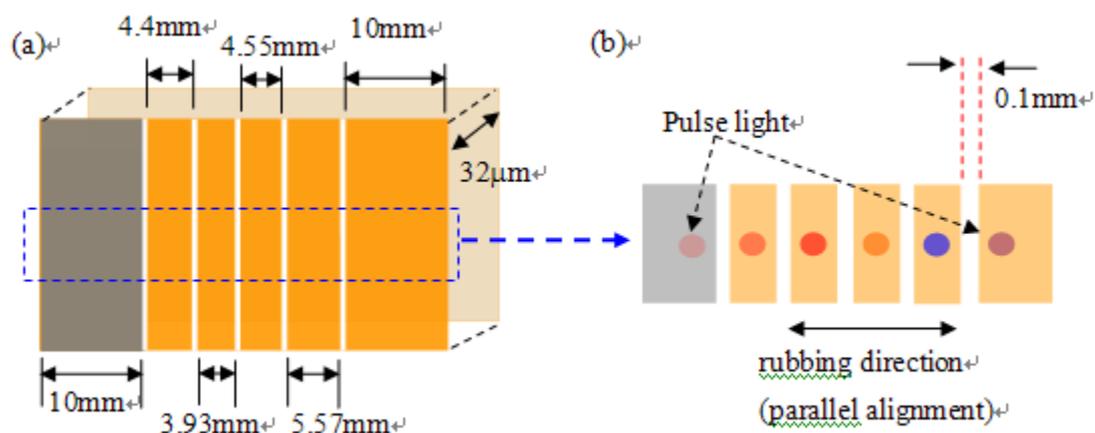


Fig. 3-1 此為最終元件結構，最左邊黑色區域是給 2406nm 脈衝波段使用的 TiW 導電膜，而剩下的五個 channels 由左至右分別給 1203, 802, 602, 481 和 401 脈衝波段使用。此結構由外向內是由 (1.) 勝華公司提供的玻璃基板 (2.) 導電薄膜 ITO (100nm) (3.) 配向膜 PI (4.) 默克 (Merck) 提供 E7 液晶。每個 channel 間隔各為 0.1mm，樣品液晶層厚度 = 32µm。裡面提到的 rubbing direction 可由需求不同改成我想要的方向。

其製作流程如下：

A. 蝕刻 ITO 玻璃

1. 本實驗使用 ITO 玻璃。切割大小為：上板 (需做 pattern) $39.09 \times 30 \text{mm}^2$ ，下板 $44.09 \times 30 \text{mm}^2$ 。此大小是為了配合實驗產生的 2406~401 六道光的某種特別距離的使用需求。
2. 將上下板 30mm 的邊緣預留一個區塊 $10 \times 30 \text{mm}^2$ ，除此區塊外

的區域都用博士膜貼上，並將空氣壓出。

3. 將草酸溶液和去離子水 (DI Water) 比例為每 1g 草酸對應 100ml 的 DI Water。調配好所需要的草酸溶液後將之加溫到 $60^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ 等待恆溫。
4. 將處理後的上下板放入 $60^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ 恆溫的草酸溶液中 50min 以上，即可將 ITO 蝕刻完成。

B. 清洗玻璃

1. 將上下 ITO 玻璃基板站立放置於燒杯內，加入中性清潔劑並加入一般水，為了怕玻璃清洗不完全，必須將水量蓋過玻璃。將燒杯放入超音波震盪器以超音波震盪 5 min ~ 15 min。
2. 用水將玻璃沖洗乾淨，加入丙酮 (Acetone) 到另一個丙酮專用的燒杯裡，將玻璃垂直放入，同樣以超音波震盪 5 min ~ 15 min。
3. 用甲醇沖洗一下玻璃，加入甲醇 (Methanol) 到專用的燒杯，將玻璃垂直放入，超音波震盪 5 min ~ 15 min。
4. 以 DI Water 將玻璃沖洗乾淨，將玻璃放入裝滿 DI water 專用的去離子水杯裡超音波震盪 5 min ~ 15 min。
5. 用鑷子夾出玻璃再以 DI Water 將表面殘留的物體沖洗乾淨。以氮氣將表面水滴吹乾。最後再放入已經預熱好的 100°C 烤箱內，烤約略 30 min，將玻璃表面的水氣烤至消失。

C. 金屬濺鍍 (Metal sputter) TiW 薄膜

1. 將清理好的上下板除了吃去 ITO 的部分露出外，其餘的部分都用導電膠帶覆蓋，處理好後將它放入準備好的金屬濺鍍腔體中。
2. 我們使用台大光電所彭龍漢教授實驗室的金屬濺鍍 (Metal sputter) 儀器，最後適當鍍膜的功率 50W，電壓約 384V 而電流約 0.130A，在此條件下鍍膜 75sec (以上為嘗試後所得到最最佳結果的使用參數)。以上的鍍膜最終在四點探針 (four point probe) 的測試，面電阻 (sheet resistance) 為

$5\text{ k}\Omega/\text{sq}\sim 20\text{ k}\Omega/\text{sq}$ 。

D. 黃光製程間隔 channel 電極

1. 將 C. 步驟完成的玻璃再次經過 B. 步驟清洗(此動作會造成面電阻的上升)，是為了黃光製程中光阻的表面附著較好。實驗經驗知當面電阻過大 ($\sim 500\text{ k}\Omega/\text{sq}$) 時可以省略此步驟。
2. 上 s1813 此光阻於上板玻璃板上經過 spin coating step1: 10sec. 1000r. p. m. , step2: 40sec. 4000r. p. m. 。即完成了光阻的鍍膜。
3. 將處理好的上板玻璃放到已經預熱 110°C 的烤盤上 60sec。
4. 放置於曝光機台 (ABM Aligner) 載台上，由我所要的光罩上 2406nm 脈衝光所使用的 channel 對齊上板玻璃基板的 TiW 鍍膜邊緣，做好設定的動作後進行汞燈曝光。曝光 23.5sec 後即可。
5. 放入顯影液約 60sec，這段時間內需要觀察玻璃上鍍膜的 pattern 色澤會隨時間變色。當變色消失的時候即是 pattern 已經被顯影完成了。接著以 DI Water 浸泡清理上面的顯影液，以氮氣槍吹乾水滴。
6. 放置於 ABM Aligner 機台上以顯微鏡 double check 所呈現出的 pattern 是否如我們所要。
7. 最終以預熱好 110°C 的烤盤硬烤 120sec 即算完成所有程序。
8. 將處理好鍍上光阻的玻璃重複 A. 蝕刻玻璃的步驟，即可吃出我們想要的圖案後。接著以丙酮清洗玻璃就可以將覆蓋在上面的光阻 (s1813) 洗掉。

E. 配向基板的製作

1. 本實驗可使用配向膜為 Nissan 130B
2. 將他從冰箱中拿出放置室溫一小時，直到其溫度回到室溫。
3. 將上下板一片片取出放置於 spin coating 機台上，ITO 面朝上準備在表面鍍膜。開啟真空馬達，當鍍膜玻璃基板面積夠小時 ($\sim 20\times 20\text{mm}^2$ 以下)，我們可以只在玻璃中央滴上兩三滴

配向膜即可均勻鍍滿整塊 ITO 玻璃基板。但現在使用是 $39.09 \times 30 \text{mm}^2$ 和 $44.09 \times 30 \text{mm}^2$ 的大小。以經驗來說，要將整塊基板均勻鍍好須將配向劑滴滿整塊玻璃，以 Step1: 1sec, 2000r.p.m., Step2: 15sec, 2000r.p.m., Step3: 1sec, 4000r.p.m., Step4: 25sec, 4000r.p.m. 適用以上順序設定 spin coater 操作即可。

4. 將 spin coating 完成的玻璃放於已經預熱好 60°C 的烤盤上，軟烤五分鐘。
5. 將鍍好配向膜的 ITO 玻璃軟烤完成後，放入已經預熱好 170°C 的烤箱內，硬烤一小時後即可拿出室溫直到恆溫後，才可進行下一步驟。

F. 絨毛磨刷配向過程

1. 將電源插頭接上 110V，啟動馬達。
2. 啟動磨刷配向機台(按下 power 指示燈約兩秒)，按下主軸旋轉並將轉速調至 900r.p.m.，將前進載台速度調至 130 左右。將 mode 調至自動，按下自動啟動。
3. 先以一片鍍好 PI 的測試玻璃片進行一次磨刷，觀察上面是否有刮痕，若有的話會造成配向效果不佳。與此同時需要注意絨毛和玻璃接觸時轉速的下降程度。經驗來說可以控制下降幅度 15~20r.p.m.，這樣參數下的溝槽深度算是蠻適當的。
4. 完成步驟 3. 後，由需求改變載台上玻璃和磨刷方向的相對位置，對於上下板的磨刷方向進行磨刷，讓最後水平偏振入射光和液晶方向的夾角 ($PM:0^\circ, AM:45^\circ$)。

G. 組合成型

1. 為了滿足 2406nm 脈衝光的 channel 最後造成的相位調變至少有 4π 以上，配合所使用的液晶 PCH5 的 He-Ne 測試電壓對相位結果，我們將液晶層厚度控制再 $31\mu\text{m}$ 。因夾完後的厚度不會和所使用 spacer 厚度完全一樣(會變大)，所以使用 $23\mu\text{m}$ 的絕緣墊片作為 spacer，割成長條型夾在兩片玻璃的邊緣。

2. 以數個長尾夾夾在樣品邊緣施力，作為控制樣品均勻度方法。過程中需要注意牛頓環的改變，為了讓光點圓圈內通過此樣品改變的相位都相同，必須在讓最後使用光點的範圍內都是均勻的厚度。所以需要花相當多的時間將牛頓環調至所能夠達到廣而稀疏的程度。

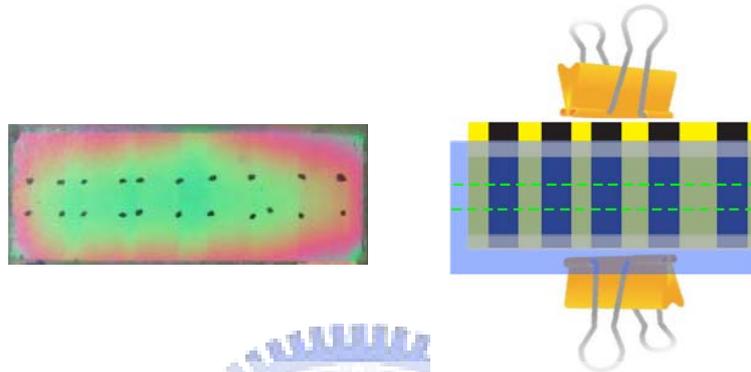


Fig. 3-2 牛頓環對應樣品均勻度。

3. 以 AB 膠塗在長尾夾夾住處，等待一天。
4. 固化後量測各 channel 的實際厚度，這會影響最後所能調變的相位。
5. 灌入液晶並封盒，再等待一天
6. 將上板各個 channel 預留出的部位用銀膠黏上電線，等待三天至一個禮拜讓銀膠完全乾，要注意各 channel 是否有導通，這可以由電阻的大小去判斷，因為液晶層的電阻約 $50 M\Omega/sq \sim 20 M\Omega/sq$ 所以當不導通下兩 channel 間，電阻必須至少比此高。
7. 最後相同方法再接地下板端黏上電極，一樣過了三天到一個禮拜，最後在連接電極表面塗滿 AB 膠，作為銀膠的保護就算完成。

b. 紫外光 (355, 344, 301nm) 所使用獨立一個 channel 的元件:

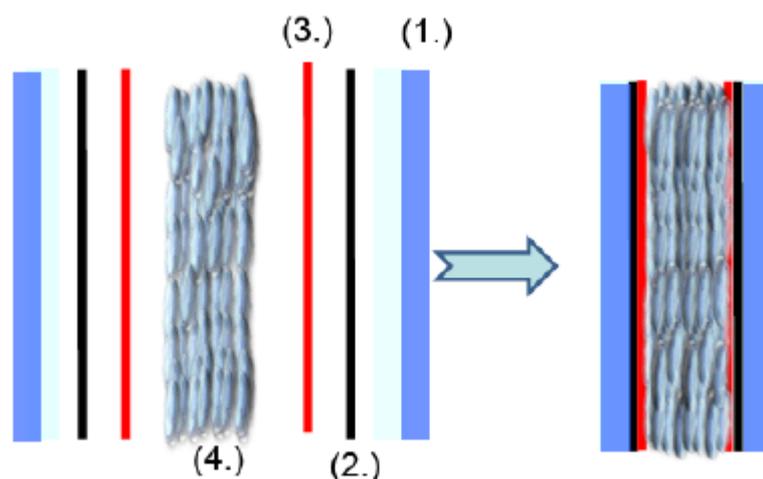


Fig. 3-3 此一個 pixel 的結構和 Fig. 3-1 差異性在於基板(1.)、在導電薄膜(2.)和配向膜(3.)。而和液晶方面(4.)對於紫外光使用必需使用 PCH5 或 MLC-6608 這種兩種紫外光高穿透的液晶取代 Fig. 3-1 中的 E7。基板方面以 fused silica 取代勝華公司提供的玻璃基板。配向膜使用 Fe_2O_3 或者 MAP, DMOAP 取代 PI 的使用。導電薄膜使用 nanorod ITO (30nm) 取代原本的 ITO 材料。以上替換材料的原由主要是為了提升元件在紫外光下穿透率。

製作流程:

A. 鍍導電薄膜 Nanorod ITO

1. 為了可以在紫外光下達到元件的高穿透，我們使用 fused silica 做為基板，先將基板經過 a. B 清洗玻璃的步驟。
2. 鍍膜是由交大光電所余佩慈老師實驗室提供給我們由斜向鍍膜而成的 Nanorod ITO。由製程參數的不同，造成穿透率會有極高的差異性。但由嘗試經驗得知，穿透率的高低最主要還是取決於奈米結構層的厚度為主。
3. 最終我們將厚度控制在 30~20nm，鍍率為 0.15nm/s。其中還有一些機台的製程參數在此就不列出來了。可以得到 301nm 波長的穿透率可達到 82%，而 350nm 附近可以達到 86%以上。面電阻約 $15 k\Omega/sq$ 。

B. 配向基板的製作

1. 因為考慮的高穿透的差異性，我們配合平行樣品或者垂直樣品各使用 MAP 或者 DMOAP 這兩種配向膜。
2. 當考慮平行樣品下使用 MAP，調配水溶液。和去離子水的比例是 0.1%。調配好後將鍍好 Nanorod ITO 的基板直立固定放入此水溶液中超音波振盪 5min，放入已經預熱好 $110^{\circ}C$ 的烤箱內一小時即可。

C. 絨毛磨刷配向

1. 配合基板和基板上導電膜的厚度，將磨刷機台深度 scale 固定在 10, 11 同 a. F 部份操作程序即可。

D. 組合成型

1. 因為是為了紫外光使用的樣品，所以想要用一個適當的週期時，必須使用較薄的厚度，重複 a. G 的過程即可。

3-1-2 各類配向膜配向原理、製作流程

以下說明各種配向膜原理和比較，內容包含：

聚醯亞胺 (Polyimide (PI))、氧化鐵 (Fe_2O_3)、N-methyl-3-aminopropyltrimethoxysilane (MAP)、N,N-dimethyl-N-octadecyl-3-aminopropyltrimethoxysilylchloride (DMOAP)

聚醯亞胺 Polyimide (PI)：

這種配向膜的製程原理是利用毛刷配向，製造在基板表面的溝槽，讓液晶分子受到溝槽產生力而向磨刷方向排列。

1. 開啟抽氣馬達，將經過洗淨的玻璃基板放置於 spin coater 轉台上，將轉台四周的鋪滿錫箔紙，防止受到 PI 的汙染。
2. 當需要鍍 PI 膜的基板太大時需要以膠帶作輔助黏貼於基板下面和載台。
3. 設定鍍膜參數，Step1: 1sec, 2000r. p. m. , Step2: 15sec, 2000r. p. m. , Step3: 1sec, 4000r. p. m. , Step4: 25sec, 4000r. p. m. 。

4. 用預熱好的加熱烤盤加熱到 60°C 的烤盤上，軟烤五分鐘。
5. 將鍍好配向膜的基板軟烤完成後，放入已經預熱好 170°C 的烤箱內，硬烤一小時後即可拿出室溫直到恆溫後即可。

氧化鐵(Fe_2O_3):

利用外加電場使氣體內的電子被加速碰撞不帶電氫氣分子，被碰撞後的氫氣產生一堆正離子和電子後，電子又被加速因此產生連鎖的效應。最後生成一堆包含中性氣體分子、正電荷離子、電子和受激發的中性分子的電漿。

將氧化鐵靶材放置於負極並將玻璃基板放置於下電極處，接收由腔體內正電子撞擊負極靶材後掉落陰極的靶材原子，沉積於玻璃基板上。本實驗使用日本 Eiko 公司的離子鍍膜機台 (Ion Coater Model IB-2)，經由調整一些參數例如：直流電壓、電流和鍍膜時間。並調整之後的 rubbing 強度，找出最適合配向的氧化鐵薄膜製程參數。

N-methyl-3-aminopropyltrimethoxysilane(MAP) 、
N,N-dimethyl-N-octadecyl-3-aminopropyltrimethoxy
silylchloride (DMOAP):

MAP 和 DMOAP 都是一種類似於矽烷 (silane) 結構，也就是中間一個矽原子，四周圍繞著四個氫原子 (H)。而以 Alkoxysilane 和 silane 的差異就是外圍鍵結的地方是由有機化合物的烷基鏈取代氫原子。但是他的架構是相同 Alkoxysilane 的分子式是 RSiX_3 。如圖所示，疏水性(Hydrophobic) 端 R: Organofunctional group，親水性端 (Hydrophilic) X: Alkoxy group。親水端後來會造成水解反應的進行。X 為氧烷基的鍵結，所以水解後會放出醇類的產物。

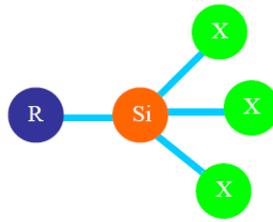


Fig. 3-4 Alkoxysilane 的分子式示意圖

Silane 的結合過程：

這是 MAP 剛配成水溶液時，所產生的過程。前半段 $RSi(OCH_3)_3$ 轉變成 $RSi(OH)_3$ 過程中和水作用並且放出甲醇，這稱之為水解過程。而第二步驟由多個水解後的 $RSi(OH)_3$ 自聚作用 (condensation) 過程中放出水分子，變成互相鍵結的形式。這造成了更大的聚合物。

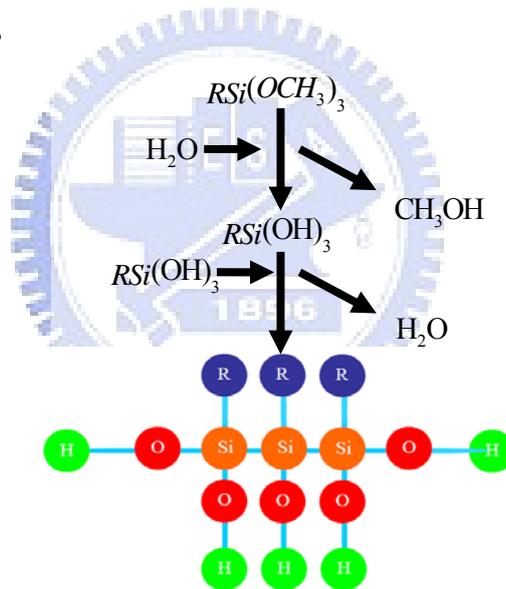


Fig. 3-5 Silane 分子的水解和自聚過程

Silane 聚合物鍵結於基板的過程：

因為基板上面已經吸附了氫氧鍵，而自聚作用生成的分子，他的氫氧原子會因他原子結構正負電的原因和基板上的氫氧鍵行成鍵結。最後又在過程中放出水分子。

最後展現出疏水端 R，他烷基鏈的特性，去影響液晶分子的排列。

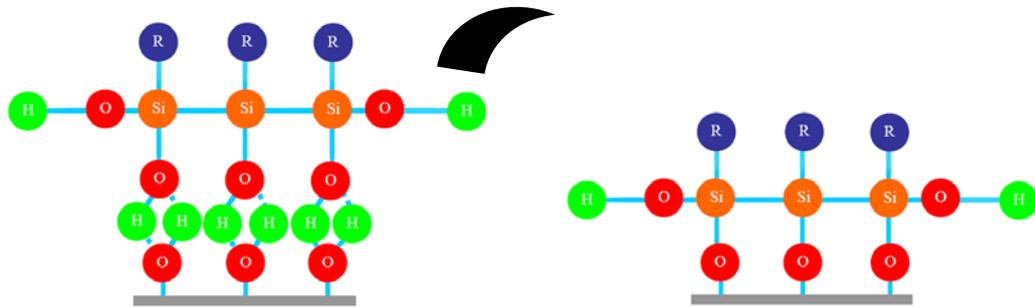


Fig. 3-6 Silane 鍵結於基板的過程

由 DMAOP 和 MAP 為例，DMAOP 的烷基鏈 R 中長鏈狀的 $C_{18}H_{37}$ 。這鍵結會使得液晶分子順著長鏈方向排列，故可以產生垂直配向 (Vertical Alignment) 的效果。而 MAP 的烷基鏈 R 只有 $(CH_2)_3$ 這造成液晶分子喜歡順向平行基板排列。這兩種 Alkoxysilane 都可利用絨毛磨刷 (Rubbing)，DMAOP 搭配負型液晶 (negative dielectric LC)、MAP 搭配正型液晶 (positive dielectric LC) 達到加電壓順著磨刷方向排列的效果。

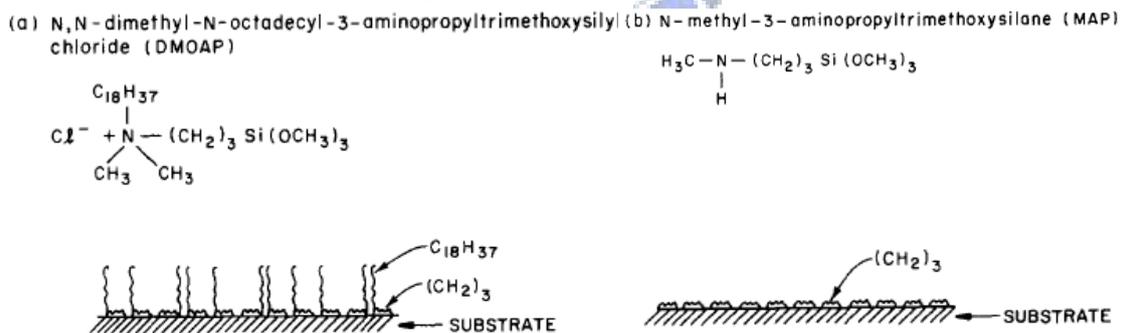


Fig. 3-7 DMAOP 和 MAP 分子鍵結在基板上的情形。

3-1-3 金屬濺鍍機 (Metal Sputter)原理與實驗

金屬濺鍍機 (Metal Sputter)原理：

我們實驗使用的是台大光電所彭隆瀚實驗室的儀器。實驗室系統分為大 sputter 和小 sputter。大 sputter 用於濺鍍氧化物，小

sputter 則是我們要使用的濺鍍金屬物質 TiW。

濺鍍基本原理是將真空濺鍍腔裡通入氬氣，藉由外加的高壓電場使氬氣電漿能夠被點燃，電漿中的氬離子帶正電因此會被加速轟擊陰極，此離子和已經放置在陰極的靶材固體表面產生原子的動量交換，最後從靶材表面濺出原子。此時靶材表面原子將會飛向基板所在的陽極位置鍍膜在基板表面。



Fig. 3-8 金屬濺鍍機

金屬濺鍍機 (Metal Sputter) 台操作流程：

1. 檢查空壓機、冰水機、chamber C 的壓力 (for metal sputter)、靶材種類的位置。
2. 開啟機械幫浦 (MP (Mechanical Pump))、開啟 foreline，當 foreline 真空度達到 5×10^{-2} torr 以下才可以開啟真空幫浦 (TP (Turbo Pump)) 升速，達到 34000rpm 附近才可進行下一步驟。
3. 注意和 chamber 連結的 TP 和 foreline 的 valve 必須關閉，開啟氬氣灌入 chamber 中 vent 氣，直到 chamber 氣壓值達到一大氣壓力。
4. 將靶材換成我所使用的 TiW 靶材。chamber 內的載台拿出，將

基板以導電膠帶固定在載台上，防止鍍膜過程中基板的掉落，放回 chamber 中。以 MP 粗抽至 5×10^{-2} torr，接者以 TP 細抽至 3×10^{-2} torr 等級。抽真空的過程約需 1~2 小時。

5. 注意 DC Power 的管線是否接到 DC2 位置，以對應的靶材位置上（以此間實驗室為準）。
6. 當第 4. 步驟完成後，通入氬氣（Ar），在我的實驗中都設定在流量數值 175。
7. 確認靶材上方的 shutter off，將 power 逐漸升高到 pre-sputter 需要的值（約是最後使用 power 的一半），進行 pre-sputter 約 5~10 分鐘，將靶材表面的氧化物去除。
8. 將 power 升到實際使用的大小，操作儀板上 rotation on 打開，再打開 shutter 進行鍍膜。
9. 鍍完所需要的厚度後，將 shutter 關閉，慢慢將 power 降至零。
10. 關閉氬氣（Ar），關閉 chamber 和 TP 連結的 valve 後，關閉 TP 減速，直到 10000rpm 以下，再進行下步驟。
11. valve 關閉，開啟氮氣 vent 氣後，將氮氣關閉。拿出載台取下樣品。
12. 以機械幫浦（MP）粗抽至 5×10^{-2} torr。
13. 以甲醇清洗載台，並烤乾。這個動作必須做確實以免造成氣壓計因為揮發性氣體而失靈。

3-1-4 黃光製程原理與實驗

黃光製程原理：

本實驗中主要將光阻做為之後吃出電極形狀時，阻隔草酸的表面層。先將光阻經過製程均勻鍍在 ITO 電極表面。在經過汞燈透過光罩照射在光阻表面後，經過顯影硬烤後即可作為之後隔絕草酸的阻隔層。

黃光製程操作流程：

A. 預烤

1. 將清理好的 ITO 玻璃（勝華提供）放置在 spin coating 機台上，打開 power 和 pump 開關。於 ITO 玻璃表面滴滿光阻 S1813，以 1000rpm---10sec，4000rpm---40sec 的轉速和時間鍍膜。
2. 將樣品放置於已經預熱好 120°C 的加熱台上一分鐘，即完成軟烤。

B. 光罩對準操作程序

1. 進行 ABM Aligner 系統的開機手續，開啟總開關” power” ，讓空壓機和真空幫浦開始運作，經過十分鐘後觀察系統真空度和空壓壓力是否正常。
2. 按下” start” 不放經過三四秒汞燈就被點亮。
3. 將樣品放置 chuck 上，打開 Sub VAC. 將樣品固定在 chuck 上。放上光罩打開 Mask VAC. 固定住光罩。
4. 調整垂直方向 z 軸光罩與樣品的距離，直到樣品接觸到光罩後將 chuck 高度下降。進行光罩對準。
5. 適度調整載台的旋轉角並 xy 軸對準後，開啟” Contact VAC.” 到” On” 將內部抽氣，讓光罩和樣品緊貼。
6. 設定曝光時間，這裡由經驗使用 22sec 曝光時間，將 Lamb housing 選取自動，按開始即會進行曝光。
7. 完成後將 Lamb housing 移回原處，” Contact VAC.” 轉至” Off” 減小光罩和樣品的接觸。將 chuck 下降一些。最後” Mask VAC” 拉起，” Sub VAC.” 轉至” Off” 取下光罩和樣品即可。

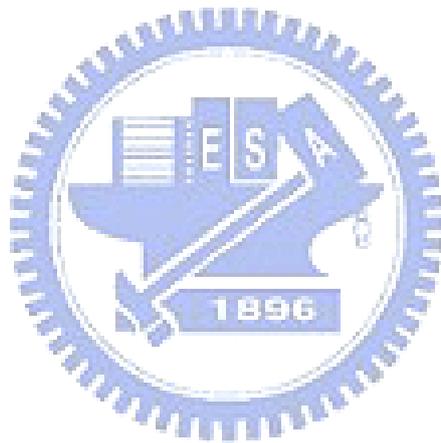
C. 曝光

1. 將處理好的玻璃丟入顯影液（MF193）約一分鐘，觀察經過顯影後被蝕刻掉的光阻上顏色是否不再變化，這代表蝕刻已經完成。

2. 由去離子水清洗後氮氣吹乾即可。

D. 蝕刻

1. 如同一開始講解如何蝕刻 ITO 膜的方法一樣，將樣品丟入配好的草酸溶液中 $60 \sim 65^{\circ}\text{C}$ 一小時。
2. 丟入丙酮中，溶解光阻後。再由去離子水清洗後氮氣吹乾。
3. 最終完成了我所要的 ITO 形狀。



3-2 IR 至 UV 光源下電壓調變光相位實驗

由 Fig. 3-8, Nd:YAG laser 產生 1064nm 光源，1064nm 經由 PPLC cell 產生 2406nm 為 λ_i 和 1.9 μm 為 λ_s ，最後由 prism 分光出 2.4 μm 。由前面論述的理論部份我們知道在 LC-SLM 前後的光源偏振方向需夾 90° 或者 0°，且入射偏振方向需和 LC-SLM 的 rubbing direction 夾 45°。最後 set up 好以後，透過可 2.4 μm 高穿透的 LC-SLM 做調變光相位的量測。以下公式是 2406nm 光源的產生過程。

$$\frac{1}{1064\text{nm}} = \frac{1}{2406\text{nm}} + \frac{1}{1907\text{nm}} \quad (3-2-1)$$

For 2406nm,

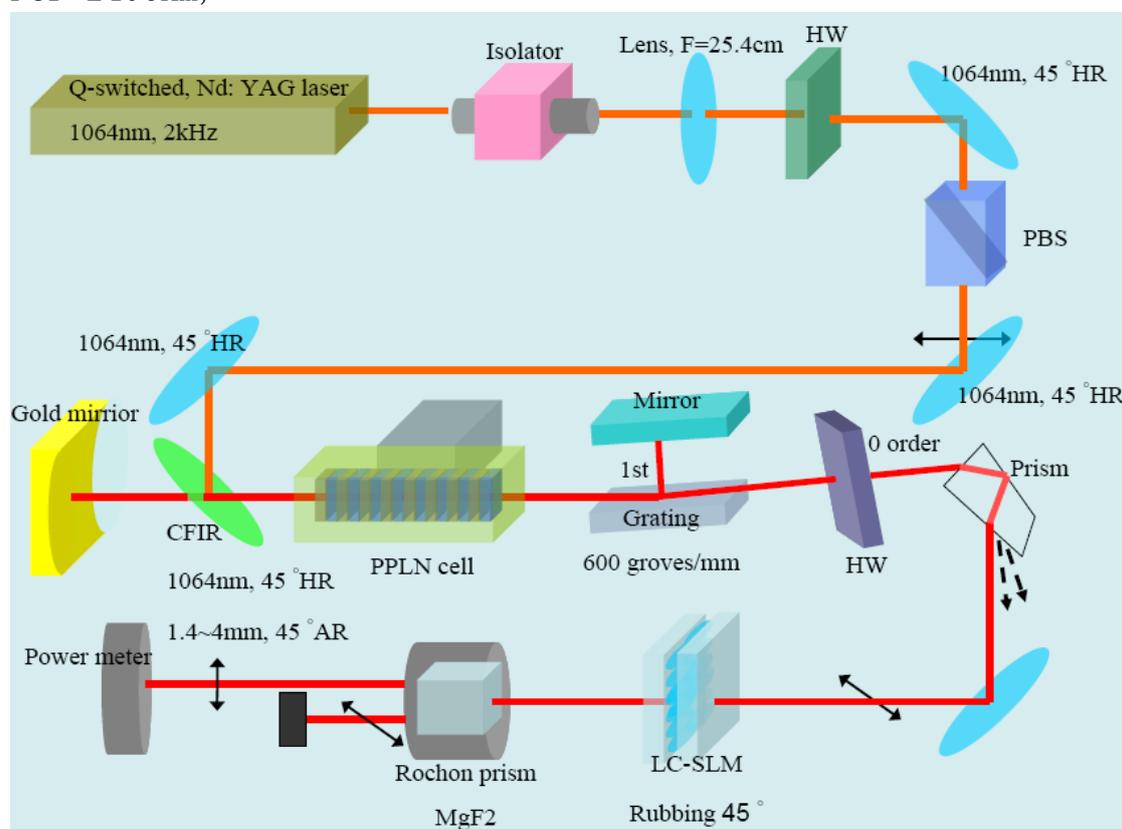


Fig. 3-9 LC-SLM 調變 2.4 μm 波段脈衝光的實驗設置圖。

For 632nm,

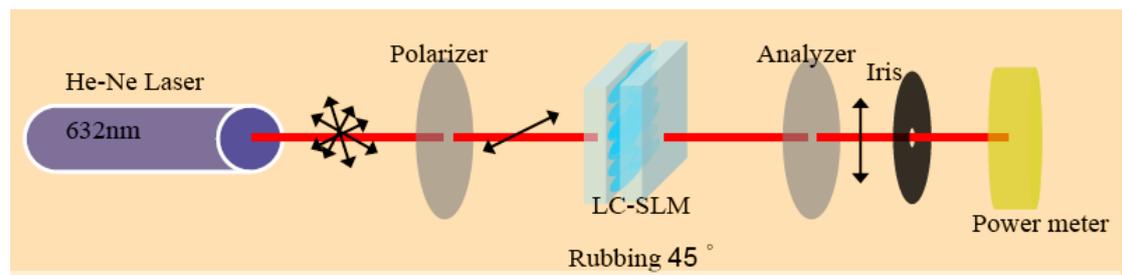


Fig. 3-10 LC-SLM 調變 632nm, He-Ne laser 實驗設置圖。

由 Fig. 3-9, 以 632nm He-Ne laser 光源作 LC-SLM 量測，在設置圖中因為 632nm 光源較容易得到偏振片去使用，不同於 2.4 μ m 或 355nm 需要搭配 Rochon prism 將光源分成 cross 的兩道偏振光使用。

For 355nm,

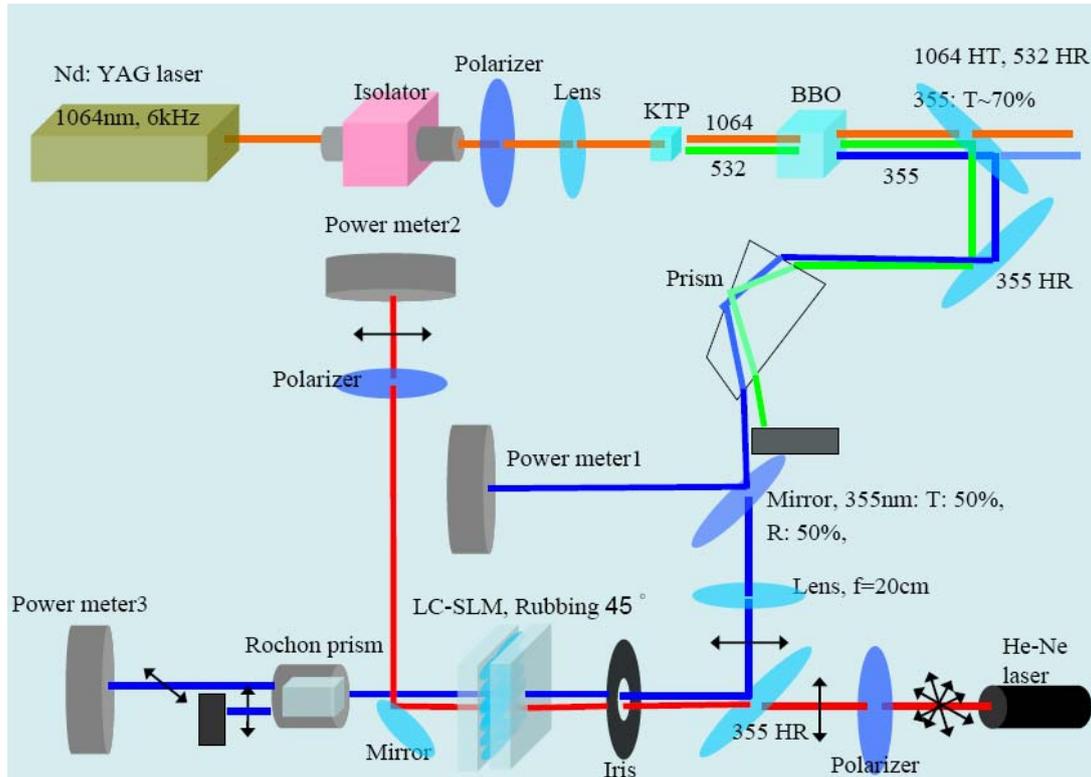


Fig. 3-11 LC-SLM 調變 355nm 波段脈衝光的實驗設置圖。

由 Fig. 3-10, Nd:YAG laser 產生 1064nm 光源，由 polarizer 調整入射光強度，由 KTP 晶體產生 532nm 的光源。BBO 晶體讓 1064nm 和 532nm 光源作和頻產生 355nm 光源。最後由 prism 分光出 355nm，透過 Mirror (355nm (T:50%, R:50%)) 分光出來 Power meter1 偵測 355nm 光源的穩定性。右下角使用 He-Ne laser 在同一時間內和 355nm 光源入射於元件上不遠的距離，並且各自以不同 power meter 2, 3 偵測光的 total power。這是為了觀察溫度因素改變液晶性質，是否於同一時間對兩種雷射造成影響。

為何要觀察溫度和 355nm 光源穩定性的問題，是因為紫外光會改變元件原有性質。在觀察電壓對穿透率 (VT curve) 變化時，需要排除溫度和穩定性的問題，才是真正想要觀察到的元件變化。

以下式子(3-2-2)在說明 1064nm 入射光由 KTP 晶體倍頻後產生 532nm，式子(3-2-3)在說明由倍頻產生的 532nm 和 pump 光 1064nm 由 BBO 晶體作和頻後產生 355nm。

$$\frac{1}{1064nm} + \frac{1}{1064nm} = \frac{1}{532nm} \quad (3-2-2)$$

$$\frac{1}{532nm} + \frac{1}{1064nm} = \frac{1}{355nm} \quad (3-2-3)$$

3-3 元件於紫外光波段脈衝雷射下生命期的量測

因元件於紫外光照射下的電壓對穿透率曲線圖會隨操作時間而有所改變。由 4-5 章節內容中實驗上的推論問題發生的原因在液晶本身。這是於元件本質上的問題，目前還無法解決此問題。而在使用上我們試圖知道元件的生命期和適用範圍。

一開始可以先由 Fig. 3-11 明顯看出在紫外光下，使用時間的增加造成曲線的改變，並難以回復。以每個對應的最低和最高點來看，照射前後元件的操作有橫向操作電壓的改變和縱向無法調變至零點的改變。但由實驗經驗來說縱向的改變量常常伴隨著橫向操作電壓大量的 shift。而橫向的微小改變量卻不見得造成縱向光穿透率無法降到零的改變。而在使用上縱向無法調變至零對元件功能的影響，應該要比圖形單純的橫移要大的多，因為這代表對光調變的相位情形難以預測，當然也沒辦法使用。所以以下討論主要都放在縱向圖形的變異。也就是造成元件經過紫外光照射後，電壓對穿透率圖形無法達到光相位準確調變，並且調變光強度強弱比例的能力（definition）的下降。

因為想要量化元件調變能力改變的程度，我們暫時以下公式（3-3-1）粗略去定義。以 Fig. 3-11 來看就是兩曲線最低點接近的值，作相減取絕對值。並把每個合理的最低點作以上動作後相加取平均。用這個代表縱向的改變量。接著為了定義出改變程度，以初始的各個最高值取平均後。以縱向改變量除以初始各點最高值的平均，將結果乘以 100%後得到 D（definition 改變量的百分率）。

我們定義 $D=10\%$ ，這個比例當成我們對於調變紫外光使用上的最低標準。超過這個標準，就當作無法繼續使用。

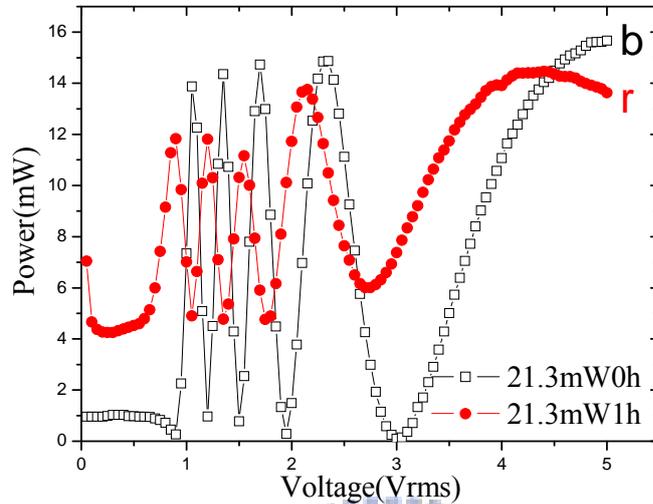


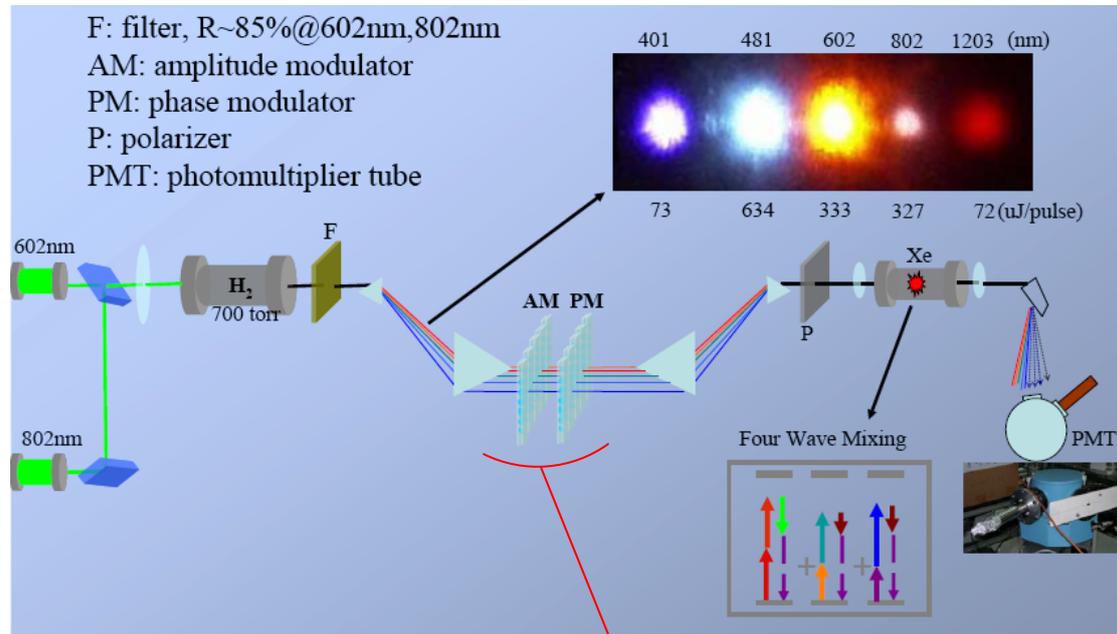
Fig.3-12 由 b, r 兩圖分別是使用 21.3mW 的 355nm 脈衝光在元件上 0 和 1 小時的紫外光源照射後的電壓穿透率結果。

$$D = 100\% \times \frac{\sum_{i=1}^n \text{abs}[\min(r_i) - \min(b_i)]}{n} / \text{average}[\sum_i^m \max(b_i)] \quad (3-3-1)$$

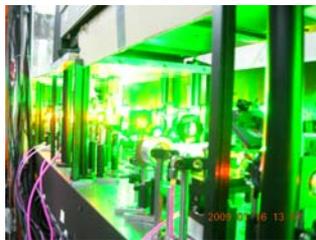
做完基本定義以後，先將雷射的 Intensity 調至接近實秒系統中的 344nm 的 beam size 大小作測試。接著在不改變 beam size 的情況下降低 Intensity，作 D 對時間的量測即可瞭解對於此元件在使用上的特性。

然而造成元件的 D 改變程度不一樣，並不僅只於光強度的平均 Intensity 而是和入射光源的 beam size 也有所關連性。為了瞭解其間的差異，我們改變 beam size 後固定其大小，一樣的調整 Intensity 的大小，觀察 beam size 改變後對元件 D 的程度和生命期的差異。

3-4 阿秒雷射系統 (attosecond technology) 的實驗方法和 LC-SLM 系統中的定位



Dye Laser system (602 nm)
 10.3 mJ/pulse ,
 bandwidth: 3~4ns



Ti:S Laser system (802 nm)
 4.67 mJ/pulse
 bandwidth: 2~3ns

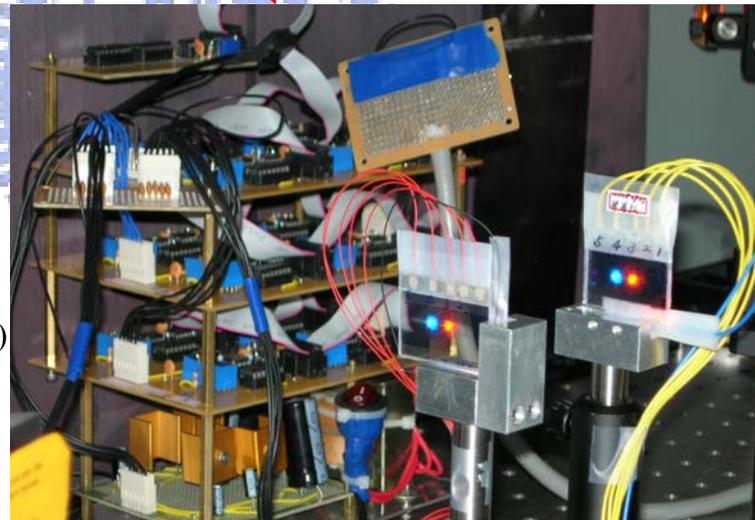


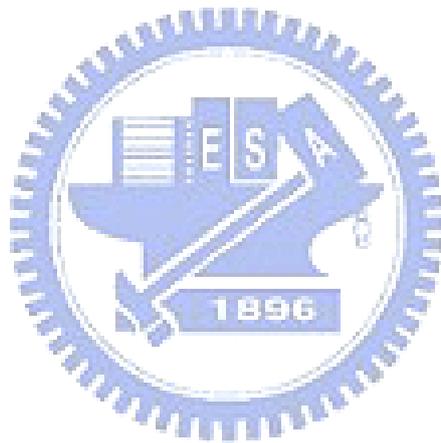
Fig. 3-13 最上面一張是阿秒雷射系統實驗設置圖，左下角的是 602nm, 802nm 光源的實際照片。右下角的是 AM, PM 的實際照片。

本實驗主要由 602nm dye laser 和 802nm Ti:S laser 作為開始的光源，打入氫氣產生出每隔相同頻率間隔的光源。在此我們使用 LC-SLM 調變 2406, 1203, 802, 602, 481 和 401nm 六道光。

將這些相同頻率間隔的光打入 Xe 中產生 four-wave mixing. 先以 AM 將所有 sideband 強度調至最大，再以 PM 將所有 sideband 相位

調至 in-phase. 便合成最短 pulse width 的脈衝。

接下來藉由 AM 和 PM 調整各個 sideband 的振幅與相位，量測 pulse 的 autocorrelation 結果與模擬是否符合，以證明各 sideband 的相位已調至 in-phase。



第四章 實驗結果分析與討論

4-1 元件中材料不同造成的穿透率差異

為了達到各波段高穿透下並可以操作調變光相位的目的，須排除元件中各部位的吸收材料，以高穿透材料取代。各部位分為 (1.) 基板 (2.) 導電薄膜 (3.) 配向膜 (4.) 液晶。實驗使用尚偉公司代理的 JASCO: V-670 光譜儀。

4-1-1 元件基板穿透率量測結果

勝華科技公司 (Wintek Corporation) 的 ITO 玻璃，將表面導電薄膜 ITO 已草酸去除後即可得到本身基板的穿透光譜。和 fused silica 相比可以看到在紫外光波段 fused silica 的高穿透的優異性。所以於紫外光下的需求，fused silica 是較好的基板選擇。

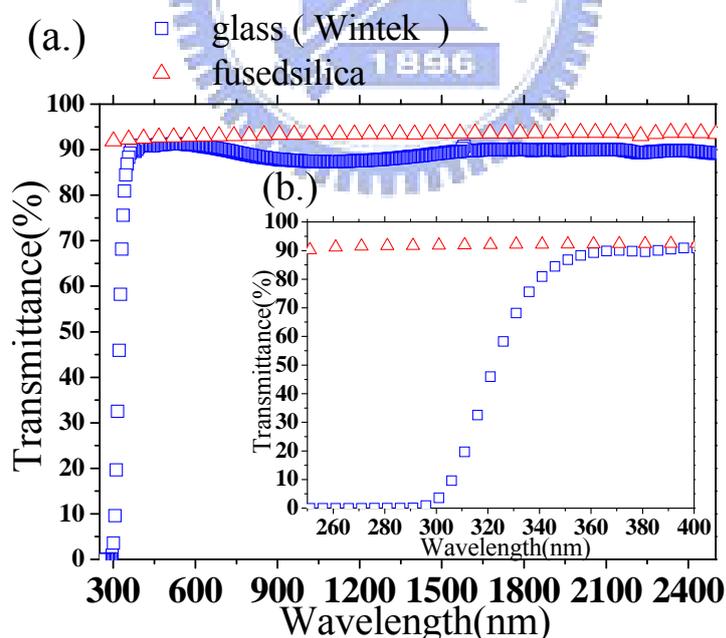


Fig. 4-1 (a.) 顯示從紫外光 (250nm) 至中紅外光 (2500nm) 的穿透光譜。
(b.) 紫外波段 (250~400nm) 穿透光譜。

4-1-2 元件配向膜穿透率量測結果

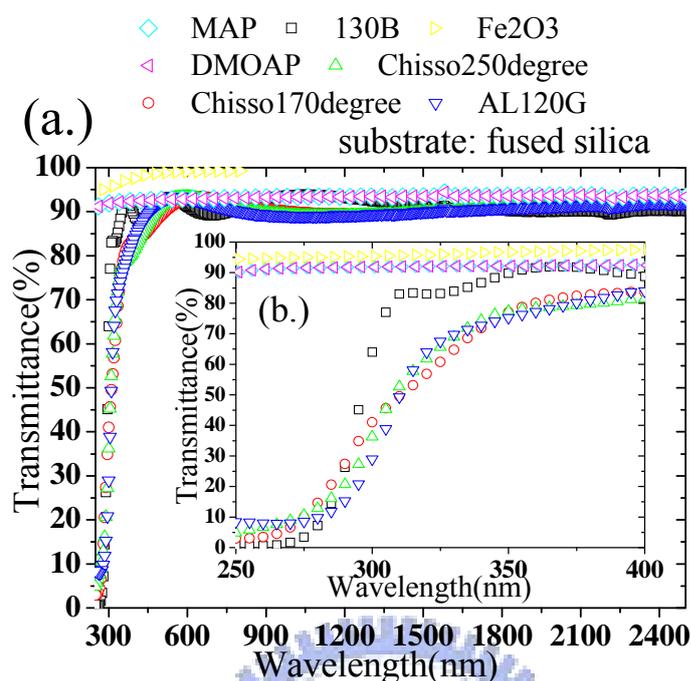


Fig. 4-2 本圖為各配像膜加上高穿透基板的穿透率。(a.) 顯示從紫外光 (250nm) 至中紅外光 (2500nm) 的透光譜。(b.) 紫外波段 (250~400nm) 透光譜。

配向膜扮演控制液晶相對基板排列的角色，存在於元件液晶層和導電薄膜之間。由 Fig. 4-2 可以知道各類配向膜間，在紅外光的差異性並不大。然而在紫外光，350nm 以下可以看出 MAP 和 DMOAP 這兩類 Alkoxysilane 和 Fe_2O_3 的優異性。不同於 130B (Nissan Chemical Co.)、Chisso 和 AL120G (大立高子分公司) 等配向膜因較稠。製成方法不配成水溶液，而以 spin coating 的方式鍍膜。這樣生成的薄膜勢必較 MAP、DMOAP (Fluka chemical Co.) 以配成水溶液，水解分子的方式或者較 ion-beam 鍍膜 Fe_2O_3 的鍍膜厚。因本身特性，除了 MAP、DMOAP 和 Fe_2O_3 外，其餘配向膜於紫外波段會吸收。且因為厚，更造成了對光的吸收。

DMOAP 和 MAP 因生成的薄膜本身夠薄加上特性，在紫外光為高穿透。所以對平行配相和垂直配相結構下使用，各由 MAP 和 DMOAP 做為配相膜是較好的選擇。

4-1-3 元件液晶穿透率和性質量測結果

想要直接測得液晶本身穿透率有一定難度，所以以中紅外至紫外波段都高穿透的 fused silica 作為機板將液晶層夾在中心，所以量到的穿透率飽含兩成 fused silica 的吸收與反射。

圖 Fig. 4-3 (a.) 可以知道 E7、PCH5 和 MLC-6608 (負型液晶) 在 [20, 21] 中紅外部份穿透率都可以達到八成以上，因此在此波段可以取較有利於自己的液晶特性去使用。

圖 Fig. 4-3 (b.) 則可以看出這三種液晶的適用範圍，不同於 MLC-6608 和 PCH5，E7 於 340nm 波段以下幾乎完全吸收了這以下波段光源。而 MLC-6608 和 PCH5 確可以在 300nm 以上光源，液晶加上 fused silica 的穿透率達到 80% 以上。所以對於紫外波段想達到高穿透使用需求，對應垂直樣品 (VA) 平行樣品 (AP) 的使用上，各由 MLC-6608 和 PCH5 作為使用液晶。

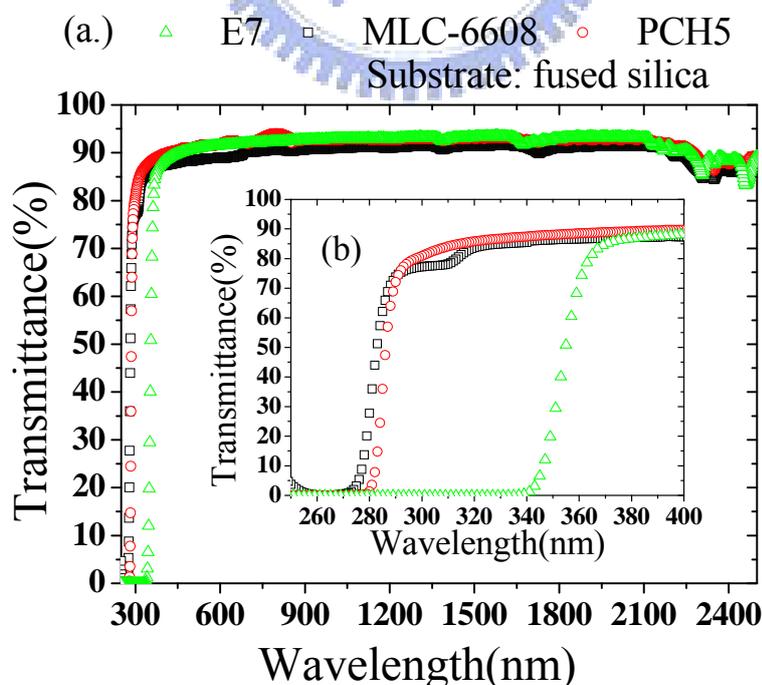


Fig. 4-3 不同種類液晶的穿透光譜 (a.) 顯示從紫外光 (250nm) 至中紅外光 (2500nm) 的穿透光譜。(b.) 紫外波段 (250~400nm) 穿透光譜。

以下列表所使用各液晶特性

E7:

我們所使用 Merck 的 E7 液晶，是由四種純液晶分子混和而成：
4-Cyano-4'-n-pentyl-1,1'-biphenyl(5CB), 4-Cyano-4'-n-heptyl-1,1'-biphenyl(7CB), 4-Cyano-4'-n-octyloxy-1,1'-biphenyl (80CB) and 4-Cyano-4''-npentyl-1,1',1''-terphenyl (5CT)等。分子結構 Fig. 4-4，而主要性質如下：

液晶態： $-10^{\circ}\text{C} \sim 61^{\circ}\text{C}$

折射率（常溫下）： $n_o = 1.5216, n_e = 1.7462$

$$\Delta n = 0.2246$$

介電常數（常溫下）： $\epsilon_{//} = 19.0, \epsilon_{\perp} = 5.2$

$$\Delta\epsilon = 13.8 > 0, \text{ 正型液晶}$$

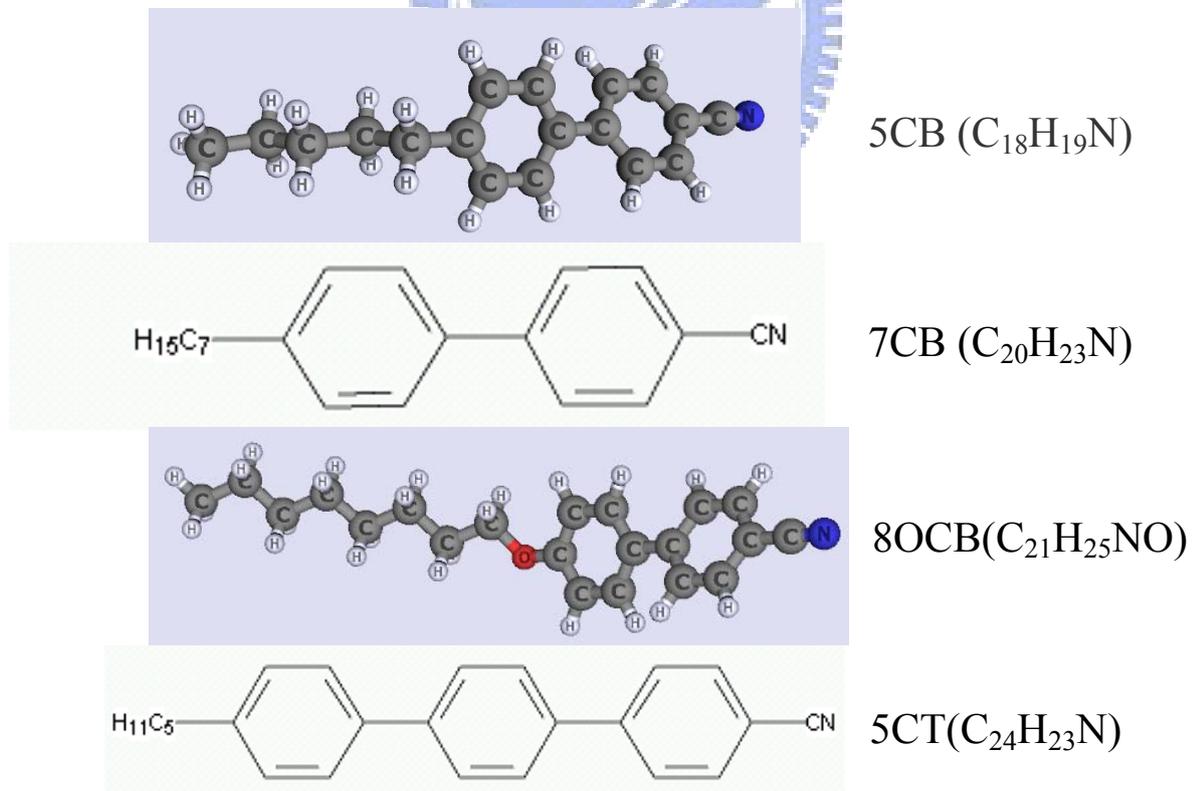


Fig. 4-4 混合成 E7 的四個純物質（ 5CB, 7CB, 80CB, 5CT ）分子結構。

PCH5:

此液晶來源 Aldrich Chemical Co.，全名是 4-(*trans*- 4-Pentylcyclo hexyl)benzonitrile。

結構 Fig. 4-5，而主要性質如下：

液晶態： $30^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$

折射率（常溫下）： $n_0 = 1.493, n_e = 1.605$

$$\Delta n = 0.122$$

介電常數（常溫下）： $\epsilon_{//} = 17.7, \epsilon_{\perp} = 4.8$

$$\Delta\epsilon = 12.9 > 0, \text{ 正型液晶}$$

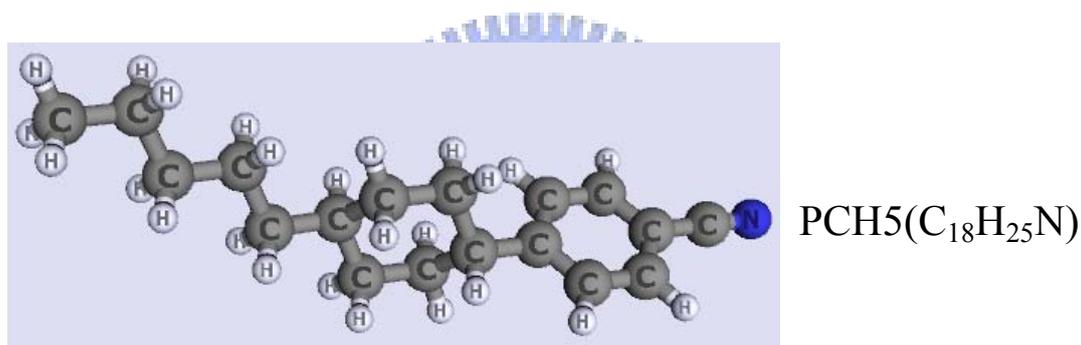


Fig. 4-5 PCH5 的分子結構。

MLC-6608:

此液晶來源 Merck，結構 Fig. 4-5。而主要性質如下：

液晶態： $-30^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$

折射率（常溫下）： $n_0 = 1.4748, n_e = 1.5578$

$$\Delta n = 0.083$$

介電常數（常溫下）： $\epsilon_{//} = 3.6, \epsilon_{\perp} = 7.8$

$$\Delta\epsilon = -4.2 < 0, \text{ 負型液晶}$$

4-1-4 TiW 導電薄膜製程參數對穿透率和電性的影響

本實驗使用醫光科技 (elight) 提供的 TiW (10% titanium, 90% tungsten) 靶材，開始由[1]的啟發，想將其應用於紫外光高穿透下光調變電極的使用。但之後的嘗試發現，在紫外光元件的穿透率仍不足使用。但鍍膜後的穿透光譜發現，TiW 材料當鍍膜厚度控制在 10nm 以下，有機會在紅外光波段滿足我們想要最後元件穿透率，因此進行嘗試。

在 DC sputter 功率 70W 下，改變鍍膜功率，和鍍膜時間對穿透率電性的影響。

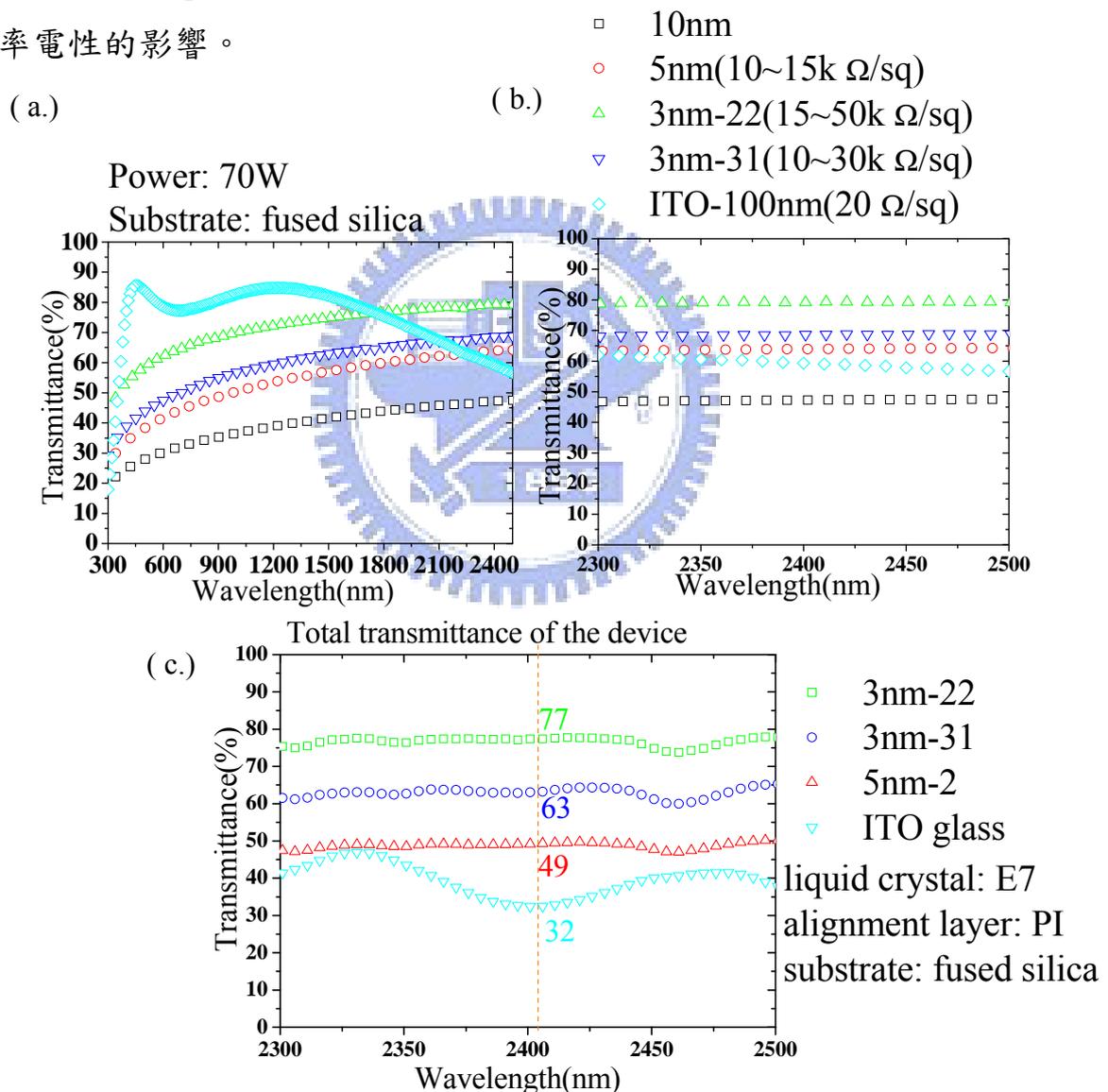


Fig.4-6 功率 70W，基板是熔融的石英玻璃 (fused silica) (a.) 波長 300~2500nm 穿透光譜。(b.) 放大(a.)中紅外光波段，觀察不同厚度下對應 2.4 μ m 穿透強度和片電阻。(c.) 元件於 2.4 μ m 波段其最高穿透率為 77%，使用 TiW 導電薄膜厚度 3nm。

因為液晶本身的電阻超過 $50M\Omega$ 。若希望電壓可以分壓驅動液晶層，將導電膜電阻控制在 $1M\Omega/sq$ 以下對我來說，是可以接受的範圍。

由 Fig. 4-1 可以知道當控制製程參數於功率 70W，導電薄膜厚度 3nm 時，單片 (substrate, electrode) 穿透率達到近 80% 時，元件可以達到 77% 的穿透率。而一般 100nm 厚 ITO 做為導電膜下，元件只能達到 33% 穿透率。然而 3nm 薄膜厚度在製程中不適合更薄了，並後面可以知道相同厚度 3nm 下 70W 的穿透率是低於其他低瓦數的，故尋找可以鍍膜厚度較厚，電阻和穿透率都較高的參數。

以下使用功率 50W，調整鍍膜時間改變厚度。

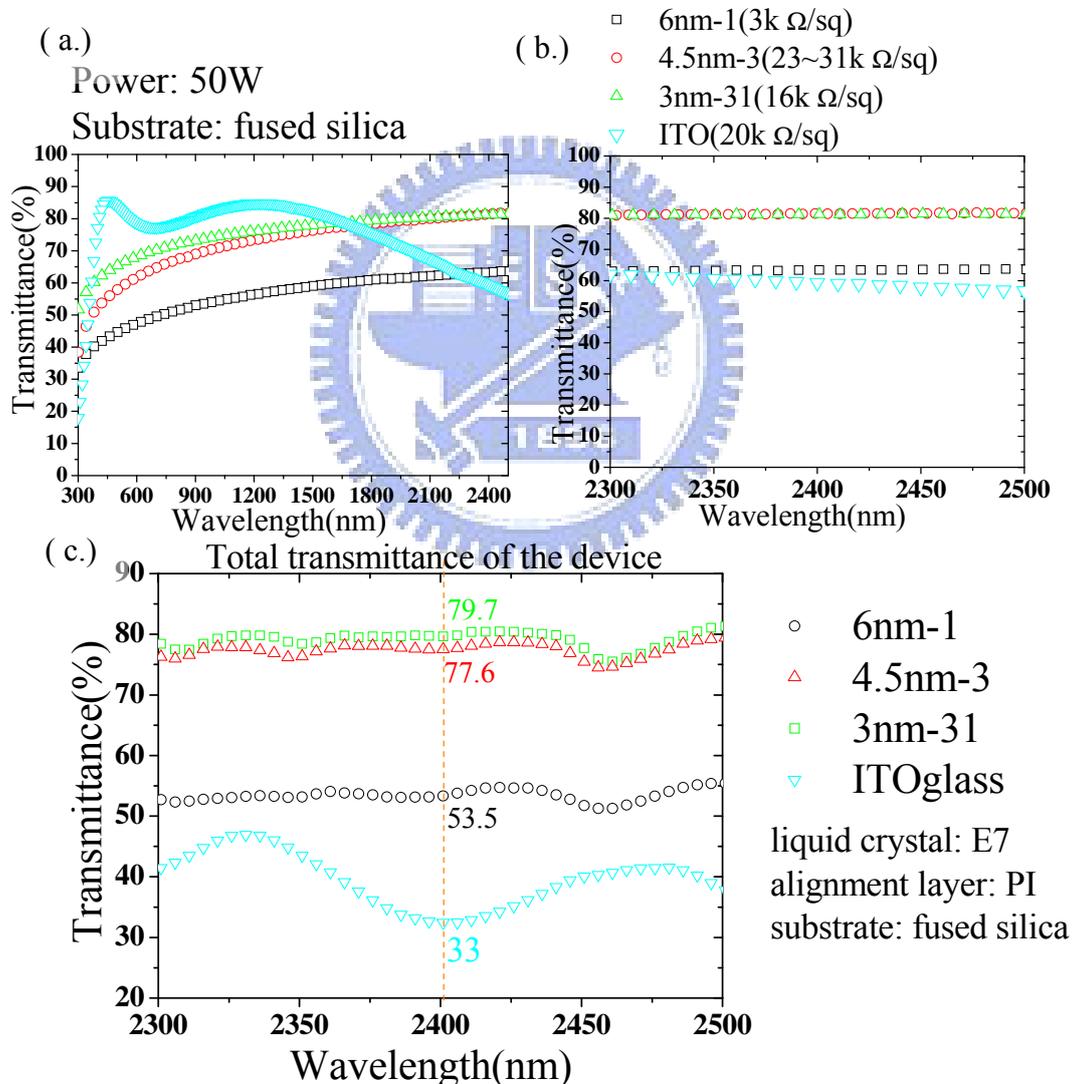


Fig. 4-7 功率 50W，基板使用熔融的石英玻璃 (fused silica) (a.) 波長 300~2500nm 穿透光譜 (b.) 放大(a.)中紅外光波段，觀察不同厚度下對應 2.4 μm 穿透強度和片電阻。(c.) 元件於 2.4 μm 波段其最高穿透率為 79.7%，使用 TiW 導電薄膜厚度 3nm。

我們可以看出 70W 和 50W 功率鍍膜下的差異性，在 70W 下相同的製程參數 3nm-31, 3nm-22 造成單片的穿透率卻有很大的差異，這有可能是由於鍍膜速度太快造成原子的堆積不均勻所造成。這樣會造成使用上的不確定性增加。

而相同的 50W 鍍膜 3nm 和 4.5nm 只和 70W 鍍膜 3nm 比較，單片穿透率 50W 只高於 70W 約 2~3%，這造成最後能否達到 80% 穿透率的差異。就使用的良率上面比較，要達到高穿透 50W 要優於 70W 製程。以下說明 30W 下鍍膜和 50W 比較的優缺點。

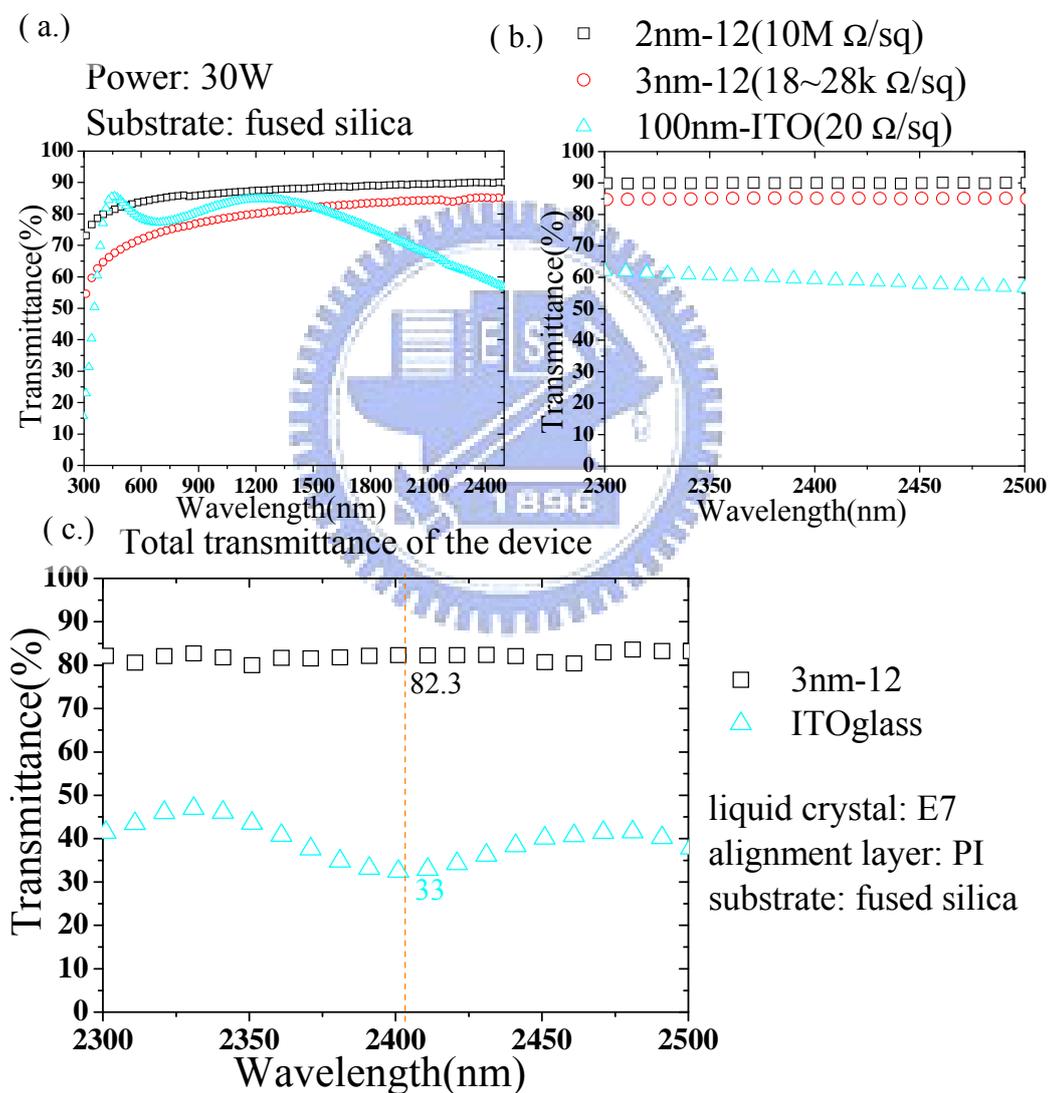
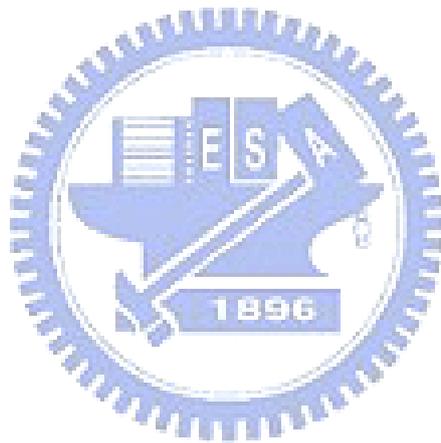


Fig. 4-8 功率 50W，基板使用熔融的石英玻璃 (fused silica) (a.) 波長 300~2500nm 透光譜 (b.) 放大 (a.) 中紅外光波段，觀察不同厚度下對應 2.4 μ m 穿透強度和片電阻。(c.) 元件於 2.4 μ m 波段其最高穿透率為 82.3%，使用 TiW 導電薄膜厚度 3nm。

30W 即便可以在相同於 50W 的 3nm 的 TiW 厚度，而將最終整體元件穿透率提升到 82.3%，可是在上圖的結果是在眾多 30W 參數（相同厚度）編號中唯一成功的一組。其它組在製程過程中就因沒法承受而造成表面電阻過大，最後自然不能夠工作。

因此在相同厚度下，30W 雖可以達到就高穿透率，但是必須冒著良率無法提高的問題。相同的 70W，相同的膜厚會得到較低的穿透率。固最終歸納出最適合的製程參數是操做功率 50W，膜的厚度約 3nm。可達到元件穿透率 80% 的使用。之後的章節會述說此導電膜在 2.4 μ m 光源下如何成功做到光相位的調變。



4-1-5 Nanorod ITO 導電薄膜製程參數對穿透率和電性影響

Nanorod ITO[22, 23]是以 e-gun 的方式鍍膜，由交大光電所余沛慈老師實驗室提供[24]。由 Fig. 4-9 可以看出鍍膜厚度對於穿透率造成的影響。以 30nm，40nm 和 360nm，600nm 相比可以看出在中紅外至紫外光波段，較薄的 nanorod ITO 薄膜有顯著的高穿透。但為何不鍍更薄，主要原因是 30nm 以下的薄膜片電阻會突然增加到不可接受的範圍 ($>100k$)。這樣在最後完成的元件極有可能所外加電壓無法加壓到液晶層兩邊。而以參數 30nm 為目前所嘗試最佳的製成參數。最後元件使用於以下這幾個波段，故提昇穿透率是主要目的，穿透率在 $2.4\mu\text{m}$ 可以達到 80%以上，344nm 可達到近 90%，301nm 可以達到 82%左右。

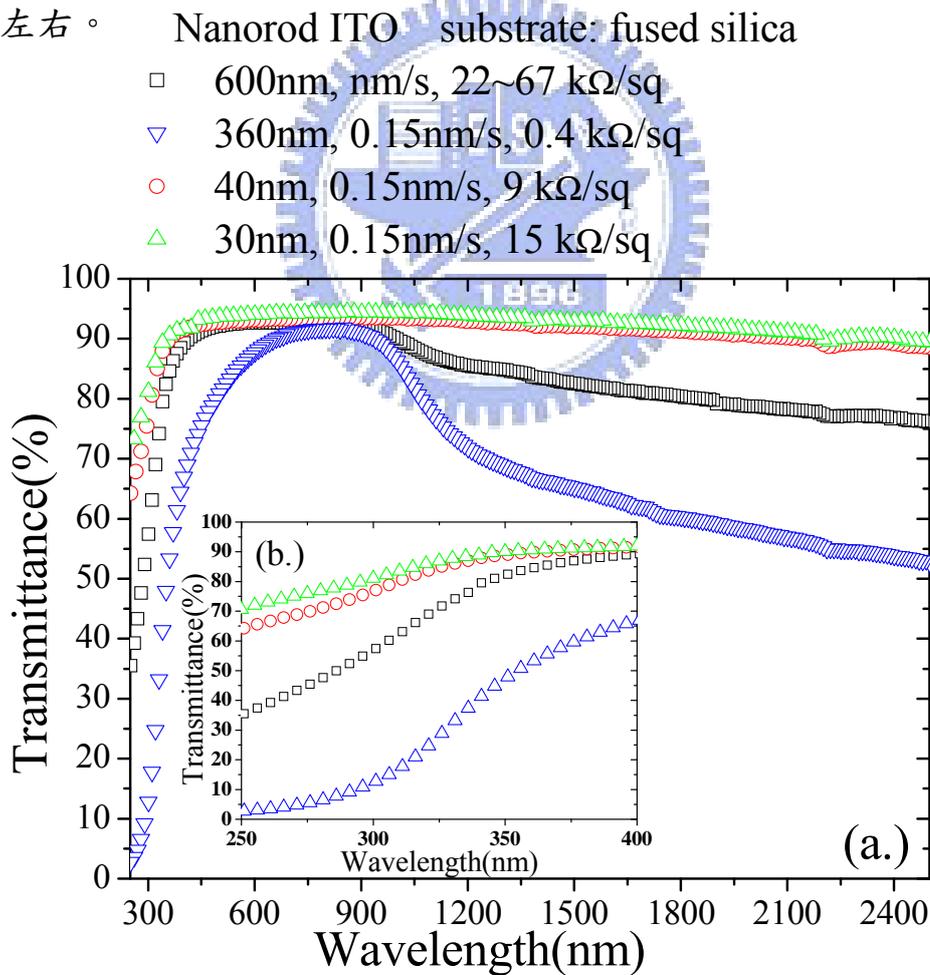


Fig. 4-9 導電薄膜 Nanorod ITO 不同厚度和製成條件(a.) 顯示中紅外至紫外光波段穿透率 (b.) 紫外光波段 250~400nm 穿透率。

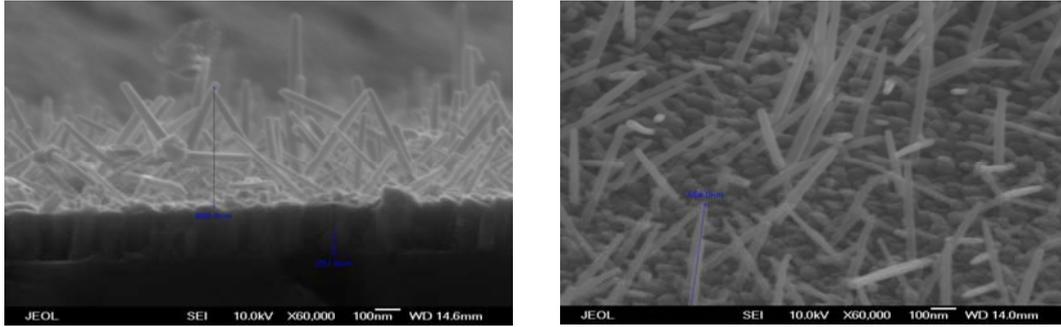


Fig. 4-10 圖 4-9 中 600nm 厚度下的 nanorod ITO 的 SEM 結果

conductive layer : nanorod ITO 30nm

ITO 100nm

LC : PCH5(for nanorod ITO)

E7(for ITO)

substrate : fused silica

alignment layer : MAP

Total transmittance of the device

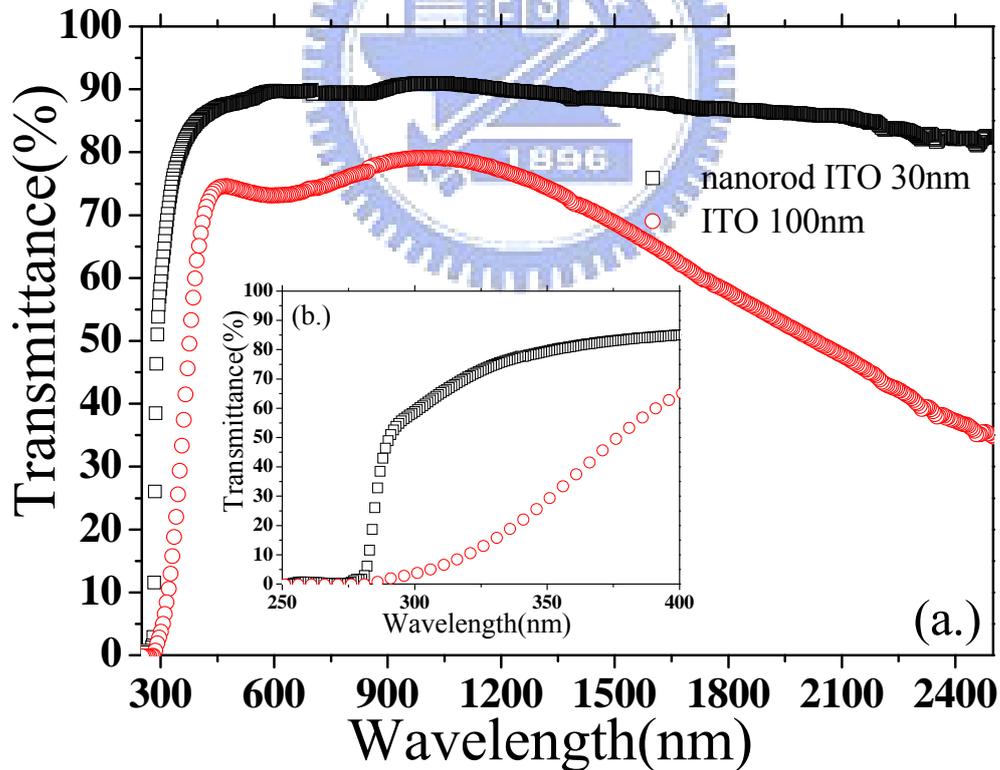


Fig. 4-11 元件穿透率以 Nanorod ITO (30nm)和 ITO (100nm)比較 (a.) 顯示中紅外至紫外光波段穿透率 (b.) 紫外光波段 250~400nm 穿透率。

最終以完全相同的元件內容，只交換導電薄膜為 Nanorod ITO (30nm) 和 ITO (100nm) 相比較：

- a. 於 301nm，Nanorod ITO 可達 58% 而 ITO 只可達 10%。
- b. 於 344nm，Nanorod ITO 可達 75% 而 ITO 只可達 30%。
- c. 於 2406nm，Nanorod ITO 可達 80% 而 ITO 只可達 40%。

所以替換導電薄膜 ITO，由 Nanorod ITO 取代。於中紅外至紫外光穿透率可得到大量的改進。

4-1-6 替換材料前後元件於各波段穿透率比較

	1	2	3	4
substrate	Fused silica	Fused silica	glass (盛華提供)	Fused silica
alignment layer	MAP	MAP	PI(130B)	MAP
electrode	TiW(3nm)	Nanorod ITO(30nm)	ITO (100nm)	ITO (100nm)
Liquid crystal	E7	PCH5	E7	E7
Transmittance				
2406nm	78%	82%	28%	32%
344nm	0.8%	78%	9%	6%
301nm	0%	59%	0%	0%

圖表一 不同材料下最後完成元件，在紅外光和紫外光的穿透率

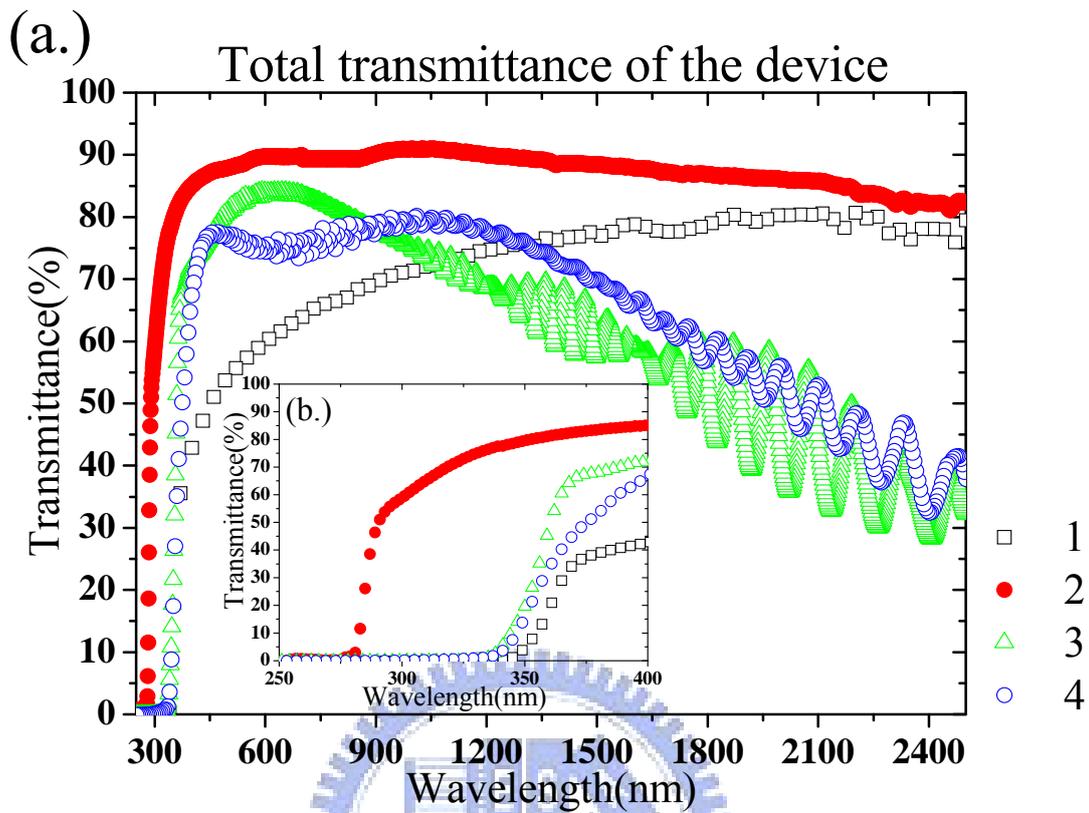


Fig. 4-12 各類代表性元件整體穿透率(a.)全波長範圍(b.)紫外光範圍

由 4-1 章節的論述，還有最終元件穿透率在不同材料下的比較，可以得知想要達到高穿透，對於各波段適用的材料以下列表。

基板：

	Glass (盛華提供)	Fused silica
Infrared	O	O
UV	X	O

配相膜 (alignment layer)：

	MAP	DMOAP	130B	Chisso (170 °C)	Chisso (250 °C)	AL-120G
Infrared	O	O	O	O	O	O
UV	O	O	X	X	X	X

導電薄膜：

	TiW (10% titanium, 90% tungsten)	Nanorod ITO	ITO (100nm)
Infrared	C	C	X
UV	C	C	X

Liquid crystal：

	E7	PCH5	MLC-6608	5CB
Infrared	O	O	O	O
UV	X	O	O	X

O: 可行，X: 不可行，C: 經過特殊處理後可行

圖表二 元件各部位於紅外光和紫外光使用上優劣的比較

4-2 中紅外光 2406nm 至紫外光 355nm 光源下，元件電壓調變光相位結果

先說明以晶體產生非線性效應的而生成 355nm 和 2406nm 光源的調變測試。再以常用的 He-Ne laser 光源下調變結果比較。

元件使用的材料 liquid crystal；PCH5（除了紫外光波段外，也可使用 E7）。基板使用 fused silica。為了配合平行配向（parallel alignment），配相膜使用 MAP（也可以使用 Fe_2O_3 ），導電薄膜使用 30nm 的 Nanorod ITO（2406nm 也可使用 TiW 作為導電薄膜），Cell gap=32 μ m。以上說明此元件所使用的材料。

我們使用的驅動電壓是 1kHz。最終可以成功達到 phase modulation：26 π (355nm)，12 π (632.8nm)，3 π (2406nm)。搭配下一節 4-3 的數據，可以證明從 2406nm 達到紫外光波段 355nm，目前元件已經可以達到高穿透並且證實了元件具有可以接受的光調變能

力。

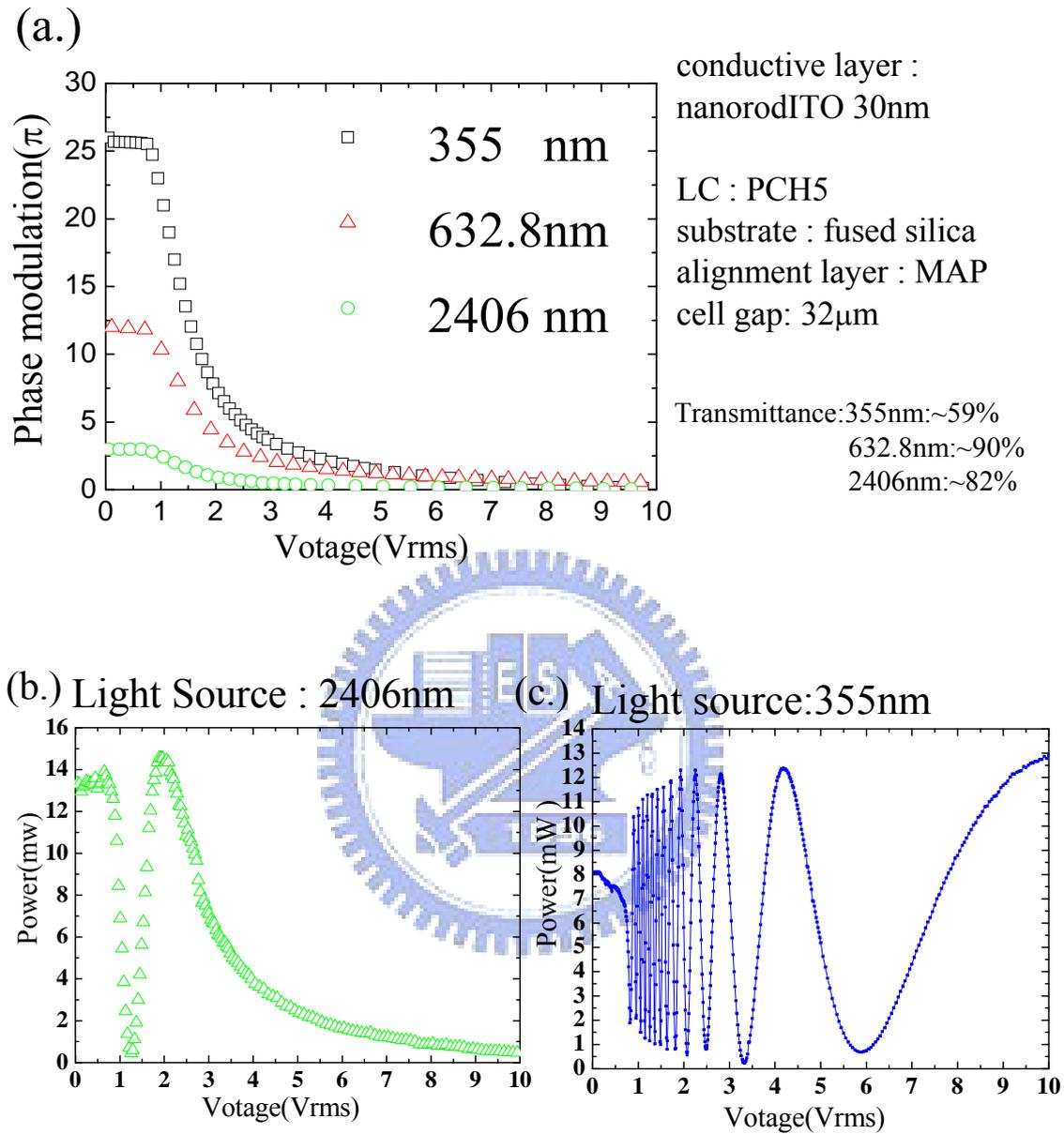


Fig. 4-13 由 3-2 章節對於 2406，602 和 355nm 光源的實驗論述，可以得到以上數據 (a.) 各自波段驅動電壓對光相位變化圖 (b.) 2406nm 波段，驅動電壓對穿透率的調變圖 (c.) 355nm 波段，驅動電壓對穿透率的調變圖

4-3 阿秒雷射系統中元件的操作

由 3-4 章節所說明的阿秒雷射系統中對於 LC-SLM 的使用上必需先作 calibration 以取得電壓對於光相位改變的資訊。一般我們對於各光源各取四到五次的量測，檢查電壓對於相位改變的數據是否準確。最後才可以準確使用此元件。在使用上除了上述問題以外，因為某些原因，我們是不使用的。

原因：

1. 高電壓下對於液晶的轉動影響變慢，然而這個時候由 VT curve 得到的相位資訊較有可能因為雷射的不穩定造成判讀光相位改變量的錯誤。

2. 低電壓下解析度 (resolution) 不夠，因為振盪過於激烈，這造成由圖形辨認相位改變量的時候較易有誤差。

3. 調變光相位上各種光源週期的改變必區超過 2π 。原因是一個 2π 相當於光走了一個週期又回到了原點，所以對於調變光相位來說，每差 2π 的值代表的意義是一樣的。當我只有一個 2π 時，對某個要調變的相位大小只有一種選擇，而曲線不穩定或者別的因素造成某點使用上的誤差時我們別無選擇只能重作元件，這會造成非常大的不方便。因此為了使用上的方便性，在製作上首先一定會對照適用波長、液晶的 $\Delta n = n_e - n_o$ 和液晶層厚度 d 等參數，至少使得 $\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}d > 2\pi$ 。

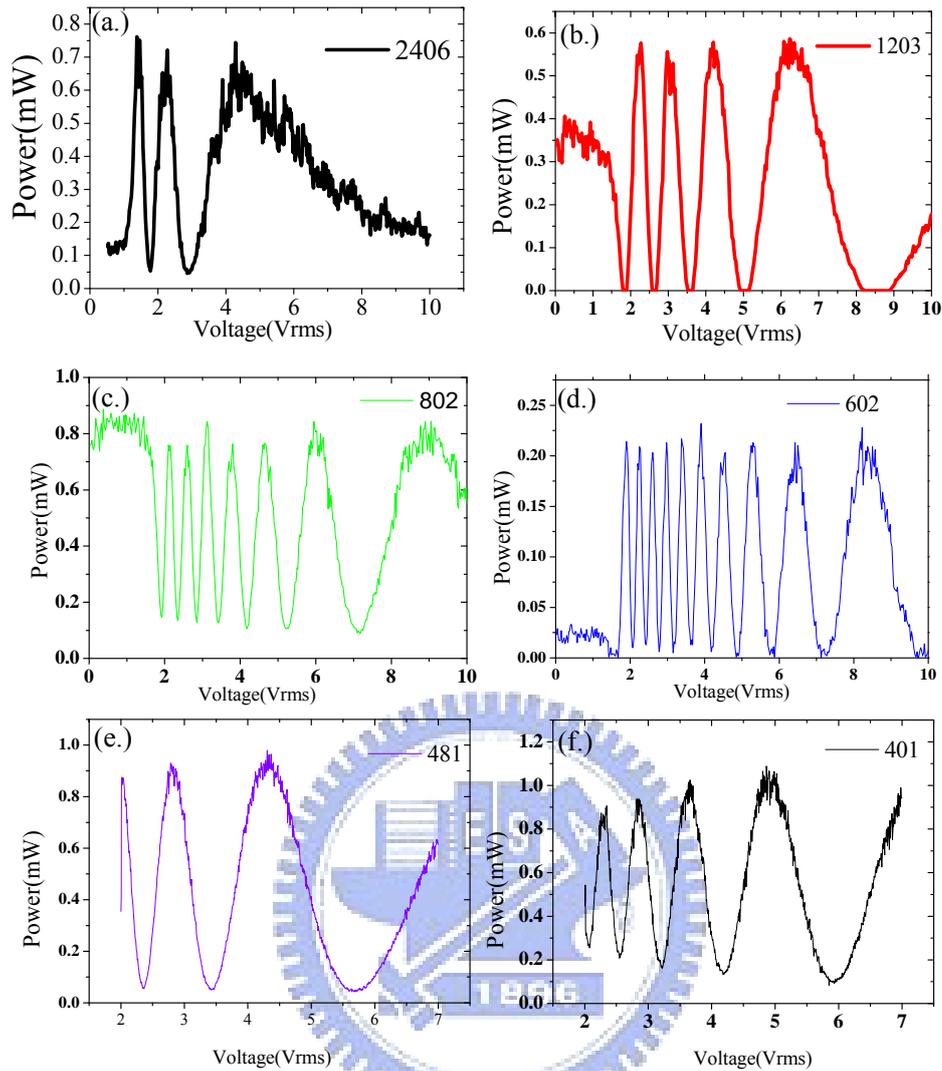


Fig. 4-14 (a.)-(d.)以相同元件做的量測，TiW作為導電薄膜，E7為液晶，MAP為配向膜下的量測。厚度 $32\mu\text{m}$ (e.), (f.)以ITO作為導電薄膜，E7為液晶，PI為配向膜下的量測。兩個元件的厚度不同。

由 Fig. 4-15 可以看出 $2.4\mu\text{m}$ 達到最大約 6π 的調變量，這也是我們為何要將 cell gap 調整至 $32\mu\text{m}$ 去製作的原因，這厚度已經顯得蠻厚的。這是為了在長波長下使用可以達到 2π 以上的目的。而使用上固定溫度下，雖然波段不同液晶的 $\Delta n = n_e - n_o$ 會有所差異但是差異性並不大。故各個波長可以調變的最大相位約略和波長成反比。

Fig. 4-14 驅動電壓是 $2\sim 7\text{ Vrms}$ ，是實際於阿秒系統中作 calibration 常用的範圍(因高低驅動電壓不使用)。

論述到此，最終在阿秒雷射系統中的光源，以確定的由 $2.4\mu\text{m}$ 至 401nm 光源都可以調變。

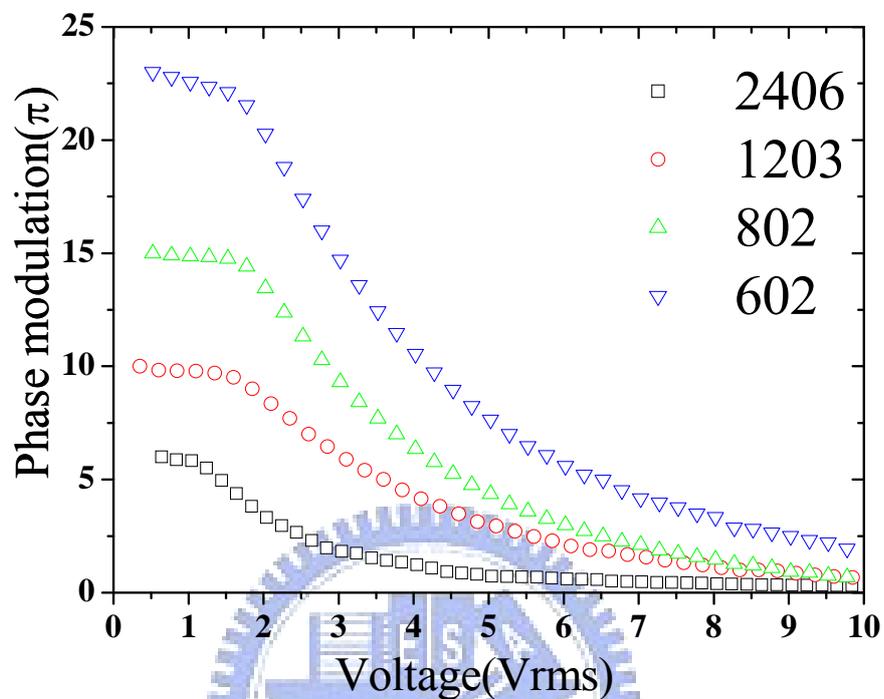


Fig. 4-15 由 fig.4-13 (a.)-(d.) VT curve 轉換成光相位的改變量。

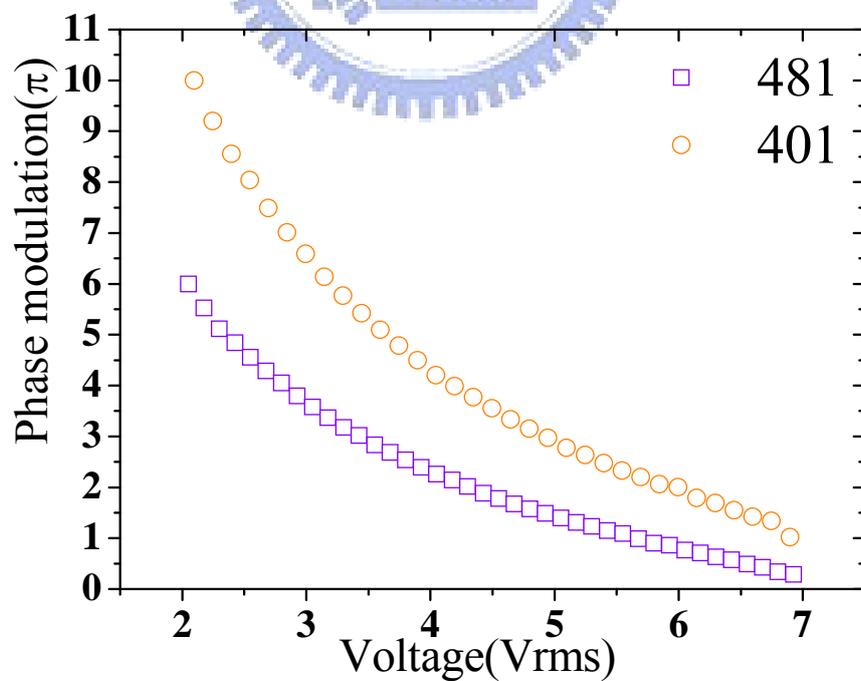


Fig. 4-16 由 4-13 (e.)、(f.) VT curve 轉換成光相位的改變量。

4-4 垂直配向 (Vertical alignment) 結構中使用液晶 MLC-6608 在製成參數不同造成元件配向效果差異

由前面的討論我們知道液晶中除了 PCH5 可以在紫外光高穿透以外，MLC-6608 也可以高穿透。但 PCH5 屬於正型液晶，驅動電壓液晶會順向電場排列。而 MLC-6608 屬於負型液晶，這讓液晶會趨於和電場垂直的方向排列。因此必須使樣品是垂直結構 (使液晶初始狀態相對基板垂直排列)。製作過程類似第三章 one channel 的製作方式。尋找配向較好的製作參數，為往後以此結構和液晶操作於紫外波段作準備。

液晶：MLC-6608，導電薄膜和基板：盛華公司提供的 ITO 基板和配相膜：DMOAP (可使液晶垂直站立)。上述是製作此元件的內容材料。

本實驗使用的是聯揚技術股份有限公司提供的配向機台。本實驗中改變的製成參數有”絨毛磨刷深度”和”絨毛轉速”。由旋轉控制輪的刻度控制絨毛磨刷深度，刻度輪一小格 0.01mm，而實驗中每個刻度單位一次是十小格，0.1mm。

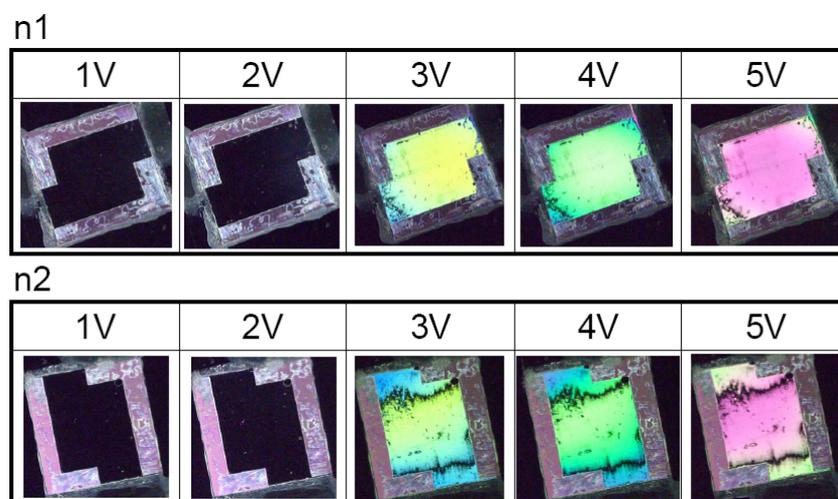
以下照片在 cross polarizer 下，每個樣品 rubbing direction 是平行於正方形樣品的邊緣。由外加驅動電壓觀察樣品不同參數下的均勻程度決定適合參數。

第一步： 確定所適合的絨毛磨刷深度 (刻度越大越淺)

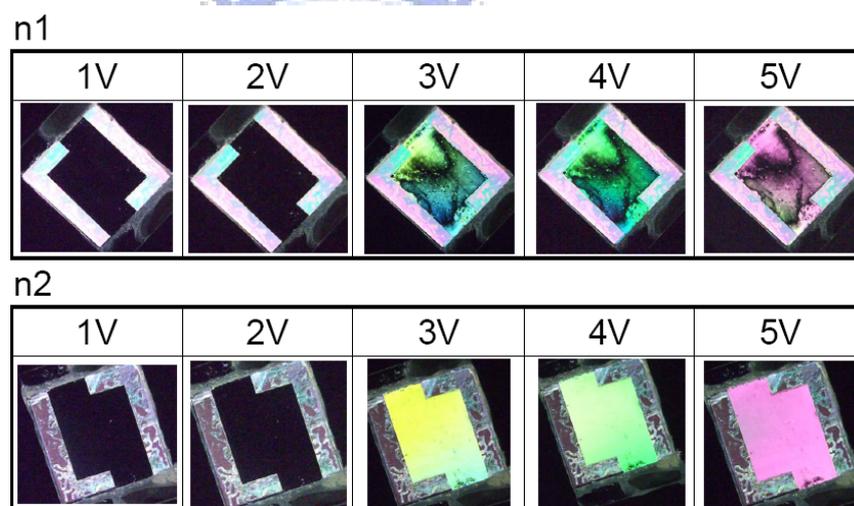
第二步： 確定所適合的絨毛磨磨刷轉速

第一步：

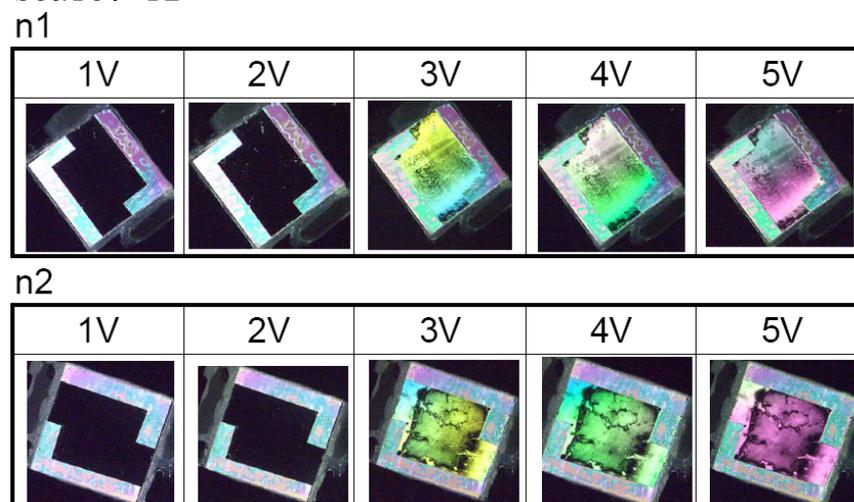
(a.) 703rpm scale: 10



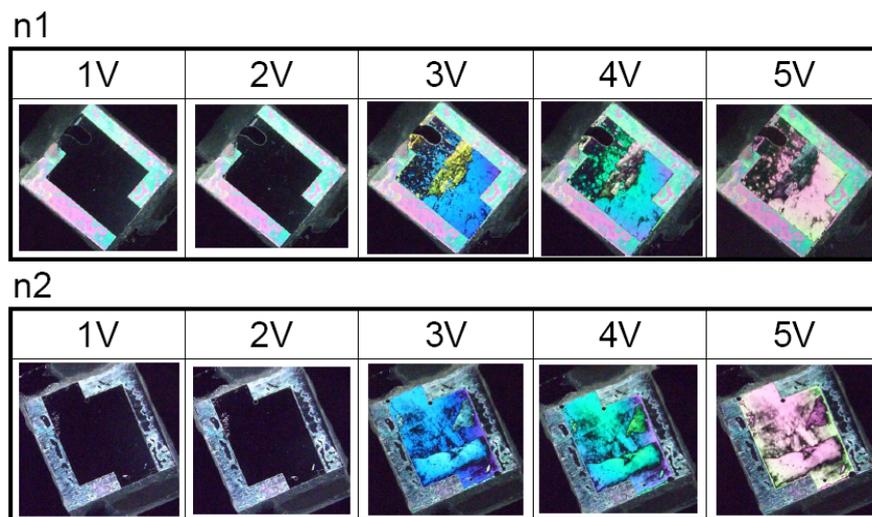
(b.) 703rpm scale: 11



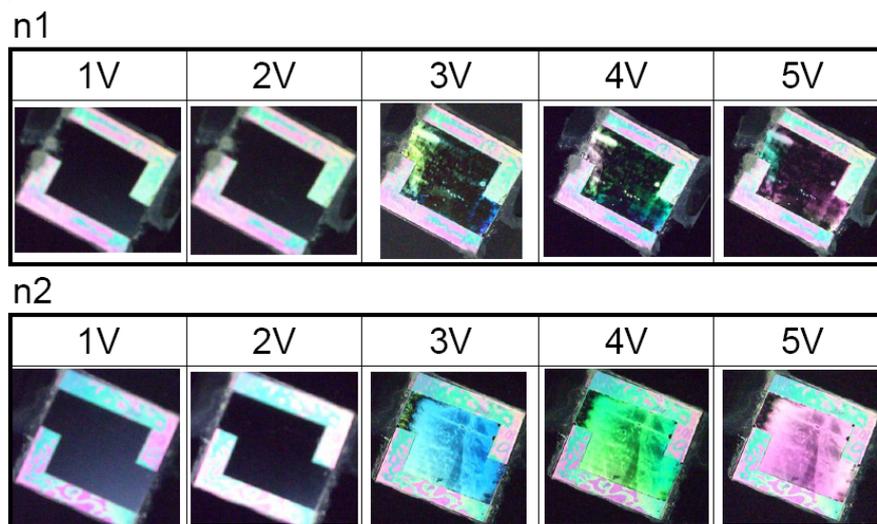
(c.) 703rpm scale: 12



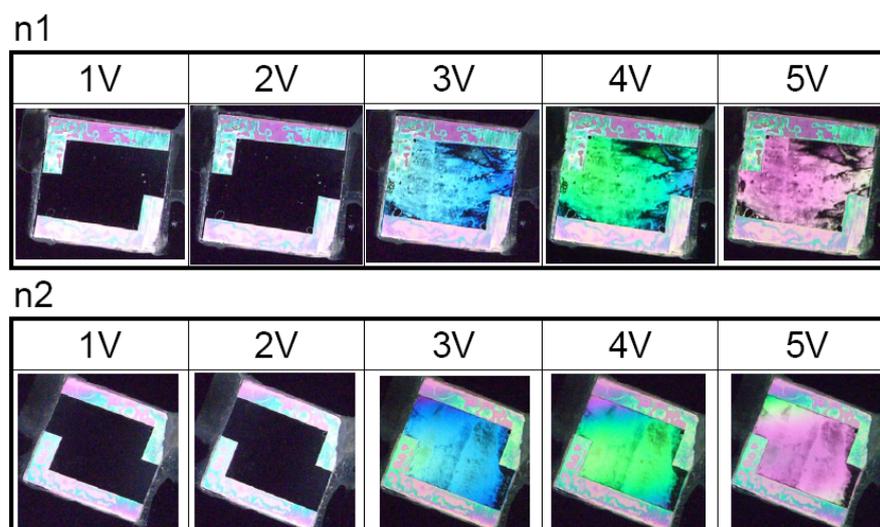
(d.) 703rpm scale: 13



(e.) 650rpm scale: 10



(f.) 650rpm scale: 11



(g.)650rpm scale: 12

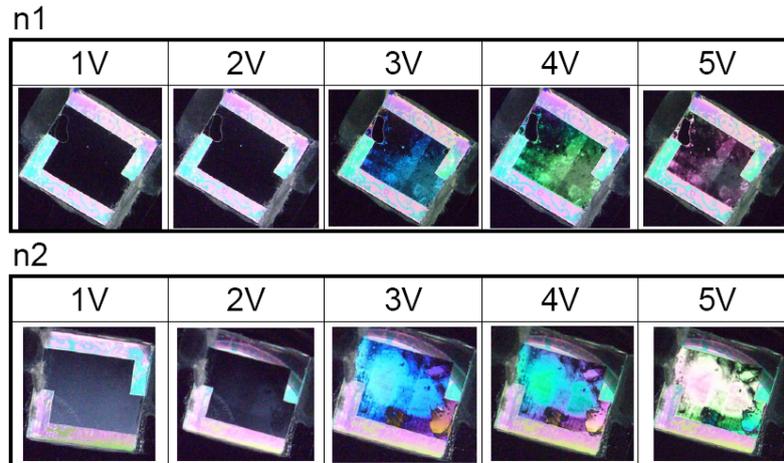


Fig. 4-17 (a.)-(d.) 刻度各自對應 10-13, 並將轉速固定於 703rpm。 (e.)-(g.) 刻度各自對應 10-12, 並將轉速固定於 650rpm。

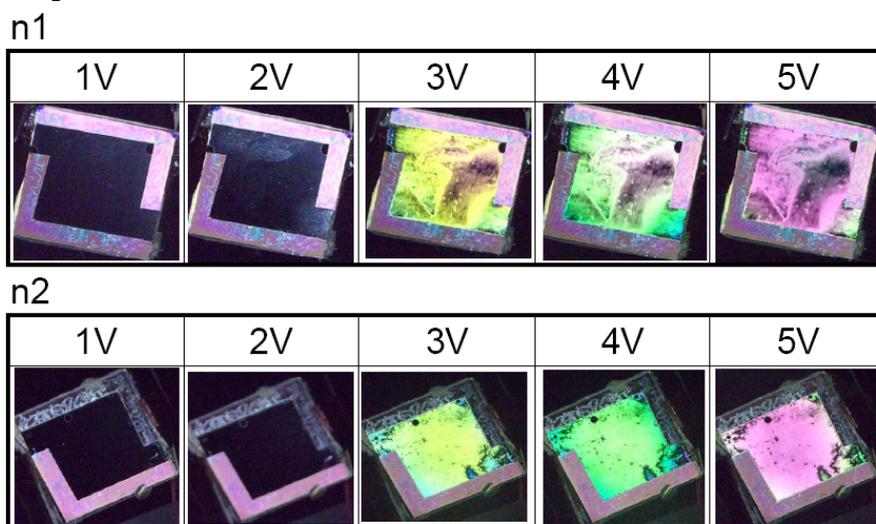
這些圖實際上是由各個參數的五組樣品中挑兩組較有代表性的成為 n1 和 n2, 在由不同參數間作比較。

由 scale10 溝槽較深的時候可從 Fig. (a.) (e.) 配向似乎不佳, 703rpm, scale10 這個參數甚至出現受到磨刷傷害的方向性。而這兩種轉速下的 scale12 和 scale13 的配向結果雖然沒看到出現過深磨刷出現的方向性, 但是配向效果都不甚理想, 出現 muti-domain 的情形。scale11 下這兩種轉速都有出現一個的配向較好的樣品, 而 730rpm scale11 n2 這個樣品的配向均勻度甚至可以說蠻好的。

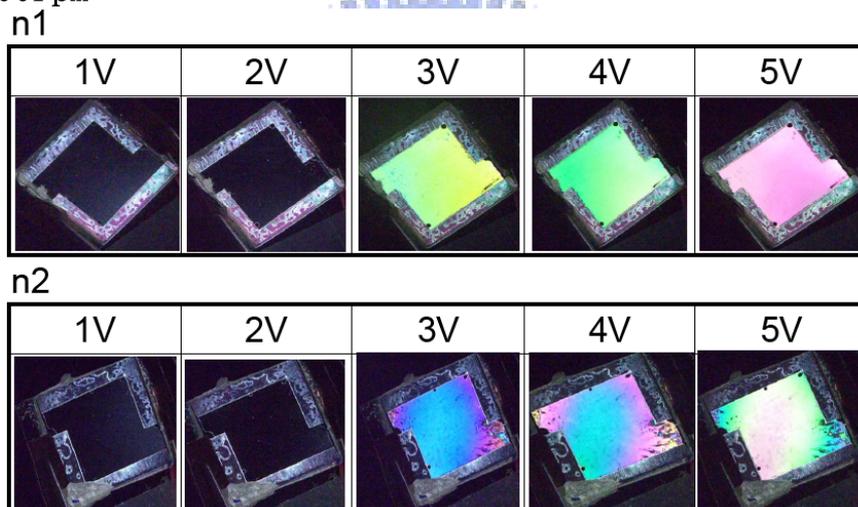
因此將深度刻度固定在 scale11, 進行第二步, 改變轉速尋找適合參數。

第二步 (scale 11) :

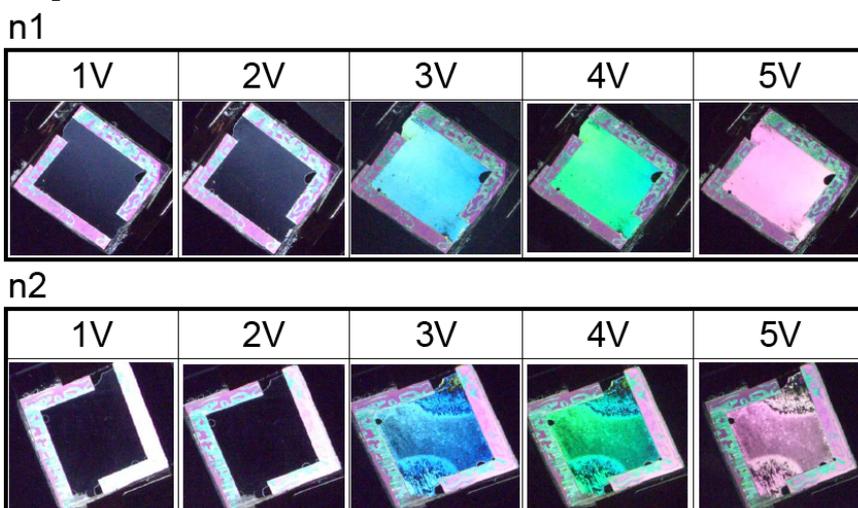
(a.) 500rpm



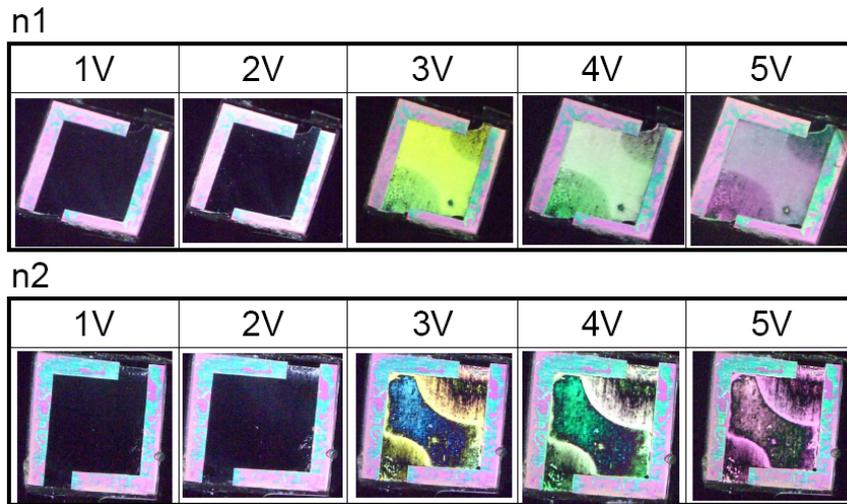
(b.) 600rpm



(c.) 700rpm



(d.) 800rpm



(e.) 900rpm

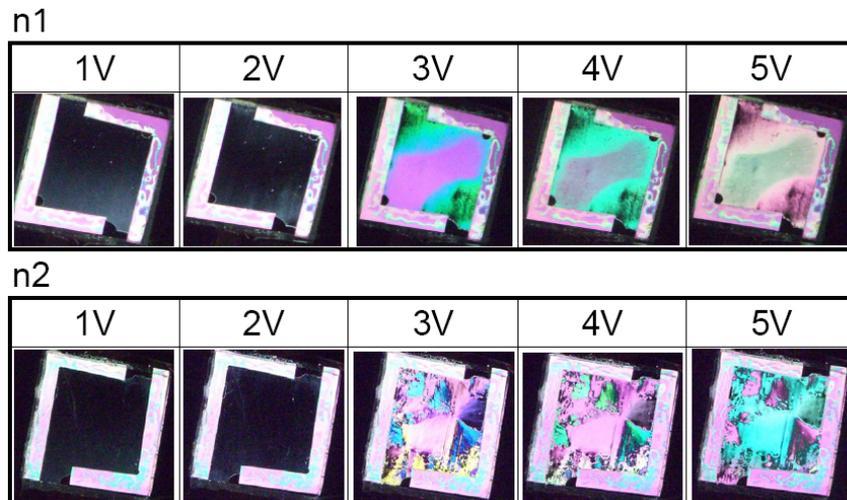


Fig. 4-18 (a.)-(e.) 對應各自轉速 500、600、700、800 和 900rpm，刻度固定在 scale 11。

由 Fig. 4-18 最好的配向效果發生在 (b.) 600rpm 和 (c.) 700rpm。因此對於使用 MLC-6608 液晶，盛華提供的 ITO 玻璃以此玻璃厚度為前提下，若想要達到較好配向效果的製成參數為；

絨毛磨刷轉速：600~700rpm

絨毛磨刷深度：scale 11

4-5 紫外光 355nm 光源下元件操作生命期的量測

4-5-1 紫外光對液晶元件的破壞[25]

元件結構：

液晶：PCH5

基板：fused silica

導電薄膜：nanorodITO

配向薄膜：MAP

Total transmittance: 56% in 301nm, 77% in 355nm

以下是 cross polarizer 下照射前後液晶樣品的變化，實線是偏振片方向，虛線是液晶排列方向，藍線是紫外光偏振方向。

光源:355nm，repetition rate=6kHz，pulse width=20ns，
Intensity= $1.3 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$

initial



6 hours later

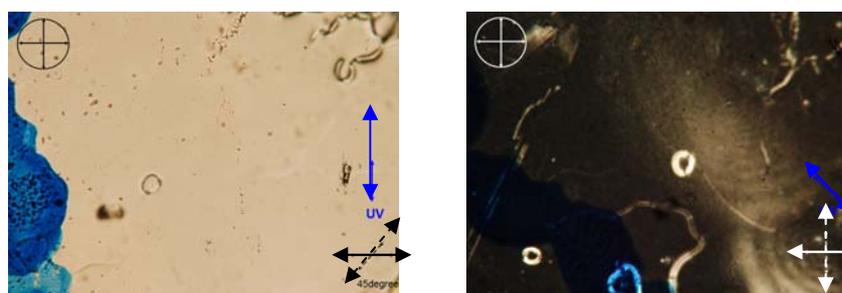
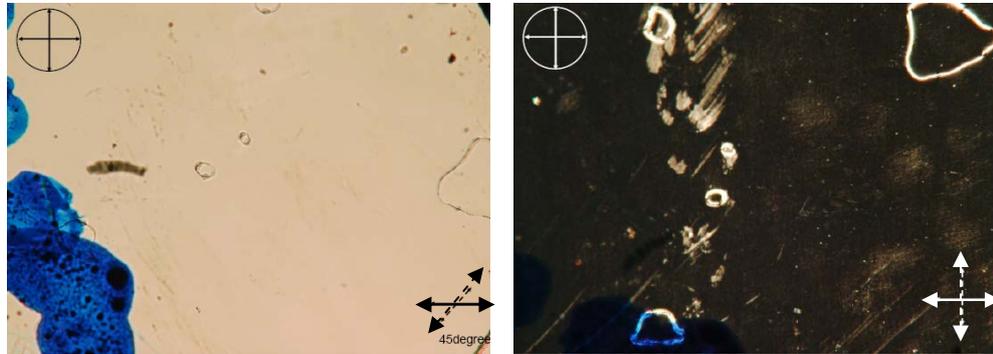


Fig. 4-19 355nm 雷射光照射前後 cross polarizer 下照片。左右分別屬於亮暗態，上圖屬於未照射前下圖屬於照射後。

光源:301nm, repetition rate=30Hz, pulse width=3.5ns,
Intensity=2.89 MW·cm⁻²

initial



25min, 40min later

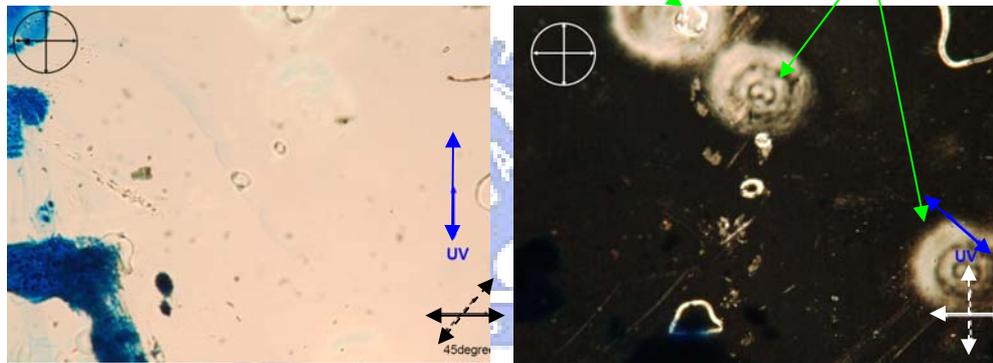


Fig. 4-20 301nm 雷射光照射前後 cross polarizer 下照片。左右分別屬於元件的亮暗態。上圖屬於未照射前，下圖屬於照射過後。

由上面兩種紫外光波段照射前後明顯看到樣品暗態下
出現了圓形光點的差異性。被雷射照射後的區域性質明顯不
同。

以下我們先討論問題發生的原因：

Liquid crystal: PCH5?

Alignment layer: MAP?

Electrode: Nanorod IT0?

Substrate: Fused silica?

尋找問題來源：

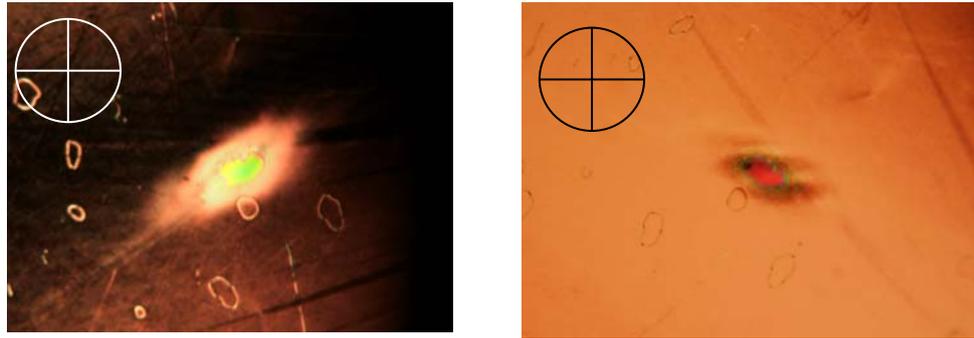
1. 將打過雷射後的位置標明後，拆開元件後，將表面的液晶清理乾淨，以顯微鏡觀察基板的破壞程度。結果無法觀察到差異性。並且在 cross polarizer 下並沒有讓基板成為具有雙折射性。因此排除基板的問題。

2. 因為配向機制並非由於導電薄膜所造成，當元件照射紫外光過後，由照片可以知道，在未施加電壓前即出現配向上的變異。這個問題應該是由於 MAP 和 LC 造成。除非是由於導電薄膜與配相膜或者液晶發生反應。所以初步排除導電薄膜的問題。

3. 單獨製作以 fused silica 基板雙面鍍上 MAP 後磨刷配向，先以高功率打在樣品上，經過幾小時後再將空元件灌入液晶。結果沒法看見如同照片上面的結果，而是被漂亮的配向了。這代表了單獨的 MAP 配向薄膜經過紫外光照射後並不會改變他的配向效果。

4. 最終測試紫外光對液晶的影響，只以兩片處理過的 fused silica 基板夾住 PCH5 液晶，經過紫外光照射後，照片如下。

照射後：



經過加溫到 80 °C 再緩慢回溫後：

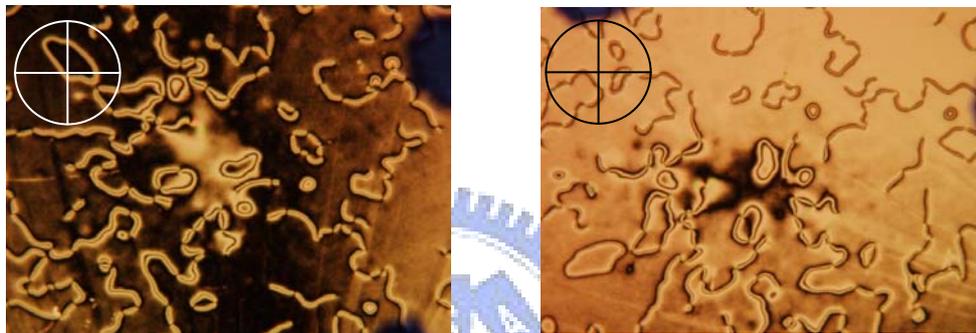


Fig. 4-21 301nm 雷射光照射後，上圖屬於照射後的照片，下圖是接著加溫回溫後 cross polarizer 下照片。

由 1.2. 我們排除了導電膜和基板的問題，而 2. 並沒法確實說明影響程度，只能說先經過紫外光照射後的 MAP 並不會改變配向效果。而我們使用 Fe_2O_3 這類無機物質當作配相膜，結果仍然抵擋不了元件的性質改變。這或許就是因為 4. 中說明問題是發生在液晶本身。

Fig. 4-21 加溫到液晶 isotropic 後的樣品在降溫後，液晶應該會被重新排列。但是可以從上圖看到被打過的區域仍然具有配向。要記得的是這可是沒有配向膜的樣品。所以是某種因素造成了液晶的配向。其間液晶和紫外光源發生何種作用目前還不得而知。

可以確定的是，PCH5 這種液晶和紫外光源的確有發生某種作用。

4-5-2 光源 Intensity 的量測

使用 355nm 雷射光源，repetition rate=6kHz、 pulse width=20ns。液晶元件使用基板: fused silica，導電薄膜: Nanorod ITO，配向薄膜: MAP，液晶:PCH5。以上作為製作元件的材料。

實驗架設圖同 Fig.3-11。量測光源 total power 後以下列公式作為 beam waist 的範圍內，平均 Intensity 的定義：

Intensity

$$= \frac{(total \ power)}{(repetition \ rate) \cdot (pulse \ width) \cdot \pi \left(\frac{waist}{2}\right)^2} \quad (4-5-1)$$

現在固定 beam waist 的大小改變 Intensity，觀察不同 Intensity 之下元件的 VT curve 隨時間變化，在這使用 3-3 裡面所定義的 D (definition 改變量的百分率)。去衡量元件特性的變化。也就是改變不同 Intensity，觀察元件隨時間對 D 值的作圖。

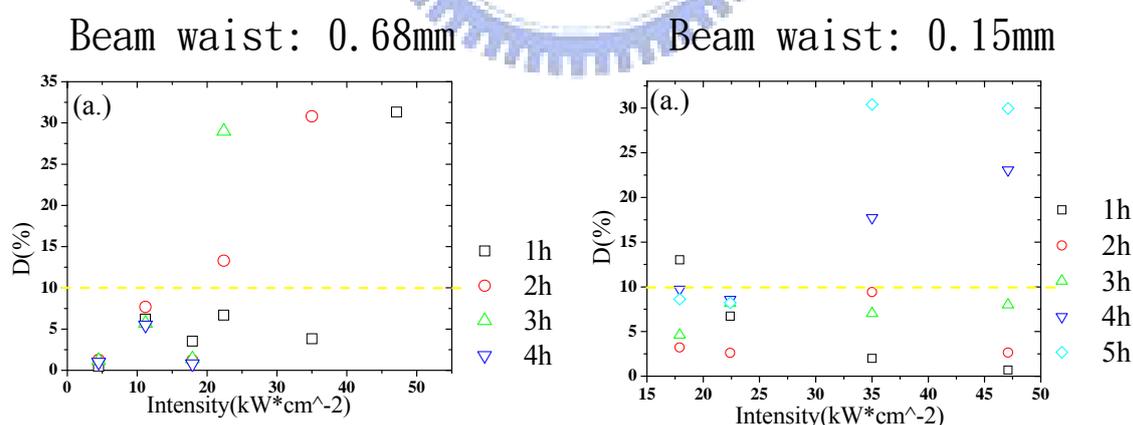


Fig. 4-22 不同 Intensity 對應不同時間下 D 的數值大小(a.) beam waist=0.68mm，四小時之內 D 隨 intensity 的改變 (b.) 五小時之內 D 隨 intensity 的改變，beam waist=0.15mm。

D 值達到 30%以上樣品停止量測。對於 high intensity 超過 30 就會停止量測，因此 high intensity 有些長時間的數據並沒有。而

由 Fig. 4-21 可以知道，隨著 Intensity 的上升，元件 VT curve 隨時間改變的程度 D 會大幅增加。我們定義虛線的位置，是所能接受改變程度的最低點。

平均 Intensity 一樣時，beam waist 比較小其形變量 D 隨時間較少。所以在使用上相同的 Intensity，beam size 較小較為耐用。

4-5-3 Intensity 對應元件生命期的量測

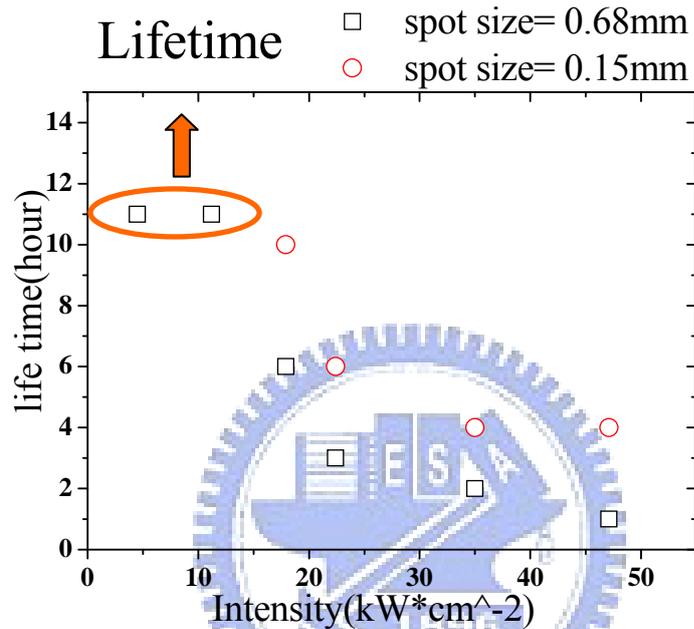


Fig. 4-23 不同 Intensity 對應不同使用上的 life time，當 D>10 發生時歸類為 life time 的結束。

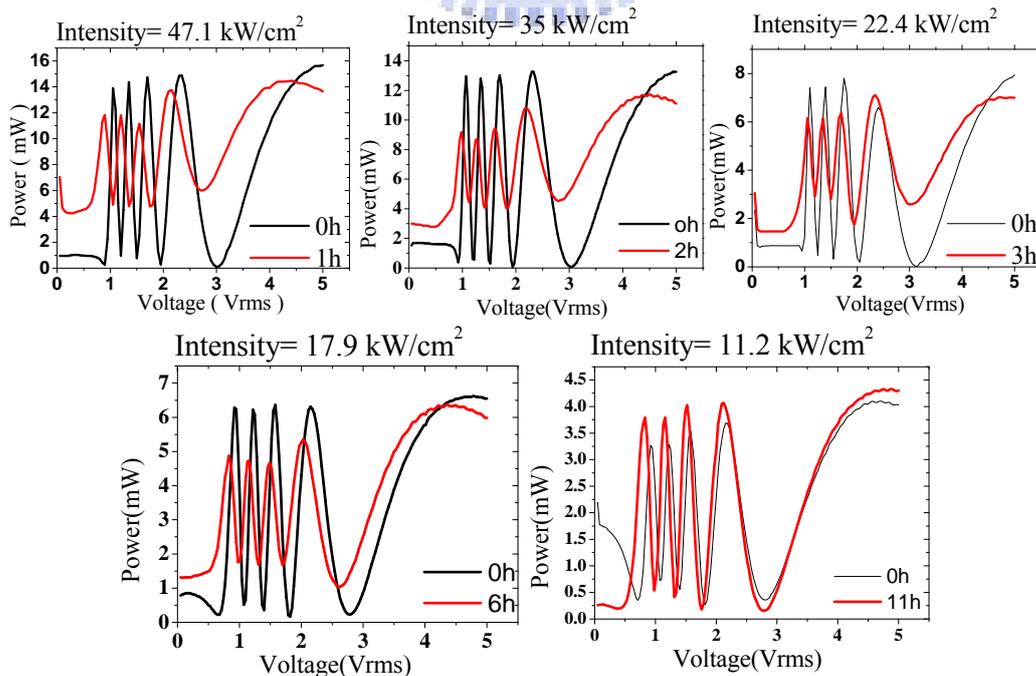


Fig. 4-24 beam waist=0.68mm, 結束生命期時與 0hour VT curve 的對照圖。

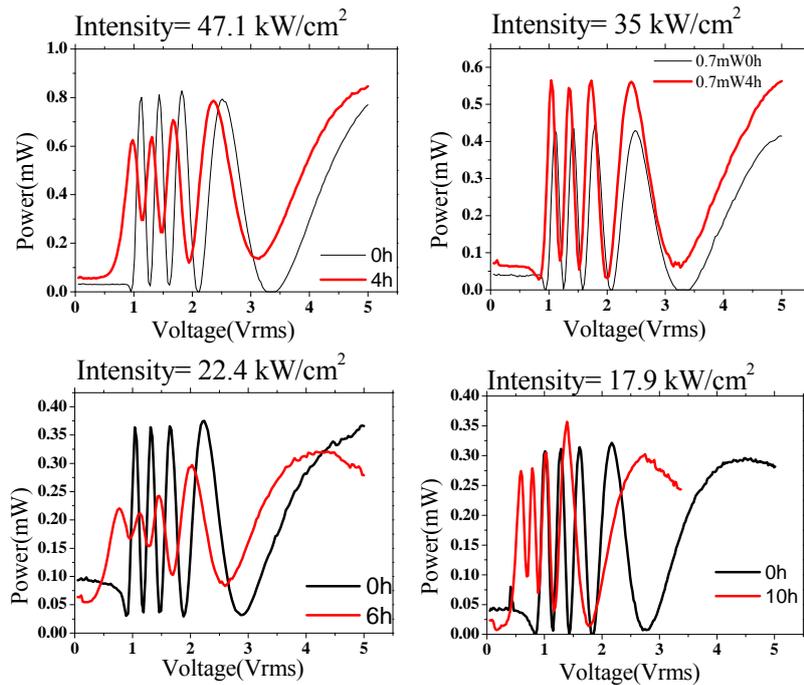


Fig. 4-25 beam waist=0.15mm, 結束生命期與起始時 VT curve 的對照圖。

當 $D > 10\%$ 以上歸為不可使用，也定義為生命期結束的時候。由 Fig. 4-23 中得知 Intensity 相同，beam size 較小生命其較長久。最左邊兩點向上箭頭是指使用上至少可以撐過 11 小時以上。

而由 Fig. 4-23 中 intensity=11.2 kW/cm² 我們知道當操作元件於足夠低的情況下 (beam size=0.68mm, I=12 kW/cm² 以下)，LC-SLM 是可以在長時間操作下，並保持他的調變能力。但是在 beam size 與元件承受能力的關聯性，我們還需多作探討。

4-5-4 cross polarizer 下不同 Intensity 的紫外光源對於液晶元件破壞比較

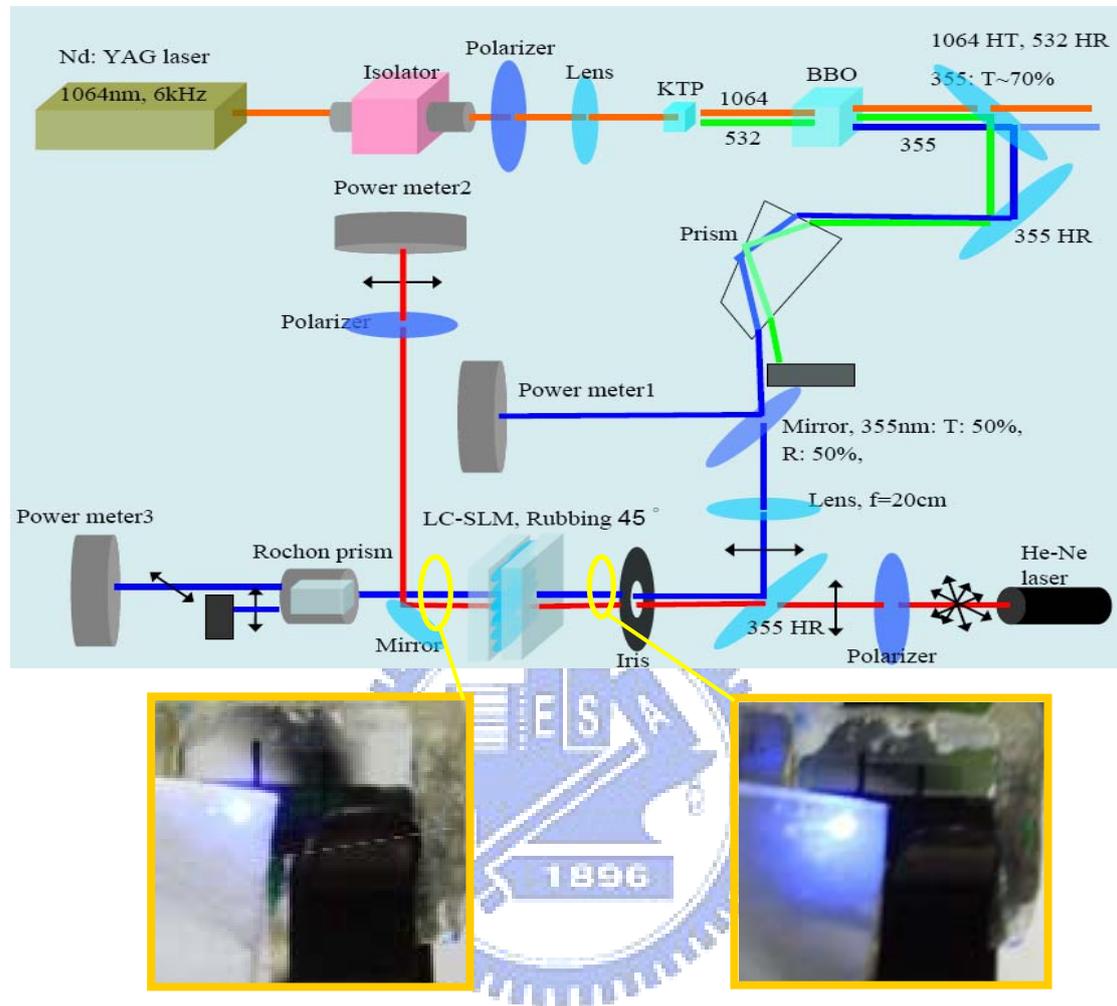


Fig. 4-26 在 fig. 3-10 裡面由 lens $f=20\text{cm}$ 作為聚焦光點。左圖是將 LC-SLM 操作在 beam waist= 0.15mm 情形。右圖是將 LC-SLM 操作在 beam waist= 0.68mm 情形。

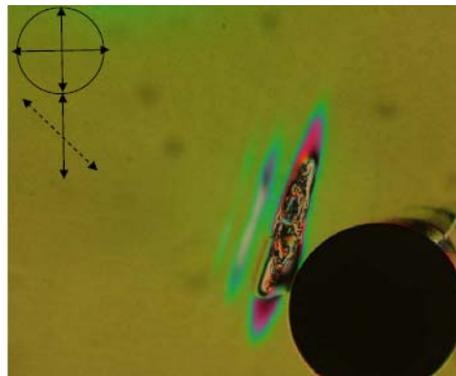
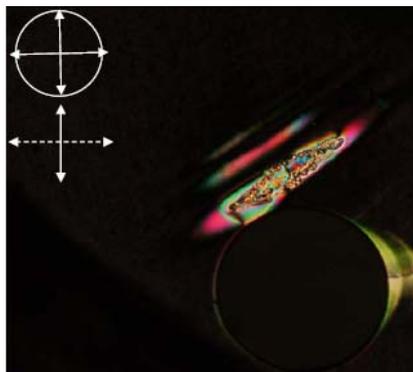
Fig. 4-26 展現不同 beam waist 大小照射在元件上對於肉眼觀察下的差異。接者以下展示照射過後元件在 cross polarizer 下的配向亮暗態差異。注意圖中與周圍顏色不同的，即是照射過後造成元件性質與周圍不同造成。

實線: 偏振片方向

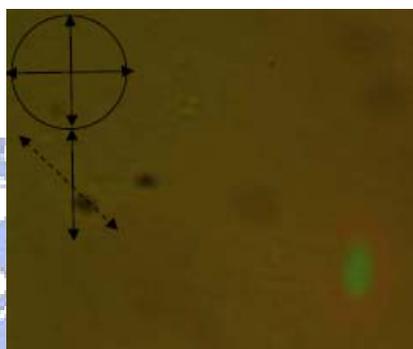
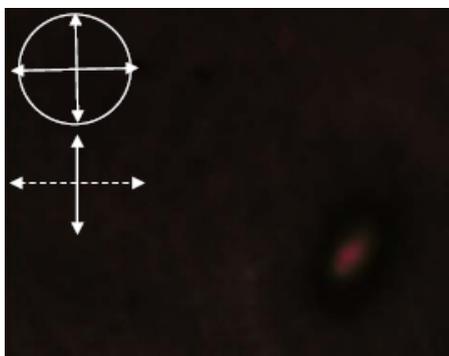
虛線: 液晶排列方向

Intensity= $47.1 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$

Beam waist:0.68mm

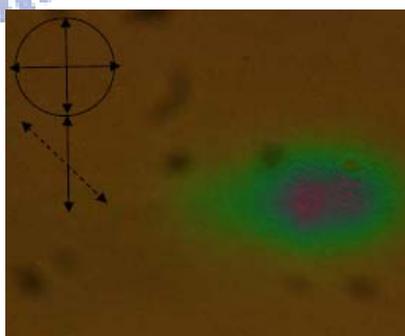
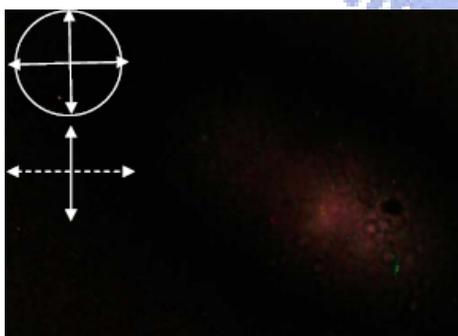


Beam waist:0.15mm

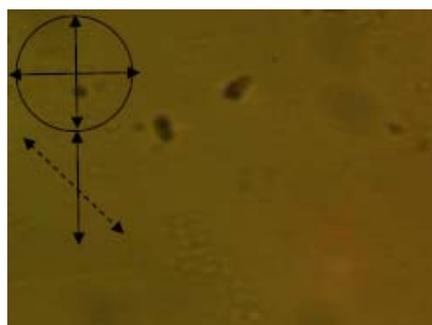
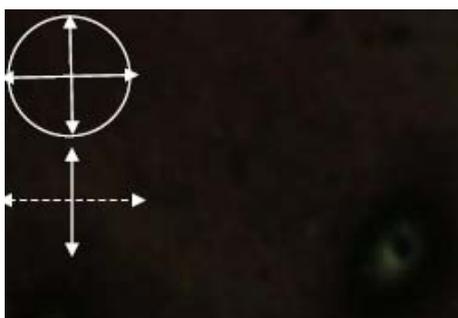


Intensity= $35 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$

Beam waist:0.68mm

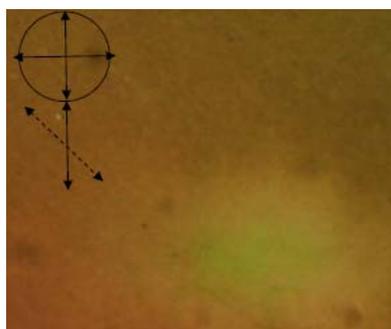


Beam waist:0.15mm

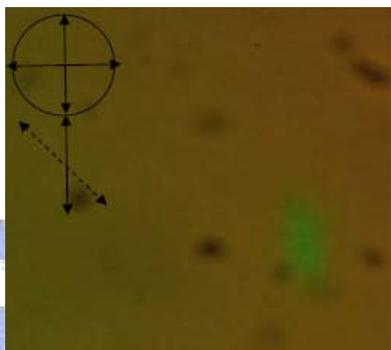
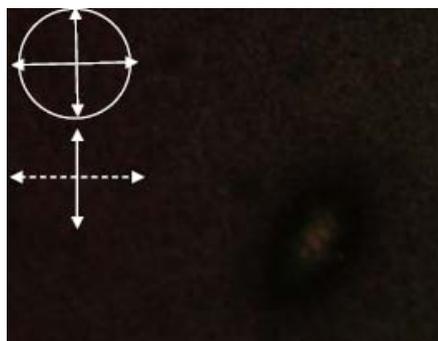


Intensity= $22.4 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$

Beam waist: 0.68 mm

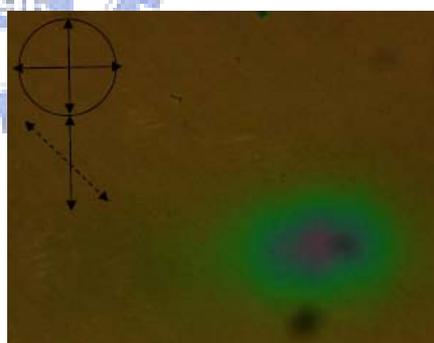


Beam waist: 0.15 mm

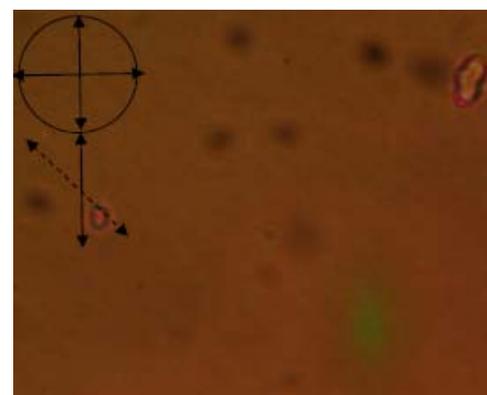


Intensity= $17.9 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$

Beam waist: 0.68 mm



Beam waist: 0.15 mm



Intensity= $11.2 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$

Beam waist:0.68mm

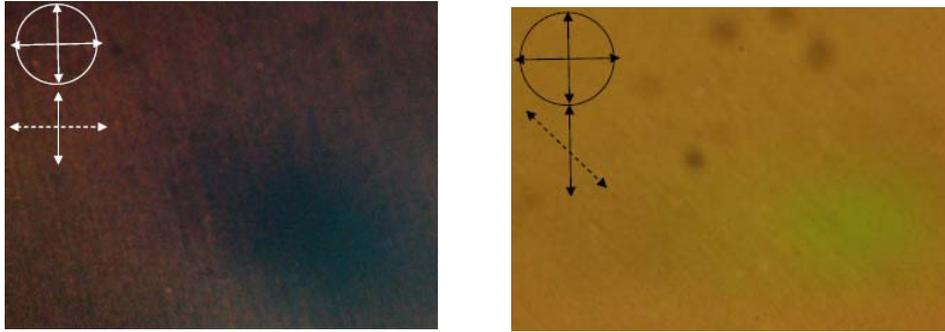


Fig. 4-27 元件經 355nm 光源照射後當達到我們定義的生命期後，cross polarizer 下不同 beam size 的結果。

Fig. 4-27 可以明顯看出差異性，beam size 較小造成影響的光點大小由照片可以看出比較小，並影響較為輕微，這是初步得到的結果，此結果的原因還需要多加探討。

不論光點大小，隨者 intensity 的下降造成元件的影響可以由圖中看出顏色的改變較少漸層。這顯示對於穿透光相位的調變較為均勻。

第五章 結論與未來展望

於不同波段的使用上，可以對光源達到雷射光束內均勻相位調變和高穿透是我們想讓元件具備的能力。本文對於 liquid crystal spatial modulator 在脈衝雷射下的使用，做了深入元件材料與操作上的探討。

目前最符合使用上的需求是以基板: fused silica，驅動電壓的導電薄膜: Nanorod ITO 和 TiW，配向薄膜: MAP 或 Fe_2O_3 ，液晶: PCH5 為。上述也就是目前可以達成高穿透與光相位調變功能的 LC-SLM 元件材料。

目前元件最高於紅外光部份 $2.4\mu m$ 可以達到 80%，1203~401nm 波長範圍可以達到 85%以上，紫外光部份 344nm 達到 78%而 301nm 達到 60%左右的穿透率。當此元件達到更高的穿透率，更可以避免能量的 loss。雖然在紫外光的使用上，目前還無法於較低波長紫外光波長脈衝雷射下使用。但是 355nm 波段雷射使用上的測試我們初步發現在光的 Intensity 夠低的條件下，可達到長時間元件的使用。

因可以成功製作出從 2406~355nm 波段使用的 LC-SLM。對阿秒雷射系統裡，所產生橫跨 4 個八度音階寬的 sideband 中，從前的原始 LC-SLM 材料只達到 1203~401nm 波段範圍的調變。由目前的研究可將其使用範圍推進到 2406~355nm 波段的使用。對於實際 Raman sideband 於紫外波段的 344 和 301nm 的調變目前還在嘗試。如果成功可以將最終合成的 pulse width 做大幅度的縮小。

近年已經有某些研究團隊達到對於短波長波段的調變[26]。而可以各波段使用的液晶空間相位調變器，於阿秒雷射領域中以成為非常迫切的需求。這也使得我們更有動機對於此元件中的材料作深入的探討。對於紫外光源下，元件操作產生的問題，目前的研判是由於材料化學變化所造成。故想改善這個問題，對於 LC-SLM 的研究領域不該侷限只有光電背景的人才，更需要結合化學材料領域的人才，以進一步有能力改善這領域研究，所遇到的問題。

參考文獻

- [1] C. K. Wang, S. J. Chang, Y. K. Su, Senior Member, IEEE, Y. Z. Chiou, S. C. Chen, C. S. Chang, T. K. Lin, H. L. Liu, C. K. Wang, S. J. Chang, Y. K. Su, Seand J. J. Tang “GaN MSM UV Photodetectors With Titanium Tungsten Transparent Electrodes” IEEE Tran. Electron. Dev., Vol. 53, No. 1, pp. 38-42 (January 2006).
- [2] Linli Su, John L. West, "Infrared Electro-Optic Properties of Liquid Crystals", Technical Reports of Alcom Symposium, Volume XI, P205-211, Optical Beam Steering. June 29-30 (2000).
- [3] M. Y. Shverdin, D. R. Walker, D. D. Yavuz, G. Y. Yin, and S. E. Harris, “Generation of a Single-Cycle Optical Pulse,” Phys. Rev. Lett. 94, 033904 (2005).
- [4] Wei-Jan Chen, Zhi-Ming Hsieh, Shu Wei Huang, Hao-Yu Su, Chien-Jen Lai, Tsung-Ta Tang, Chuan-Hsien Lin, Chao-Kuei Lee, Ru-Pin Pan, Ci-Ling Pan, and A. H. Kung, “Sub-Single-Cycle Optical Pulse Train with Constant Carrier Envelope Phase”, Phys. Rev. Lett. 100, 163906 (2008).
- [5] A. V. Sokolov, D. R. Walker, D. D. Yavuz, G. Y. Yin, and S. E. Harris, “Raman Generation by Phased and Antiphased Molecular States, ” Phys. Rev. Lett. 85, 562 (2000).
- [6] J. Q. Liang, M. Katsuragawa, Fam Le Kien, and K. Hakuta”, Sideband Generation Using Strongly Driven Raman Coherence in Solid Hydrogen,” Phys. Rev. Lett. 85, 2474 (2000).
- [7] Takayuki Suzuki, Masataka Hirai, and Masayuki Katsuragawa, “Octave-Spanning Raman Comb with Carrier Envelope Offset Control,” Phys. Rev. Lett. 101, 243602 (2008).
- [8] Shu Wei Huang, Wei-Jan Chen, and A. H. Kung, “Vibrational Molecular Modulation in Hydrogen,” Phys. Rev. A 74, 063825 (2006).
- [9] J. H. Sun, B. J. S. Gale, and D. T. Reid, “Composite frequency comb spanning 0.4–2.4 μm from a phase-controlled femtosecond Ti:sapphire laser and synchronously pumped optical parametric oscillator,” Opt. Lett. 32, 1414 (2007).
- [10] Hainian Han, Yanying Zhao, Qing Zhang, Hao Teng, Zhiyi Wei, “Ultrabroad Frequency Comb Spanning 0.4~4.2 μm from a Ti:Sapphire Laser by Difference Frequency Technique,” paper CMY3, Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, MD, USA (Jun 1, 2009).
- [11] J. Herre, C. Guillén, ” Improved ITO thin films for photovoltaic applications with a thin ZnO layer by sputtering” , Thin Solid Films 451 –452, 630–633 (2004).

- [12] Ho-Chul Lee, O. Ok Park, "The evolution of the structural, electrical and optical properties in indium-tin-oxide thin film on glass substrate by DC reactive magnetron sputtering", *Vacuum* 80, 880–887 (2006).
- [13] M.J. Alam, D.C. Cameron, "Characterization of transparent conductive ITO thin films deposited on titanium dioxide film by a sol-gel process", *Surface and Coatings Technology* 142-144, 776-780 (2001).
- [14] Chi -Yen Huang, Wen -Yi Jhuang and Chia -Ting Hsieh, "Switching of polymer-stabilized vertical alignment liquid crystal cell" *Optics Express*, Vol. 16, Issue 6, pp. 3859-3864
- [15] Frederic J. Kahn, "Orientation of liquid crystals by surface coupling agents", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 22, No. 8 (15 April 1973).
- [16] 游宗宏, "Study of adjustable pretilt angle controlled with blending silanes coating on glass substrates of liquid crystal cells", 國立成功大學光電科學與工程研究所碩士論文(2007).
- [17] Praveen Chaudhari, James A. Lacey, Shui-Chih Alan Lieh, and James L. Speidell, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, L55 (1998).
- [18] A.M. Weiner, "Femtosecond Pulse Shaping using Spatial Light Modulators," *Rev. Sci. Instrum.* 71, 1929 (2000).
- [19] K. H. Yang, "Measurement of empty cell gap for liquid-crystal displays using interferometric methods", *J. Appl. Phys.* 64(9) (1 November 1988).
- [20] Ana R. E. Brás, Sara Henriques, Teresa Casimiro, Ana Aguiar-Ricardo, João Sotomayor, Jorge Caldeira, Celina Santos, Madalena Dionísio, "Characterization of a Nematic Mixture by Reversed-Phase HPLC and UV Spectroscopy: Application to Phase Behavior Studies in Liquid Crystal-CO₂ Systems", *Liquid Crystals*, 34 (5) 591-597 (2007).
- [21] Jun Li, Shin-Tson Wu, Stefano Brugioni, Riccardo Meucci, and Sandro Faetti, "Infrared refractive indices of liquid crystals", *J. Appl. Phys.* 97, 073501 (2005).
- [22] H. Yumoto, T. Sako, Y. Gotoh, K. Nishiyama, T. Kaneko, "Growth mechanism of vapor-liquid-solid (VLS) grown indium tin oxide (ITO) whiskers along the substrate", *Journal of Crystal Growth* 203, 136-140 (1999).
- [23] By Kenneth D. Harris, Andy C. van Popta, Jeremy C. Sit, Dirk J. Broer, and Michael J. Brett, "A Birefringent and Transparent Electrical Conductor", *Adv. Funct. Mater.* 18, 2147–2153 (2008).
- [24] Peichen Yu, Chia-Hua Chang, Ching-Hua Chiu, Chin-Sheng Yang, Jue-Chin Yu, Hao-Chung Kuo, Shih-Hsin Hsu, and Yia-Chung Chang, "Efficiency Enhancement of GaAs Photovoltaics Employing Anti-Reflective Indium-Tin-Oxide Nano-Columns", accepted for publication in *Advanced Materials* (November, 2008).

- [25] Anna M., Lackner, J. David Margerum, and Camille Van Ast, “Near Ultraviolet Photostability of Liquid Crystal Mixtures”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 141, pp. 289-310 (1986).
- [26] Kouji Hazu, Taro Sekikawa, and Mikio Yamashita, “Spatial light modulator with an over-two-octavebandwidth from ultraviolet to near infrared”, *Opt. Lett.* Vol. 32, No. 22 (2007).

