

國立交通大學

電子物理系碩士班

碩士論文

摩刷配向與紫外光配向之聚亞醯胺薄膜其相位延遲研究

及與表面定向強度之關係

Phase Retardation of Rubbed and Photoilluminated Polyimide

Films and Its Relationship with Anchoring Strength

研究生:張佳瑩

指導教授:趙如蘋 老師

中華民國九十五年七月

摩刷配向與紫外光配向之聚亞醯胺薄膜
其相位延遲研究及與表面定向強度之關係

Phase Retardation of Rubbed and Photoilluminated
Polyimide Films and Its Relationship with Anchoring
Strength

研究生：張佳瑩

Student : Chia-Ying Chang

指導教授：趙如蘋 博士

Advisor: Dr. Ru-Pin Chao Pan



A Thesis
Submitted to Department of Electrophysics
College of Science
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in
Electrophysics July 2006
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年

摩刷配向與紫外光配向之聚亞醯胺薄膜其 相位延遲研究及與表面定向強度之關係

研究生：張佳瑩

指導教授：趙如蘋 博士

國立交通大學電子物理系碩士班

摘 要



液晶配向膜與液晶顯示器中的參數如定向強度有著密不可分的關係。因此配向膜特性的了解在液晶顯示器參數的研究上有很大的幫助。聚亞醯胺薄膜在經過摩刷配向以及紫外光照射配向之後，薄膜分子會產生異方性。分子的異方性便會使光的相位產生延遲。

在本論文之工作中改變各種不同配向條件，觀察配向膜的相位延遲變化。薩納曼特橢圓儀是一個可以精準量測相位延遲的方法，我們利用此橢圓儀來量測我們配向膜的相位延遲。此外我們對於液晶表面定向強度與配向膜的相位延遲的關係做討論，驗證只有配向膜表面分子的異方性對於液晶表面定向強度有影響。我們亦將薩納曼特橢圓儀應用在量測液晶盒的相位延遲中。

Phase Retardation of Rubbed and Photoilluminated Polyimide Films and Its Relationship with Anchoring Strength

Student : Chia-Ying Chang

Advisor : Dr. Ru-Pin Pan

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

ABSTRACT

There are relationship between liquid crystal alignment films and the parameters of liquid crystal display. Therefore the well know of liquid crystal alignment films support studies of the parameter of liquid crystal display. After rubbing or photo-irradiation, the molecular of polyimide alignment films will be aligned and have optical anisotropy. Optical retardation of polyimide films are then induced.

We change the conditions of alignment process and measure the induced optical retardation. A sensitive method for measuring optical retardation, the Senarmont Ellipsometry, is used to determine the optical retardation of our alignment films. Then we discuss the relationship between the optical retardation of alignment films and anchoring strength to the liquid crystal. Our results show that only the optical anisotropy of surface molecule in polyimide films effects the anchoring strength of liquid crystal. In addition, we use the Senarmont Ellipsometry to measure the optical retardation of liquid crystal cell.

誌 謝

第一次離開我所熟悉的台中，到外地新竹來唸書。在新竹我遇到許多幫助我的人，首先是我的指導老師：趙如蘋老師。趙老師十分關心我，當我出車禍的時候關心我的傷勢；當我研究遇到瓶頸時細心指導我；教我許多在液晶領域上的知識，引發我對液晶的興趣！在新竹可以遇到如此好的老師讓我覺得很幸運。

此外，在我論文的研究中，我要感謝一路帶我成長的宗達學長！當我接下這個題目時，總是細心的告訴我許多背景知識，在我遇到困難時會提供許多解決方法讓我嘗試，而系統架設時效正的問題，宗達學長也是陪著我一起思考一起解決問題。除了研究之外，宗達學長也教會了我團體相處上以及處理事物的態度。宗達學長謝謝你！

此外我也要感謝實驗室的學長們：雅峰、信穎、家任、宇泰、卓帆。謝謝你們在實驗上給我的指導，以及教會我的人生态度。還有要感謝實驗室的學弟妹：誌佑、政穎、俊賢、玉倩、逸君。實驗室因為有你們多了許多歡笑！我還要感謝我在交大認識的好朋友：乃今、嘉琪，我最喜歡跟你們聊天了！以及我的心靈醫生：劉醫生，謝謝你！

在研究之外，我要感謝在舞團認識的朋友：阿貴、瓊黛姐、金玉姐、多多姐、雅芳姐、阿明哥。很高興我有參加這個舞團，因為你們使我的生活更精彩豐富，謝謝你們教會我的事情！我愛你們！

我還要感謝我大學的好朋友：玉山跟曉雯，玉山真的是我這輩子最好的朋友，曉雯是最了解我的人！感謝你們在我痛苦的時候都陪伴著我！謝謝你們！

最後我要感謝我的爸爸、媽媽、明淵、峻瑋，很抱歉我總是很少時間回家陪伴你們，但是當我回家時你們總是會給我最大的關心，謝謝你們，我所愛的家人！

佳瑩

目 錄

中文摘要	.....	I
英文摘要	.....	II
誌謝	.....	III
目錄	.....	IV
圖目錄	.....	VI
一、緒論	.....	1
二、實驗原理	.....	5
2-1 光的橢圓偏極態理論及表示法	.....	5
2-2 史托克參數及穆勒矩陣	.....	9
2-3 薩納曼特橢圓儀(Senarmont Ellipsometry)	.....	13
2-3-1 薩納曼特橢圓儀(Senarmont Ellipsometry)系統	.....	13
2-3-2 四分之一波板(Quarter Waveplate)	.....	16
2-4 摩刷配向原理	.....	19
2-5 摩刷強度(Rubbing Strength)原理	.....	20
2-6 光配向原理及照光步驟	.....	21
2-7 表面定向強度(Anchoring Strength)量測原理	.....	25
三、實驗方法與量測系統介紹	.....	28
3-1 薩納曼特橢圓儀系統架設與校正	.....	29
3-2 樣品製作	.....	31
四、實驗結果與討論	.....	37
4-1 系統內稟向位差	.....	37
4-2 玻璃基板量測	.....	38
4-3 摩刷配向膜之相位延遲	.....	38

4-3-1	摩刷強度之影響.....	38
4-3-2	配向膜厚度之影響.....	43
4-4	光配向膜之相位延遲與照光時間之關係.....	45
4-5	定向強度與相位延遲之關係.....	53
4-6	薩納曼特橢圓儀在液晶樣品上之應用.....	56
4-7	綜合討論.....	58
五、	結論與未來展望.....	60
參考文獻	.....	61
附錄 A	四分之一波板(Quarter Waveplate)相位延遲檢測.....	63
附錄 B	四分之一波板(Quarter Waveplate)相位延遲表現.....	64



圖 表 目 錄

圖 2-1	橫向傳播光場	5
圖 2-2	橢圓偏振光	7
圖 2-3	線性偏振光	7
圖 2-4	圓偏振光	7
圖 2-5	橢圓偏振光	7
表 2-1	常引用的光偏振態	10
圖 2-6	薩納曼特橢圓儀(Senarmont Ellipsometry)系統	13
圖 2-7	四分之一波板偏振轉換	17
圖 2-8	線偏振光經過四分之一波板後的偏振態	17
圖 2-9	聚亞醯胺(polyimide)內部結構	19
圖 2-10	摩刷機台結構	20
圖 2-11	聚合物經過紫外光照射形成 Cross-Linking	22
圖 2-12	光配向劑形成 cis-trans 示意圖	22
圖 2-13	預傾角簡併(pretilt angle degeneracy)示意圖	23
圖 2-14	消除預傾角簡併現象	24
圖 2-15	偏極片、檢偏片與液晶元件間的關係	25
圖 3-1	摩刷機台下壓深度示意圖	33
圖 3-2	顯微鏡觀察下的絨毛	33

圖 3-3	照光示意圖	34
圖 3-4	厚度量測系統	35
圖 3-5	表面定向強度量測裝置示意圖	35
圖 4-1	系統訊號量測圖	37
圖 4-2	摩刷機台下壓深度與配向膜(SE-130B)之相位延遲圖	38
圖 4-3	摩刷機台下壓深度與配向膜(SE-130B)淨相位增加值圖	40
圖 4-4	不同下壓深度之摩刷強度參數(Rubbing Strength Parameter)與配向膜(SE-130B)相位延遲圖	40
圖 4-5	增加摩刷次數與配向膜(SE-130B)之相位延遲圖	40
圖 4-6	增加摩刷次數之摩刷強度參數(Rubbing Strength Parameter)與配向膜(SE-130B)之相位延遲圖	41
圖 4-7	摩刷強度參數(Rubbing Strength Parameter)與配向膜 (SE-130B)之相位延遲圖	42
表 4-1	旋轉塗佈機轉速 2000rpm 以及 4000rpm 量測之膜厚度	43
圖 4-8	旋轉塗佈機轉速與配向膜(SE-130B)相位延遲圖	43
圖 4-9	旋轉塗佈機轉速與配向膜(RN-1349)相位延遲圖	44
圖 4-10	旋轉塗佈機轉速 4000rpm 之配向膜(RN-1349)在增加照光 能量下與相位延遲之關係	45
圖 4-11	旋轉塗佈機轉速 2000rpm 之配向膜(RN-1349)在增加照光	46

	能量下與相位延遲之關係	
圖 4-12	旋轉塗佈機轉速 1000rpm 之配向膜(RN-1349)在增加照光 能量下與相位延遲之關係	47
圖 4-13	不同旋轉塗佈機轉速之配向膜(RN-1349)在增加照光能量 下與相位延遲之關係	48
圖 4-14	旋轉塗佈機轉速 4000rpm 之配向膜(RN-1349)在有無消除簡 併照光情況下與相位延遲之關係	49
圖 4-15	旋轉塗佈機轉速 2000rpm 之配向膜(RN-1349)在有無消除簡 併照光情況下與相位延遲之關係	50
圖 4-16	旋轉塗佈機轉速 1000rpm 之配向膜(RN-1349)在有無消除簡 併照光情況下與相位延遲之關係	50
圖 4-17	不同旋轉塗佈機轉速之配向膜(RN-1349)在無消除簡併照光 情況下與相位延遲之關係	51
圖 4-18	在相同照光能量下旋轉塗佈機轉速之配向膜(SE-130B)與其 相位延遲圖之關係	52
圖 4-19	不同滾筒下壓深度與配向膜(SE-130B)定向強度之關係	53
圖 4-20	不同照光能量與配向膜(RN-1349)定向強度之關係	54
圖 4-21	相位延遲與定向強度之關係	55
圖 4-22	有配向的液晶樣品其相位延遲隨著照光能量增加的變化	56

圖 4-23	無配向的液晶樣品其相位延遲隨著照光能量增加的變化	57
圖 5-1	四分之一波板裝置檢測圖	62
圖 5-2	理論之四分之一波板擺設不同相差角度之下檢偏器旋轉角度與光強度之關係	63
圖 5-3	理論之四分之一波板擺設不同相差角度之下檢偏器旋轉角度與光強度之關係	63
圖 5-4	理論上四分之一波板不同相位延遲所造成的光強度低點偏移現象	64
圖 5-5	不同相位延遲下檢偏器旋轉角度、四分之一波板主軸擺放偏移角度及光強度變化之關係	65



第一章 緒論

1888年，奧地利的植物學家F. Reinitzer發現膽固醇苯脂（Cholesteryl Benzoate， $C_6H_5CO_2C_{27}H_{45}$ ）在 $145.5^{\circ}C$ 時為固體，隨著溫度的上升會轉變成白濁狀的液體直到 $178.5^{\circ}C$ 才轉變成清澈的液體，並且觀察到許多顏色的光譜圖案。1889年，德國的物理學家O. Lehmann以偏光顯微鏡發現膽固醇苯脂具有異方性（anisotropy）晶體所特有的雙折射（birefringence）性質。我們稱具有此一特性的材料為液態晶體（liquid crystals），簡稱「液晶」。

1970年後液晶領域快速的發展，許多液晶的物理與化學性質也慢慢的被人們所瞭解，也因此許多利用液晶做為材料的產品也大量出現在市場上，其中最大的一部份就是「液晶顯示器」。液晶顯示器從最早的靜態顯示（如：電子計算機，電子錶等）到後來的動態顯示（如：電腦液晶螢幕，PDA 螢幕，液晶電視），許多影響顯示效能的參數，如：定向強度（Anchoring strength）、預傾角（pretilt angle）、反應時間（response time）都不斷的被研究改進，以期能夠達到更好的顯示效能。而這些參數往往與液晶顯示器當中的配向膜有密不可分的關係，所以配向膜技術之改進與創新也為一研究重心。

目前已有許多的配向技術，如：在聚亞醯胺（PI：Polyimide）上摩刷配向（Rubbing alignment）法[1]、傾斜蒸著氧化矽法、離子束傾斜轟擊法、以線偏極紫外光（UV light）去照射有感光基的配向劑[2]等等。在這麼多的配向技術中最廣為使用的是摩刷配向（Rubbing alignment）法。摩刷配向法可以提供液晶分子較強的配向能力，但是在摩刷的過程中，由於是利用絨布接觸式的摩擦，因此會產生靜電和顆粒的污染，而這些污染往往直接造成液晶元件的損壞。因此不論是學界、業界都在不

斷的研發改進非接觸式的配向方式，除了可以避免靜電和顆粒的污染，也可以比較容易控制液晶分子的預傾角。其中最被大家所熟知的非接觸式配向方法為以線偏極紫外光去照射有感光基的配向劑，我們稱為紫外光配向法，簡稱「光配向」。

光配向法是利用線性偏極的紫外光照射在具有感光基的高分子聚合物配向膜上，使得高分子聚合物具有配向能力。一般光配向的配向劑可以分為兩大類：第一類為配向膜被照射到線性偏極紫外光後，在偏極方向上的分子會鍵結成為長鏈的分子，使得配向膜具有異方性（anisotropy）的分佈，液晶分子就順著長鏈分子方向排列；第二類為配向膜照光後，在偏極方向上的長鏈分子會被紫外光所破壞，使配向膜產生非等向性的分佈，液晶分子就會順著未被破壞的長鏈分子方向排列。

光波具有很多特性，包括光的波長、光的強度、光的同調性以及光的偏振性。偏振性的研究，最早是始於丹麥科學家 Bartholinus 於 1669 年發現光在方解時晶體中的雙折射現象；1690 年德國科學家 Huygens 發現光之偏振現象；1852 年 Stokes 利用四個參數 Stokes polarization parameters 來描述光的偏振態，即 Stokes vector；1940 年初，Mueller 以 Stokes vector 為基礎發展一套數學，用以表示偏振光與偏光元件之關係，即為 Mueller matrix calculus；約同時，Jones 發展出較簡單但只能運算純偏振光的運算法，即為 Jones matrix calculus。至此偏光理論趨於成熟[3]。20 世紀初期因為鍍膜技術的需求，光的偏振性才比較受到重視並受到更廣泛的研究以及應用。利用已知偏振態的偏振光入射一待測物，經由量測找出偏振態變化，可以計算出待測物的光學性質，此方法稱為橢圓偏光術(Ellipsometry)。

應用橢圓偏光術設計發展的儀器則稱為橢圓儀 (Ellipsometer)，橢

圓儀中的主要光學元件有：起偏器 (polarizer)、補波片(compensator)、待測物 (sample) 以及檢偏器 (analyzer)。補波片通常為四分之一波板，功能在於補償起偏器，而確定入設於檢偏器之前的光為線性偏振光，進而能由檢偏器產生歸零作用。橢圓偏光儀依照量測方法可分為三種：歸零式橢圓儀 (null ellipsometer)、偏光調變式橢圓儀 (polarization modulation ellipsometer)、旋轉析光片式橢圓儀 (rotating analyzer ellipsometer)。其中歸零式橢圓儀的設備簡單，系統性誤差檢測容易，可以降到最低。

在配向技術中，不管是摩刷配向或是光配向，皆會使配向膜上分子產生異方性的分佈。異方性的分佈在光學上所產生的現象便是使光產生相位延遲。因此可以利用橢圓儀的技術來測得配向膜所產生的相位延遲。配向膜分子在經過摩刷配向之後，其光軸會平行於平均摩刷方向。當大部分的分子配向之後，光學異方性(optical anisotropy)會變大[4]。然而對於摩刷配向而言，只有接近配向膜表面的分子才會因絨布摩刷而重新排列，所以產生的相位延遲會非常小[5]。而對於光配向，雖然紫外光照射配向膜是屬於深層的配向反應，所產生的相位延遲會比摩刷配向的相位延遲大，但終究還是在 0.6nm 左右[6]。而在本實驗中所架設的系統為薩納曼特橢圓儀(Senarmont Ellipsometer)，為可以精準的量測相位延遲的系統。其基本的架構為：偏振片(Polarizer)、樣品(Sample)、四分之一波板(Quarter Waveplate)、檢偏片(Analyzer)。

在本論文中主要量測不同配向條件配向膜的相位延遲。我們使用了兩種配向方法：摩刷配向及光配向。對於摩刷配向的樣品，我們量測了不同摩刷強度引起的相位延遲；以及改變配向膜的厚度，利用同樣的摩刷條件，探討厚度對於摩刷配向的影響。在光配向的部分我們改變照光時間以及不同的照光步驟，量測其所引起的相位延遲。其中我們也使用

了兩種配向劑：SE-130B 及 RN-1349，同時進行摩刷配向以及光配向的實驗。另外我們也討論相位延遲與液晶配向參數中的表面定向強度之關係，也將薩納曼特橢圓儀應用在量測液晶樣品相位延遲上。在未來希望將薩納曼特橢圓儀系統改進成為可以及時量測樣品相位延遲的系統，找到在配向過程中能形成較好配向的條件。



第二章 基本原理

2.1 光的橢圓偏極態理論及表示法[3][7]

光波實質上就是電磁波，通常用來描述電磁波要使用到四個基本的場向量：分別是電場強度 \vec{E} 、電位移密度 \vec{D} 、磁場強度 \vec{H} 、磁通量密度 \vec{B} 。而我們通常用光波電場的時變分布來代表光波的偏振態。

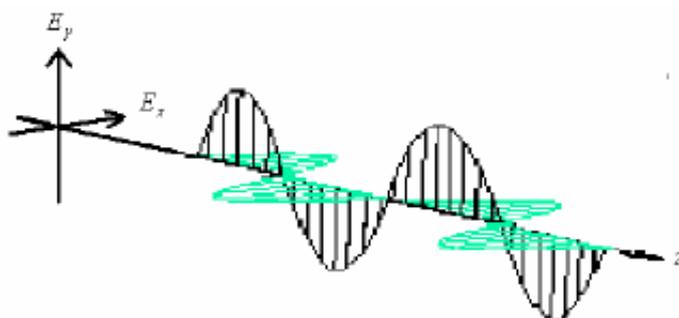


圖 2-1 橫向傳播光場

假設有光波沿著 z 軸方向前進，則電場的振動方向就會落在 x - y 平面。如圖 2-1：電場可以表示為

$$\vec{E}(z,t) = E_x(z,t)\hat{i} + E_y(z,t)\hat{j} \quad (2-1)$$

其中

$$\begin{cases} E_x(z,t) = E_{0x} \cos(\kappa z - \omega t + \delta_x) \\ E_y(z,t) = E_{0y} \cos(\kappa z - \omega t + \delta_y) \end{cases} \quad (2-2a)$$

$$(2-2b)$$

κ : 波數(wave number)

ω : 角頻率(angular frequency)

δ_x 、 δ_y : x 及 y 方向的電場相位(phase)

將(2-2a)及(2-2b)利用三角函數展開：

$$\frac{E_x(z,t)}{E_{0x}} = \cos(\kappa z - \omega t) \cos(\delta_x) - \sin(\kappa z - \omega t) \sin(\delta_x) \quad (2-3a)$$

$$\frac{E_y(z,t)}{E_{oy}} = \cos(\kappa z - \omega t) \cos(\delta_y) - \sin(\kappa z - \omega t) \sin(\delta_y) \quad (2-3b)$$

將(2-3a)與(2-3b)合併計算可得：

$$\frac{E_x(z,t)}{E_{ox}} \sin(\delta_y) - \frac{E_y(z,t)}{E_{oy}} \sin(\delta_x) = \cos(\kappa z - \omega t) \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (2-4a)$$

$$\frac{E_x(z,t)}{E_{ox}} \cos(\delta_y) - \frac{E_y(z,t)}{E_{oy}} \sin(\delta_x) = \sin(\kappa z - \omega t) \cos(\delta_y - \delta_x) \quad (2-4b)$$

將(2-4a)及(2-4b)合併，可以得到一個與空間相位和時間無關的方程式

(2-5)：

$$\left(\frac{E_x(z,t)}{E_{ox}}\right)^2 + \left(\frac{E_y(z,t)}{E_{oy}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x(z,t)}{E_{ox}}\right)\left(\frac{E_y(z,t)}{E_{oy}}\right)\cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (2-5)$$

$$\delta = \delta_y - \delta_x \quad (2-6)$$

公式(2-6)為 x 方向與 y 方向電場的相位差。方程式(2-5)為一橢圓方程式的通式，也就是說任何時間電場的傳播軌跡為橢圓形。一般來說，橢圓的長軸與短軸不是在 x 軸及 y 軸上，所以我們可以利用座標轉換將橢圓的長軸與短軸轉一個角度 θ ，使得方程式(2-5)可以轉換成標準的橢圓方程式(2-7)。

$$\left(\frac{E'_x}{a}\right)^2 + \left(\frac{E'_y}{b}\right)^2 = 1 \quad (2-7)$$

$$E'_x = E_x \cos(\theta) + E_y \sin(\theta) \quad (2-8a)$$

$$E'_y = -E_x \sin(\theta) + E_y \cos(\theta) \quad (2-8b)$$

$$a^2 = E_{ox}^2 \cos^2(\theta) + E_{oy}^2 \sin^2(\theta) + 2E_{ox}E_{oy} \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\delta) \quad (2-8c)$$

$$b^2 = E_{ox}^2 \sin^2(\theta) + E_{oy}^2 \cos^2(\theta) - 2E_{ox}E_{oy} \sin(\theta) \cos(\theta) \cos(\delta) \quad (2-8b)$$

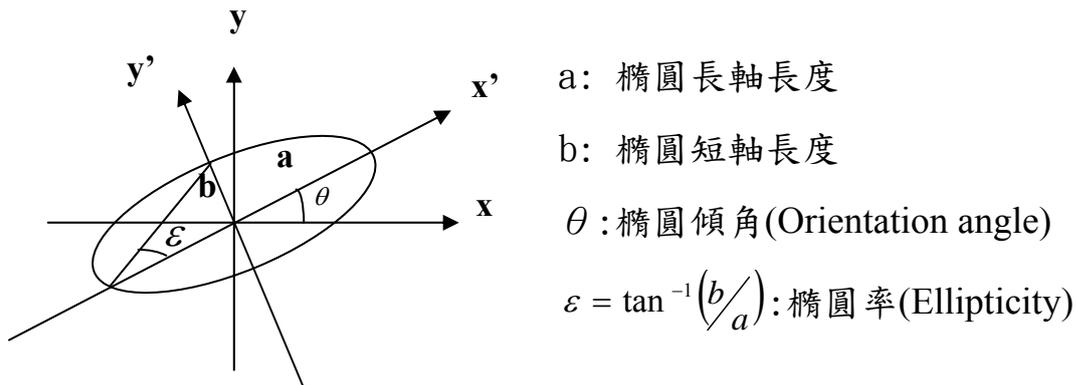


圖 2-2 橢圓偏振光

由方程式(2-7)得知電場在時間與空間上的傳播軌跡構成一橢圓形，故稱之為光波的橢圓偏振態。控制電場在 x 軸與 y 軸分量的相位差或振幅比，即可改變光波的橢圓偏振態。

- (1) 當 $\delta = 0$ 或 $\delta = \pm\pi$ ，電場沿固定方向振動，稱之為線偏振光。(圖 2-3)
- (2) 當 $\delta = \frac{\pi}{2}$ ，並且 x 分量與 y 分量的振幅相等時，稱之為圓偏振光。(圖 2-4)
- (3) 當 $\delta \neq 0$ 且 $\delta \neq \pi$ 時，電場之振動方向投影在 x - y 平面上為橢圓，故稱之為橢圓偏振光。(圖 2-5)

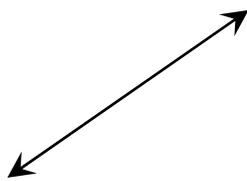


圖 2-3 線性偏振光

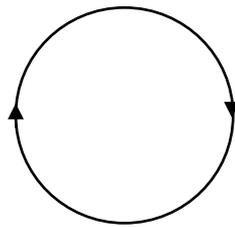


圖 2-4 圓偏振光

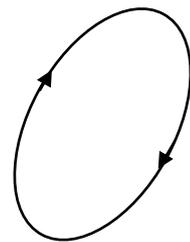


圖 2-5 橢圓偏振光

為了方便描述光波的偏振態，通常利用 2×1 階矩陣來代表電場在 x 方向與 y 方向上的分量，並利用數學上常用的向史(Phasor)來表示以方便做數學運算，這樣的數學表示方式稱為瓊斯向量(Jones vector)。

$$|E\rangle = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{ox} e^{i\delta_x} \\ E_{oy} e^{i\delta_y} \end{bmatrix} e^{i(\kappa z - \omega t)} \quad (2-9)$$

一般而言，瓊斯向量只能用來表示純偏振光(pure polarized light)，並不能用來表示非偏振光(unpolarized light)或部分偏振光(partially polarized light)。但是光波大部分為部分偏振光，故需使用史托克參數(Stokes Parameter)來表示，且史托克參數在光強度的運算方面較瓊斯矩陣方便。



2.2 史托克參數(Stokes Parameters)和穆勒矩陣(Mueller Matrix)[3][7]

在光為線偏振態的前提下，史托克參數與瓊斯向量有以下的關係式：

$$S_0 = E_x E_x^* + E_y E_y^* = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (2-10a)$$

$$S_1 = E_x E_x^* - E_y E_y^* = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (2-10b)$$

$$S_2 = E_x E_y^* + E_y E_x^* = 2E_{0x} E_{0y} \cos(\delta) \quad (2-10c)$$

$$S_3 = E_x E_y^* - E_y E_x^* = 2E_{0x} E_{0y} \sin(\delta) \quad (2-10d)$$

其中 $\delta = \delta_y - \delta_x$ ，且 $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ 。 S_0 代表光的總強度，即光偵測器可量到的光強度訊號。 S_1 代表線性水平方向或垂直方向的偏振光分量， S_2 代表線性 $\pm 45^\circ$ 方向的偏振光分量，另外 S_3 代表左旋或右旋偏振光的分量。此外值得注意的是這四個參數皆為實數。

我們通常將史托克參數以一個 4×1 階的矩陣來表示，稱為史托克向量(Stokes Vector)。

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

而利用這四個參數可以定義出用來分辨光偏振程度的參數，即偏振度(2-12)(degree of polarization)

$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad P = \begin{cases} 1 & \text{pure polarized} \\ 0 & \text{unpolarized} \\ 0 < P < 1 & \text{partially polarized} \end{cases} \quad (2-12)$$

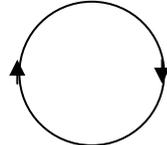
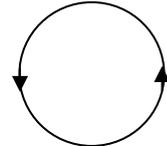
	Jones vector	Stokes parameter	圖示
X 方向線偏振	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Y 方向線偏振	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
正 45 度方向線偏振	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	
負 45 度方向線偏振	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	
右旋偏振光	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	
左旋偏振光	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$	

表 2-1 常引用的光偏振態

穆勒矩陣(Mueller Matrix)是一個 4×4 階的矩陣，用來表示光學元件的傳導矩陣，主要架構建立在史托克參數上面。當一入射光入射光學元件時，元件本身帶有的光學特性會改變光的偏振狀態，出射光的史托克參數會與入射光的史托克參數存在一個線性的關係，如(2-13)式：

$$\begin{aligned}
S'_0 &= m_{11}S_0 + m_{12}S_1 + m_{13}S_2 + m_{14}S_3 \\
S'_1 &= m_{21}S_0 + m_{22}S_1 + m_{23}S_2 + m_{24}S_3 \\
S'_2 &= m_{31}S_0 + m_{32}S_1 + m_{33}S_2 + m_{34}S_3 \\
S'_3 &= m_{41}S_0 + m_{42}S_1 + m_{43}S_2 + m_{44}S_3
\end{aligned} \tag{2-13}$$

我們用一個 4×4 階的矩陣 (M) 來結合入射史托克向量 (S) 與出射光史托克向量 (S') 來描述這個線性關係。

$$S' = M \cdot S \Rightarrow \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \tag{2-14}$$

其中矩陣 (M) 稱為元件的穆勒矩陣。

以下是常用的穆勒矩陣：

(1) 旋轉矩陣(假設旋轉角度 C)

$$M_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2C & \sin 2C & 0 \\ 0 & -\sin 2C & \cos 2C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2-15}$$

(2) 偏振片矩陣(穿透軸方位角 P)

$$\begin{aligned}
&M_{\text{polarizer}}(P) \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2P & -\sin 2P & 0 \\ 0 & \sin 2P & \cos 2P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2P & \sin 2P & 0 \\ 0 & -\sin 2P & \cos 2P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&\Rightarrow M_{\text{polarizer}}(P) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2P & \sin 2P & 0 \\ \cos 2P & \cos^2 2P & \sin 2P \cos 2P & 0 \\ \sin 2P & \sin 2P \cos 2P & \sin^2 2P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2-16}
\end{aligned}$$

(3) 線性延遲片(光軸方位角 ϕ , 相位延遲 Δ)

$$M_{retarder}(\phi, \Delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\phi + \cos \Delta \sin^2 2\phi & (1 - \cos \Delta) \sin 2\phi \cos 2\phi & \sin \Delta \sin^2 2\phi \\ 0 & (1 - \cos \Delta) \sin 2\phi \cos 2\phi & \sin^2 2\phi + \cos \Delta \cos^2 2\phi & -\sin \Delta \cos^2 2\phi \\ 0 & -\sin \Delta \sin^2 2\phi & \sin \Delta \cos^2 2\phi & \cos \Delta \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

當光路徑中有數個偏光元件，則出射光的史托克向量可寫成方程式

(2-18):

$$S_{out} = M_n \cdots M_3 \cdot M_2 \cdot M_1 \cdot S_{in} \quad (2-18)$$

其中 S_{out} 為出射光的史托克向量， S_{in} 為入射光的史托克向量，而 M_1 ， M_2 ， M_3 各為相對應的偏光元件之穆勒矩陣。



2.3 薩納曼特橢圓儀(Senarmont Ellipsometry)

2-3-1 薩納曼特橢圓儀(Senarmont Ellipsometry)系統

薩納曼特橢圓儀[5]的構造如圖 2-6。

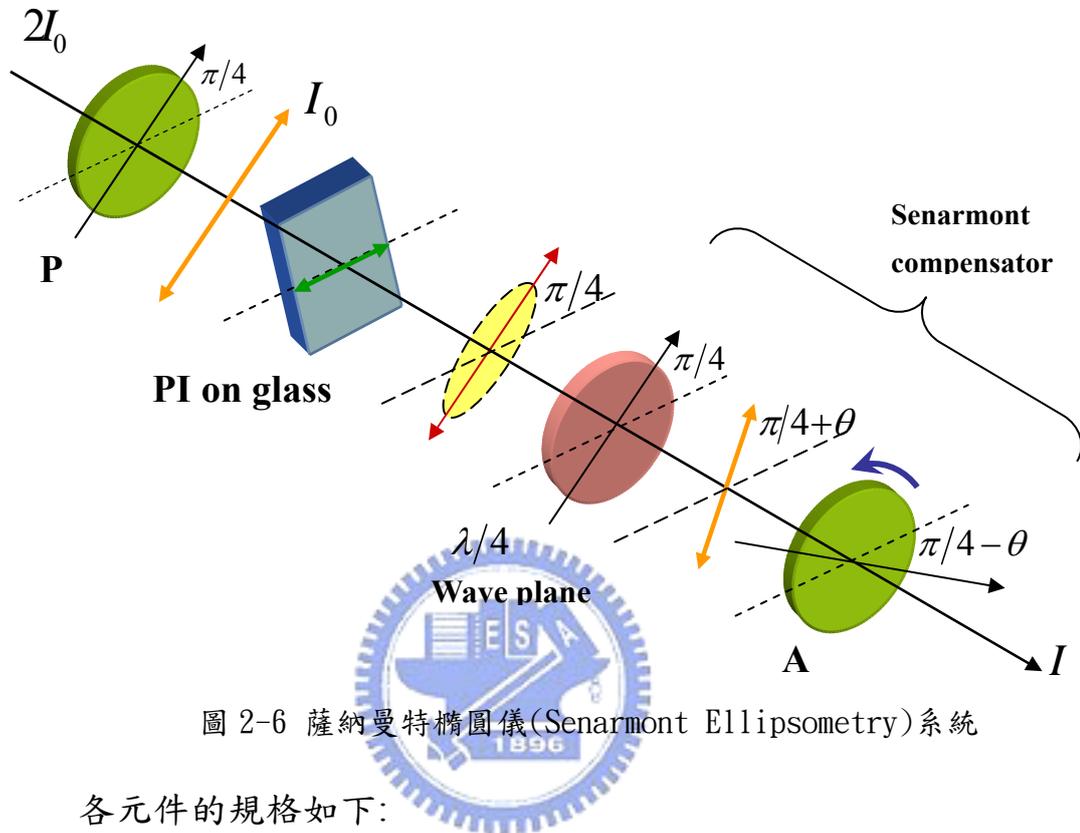


圖 2-6 薩納曼特橢圓儀(Senarmont Ellipsometry)系統

各元件的規格如下：

雷射光源: He-Ne Laser 5mW

起偏器及檢偏器: Glan-Thompson Polarizer

四分之一波板: Lattice Electro Optics

Multiple Order Quarter Waveplate

以上的各個元件皆可對應的穆勒矩陣，利用矩陣運算可以得到出射光的史托克參數，其中 I_0 為通過第一片偏振片的光強度：

$$S_{out} = M_{analyzer} \cdot M_{waveplate} \cdot M_{sample} \cdot M_{polarizer} \cdot S_{in} \quad (2-19)$$

其中

$$S_{in} = \begin{bmatrix} 2I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

$$M_{polarizer}(p) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2P & \sin 2P & 0 \\ \cos 2P & \cos^2 2P & \sin 2P \cos 2P & 0 \\ \sin 2P & \sin 2P \cos 2P & \sin^2 2P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

$$M_{quarter}\left(\phi, \frac{\pi}{2}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\phi & \sin 2\phi \cos 2\phi & \sin 2\phi \\ 0 & \sin 2\phi \cos 2\phi & \sin^2 2\phi & -\cos 2\phi \\ 0 & -\sin 2\phi & \cos 2\phi & 0 \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

$$M_{sample}(0, \Gamma_s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Gamma_s) & 0 & \sin(\Gamma_s) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin(\Gamma_s) & 0 & \cos(\Gamma_s) \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

我們將檢偏器與起偏器光軸相互垂直開始旋轉，故其穆勒矩陣則寫為：

$$M_{analyzer} = \begin{bmatrix} 1 & -\cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ -\cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & -\cos(2\theta)\sin(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta)\sin(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

利用方程式(2-19)可以計算出薩納曼特橢圓儀出射光的史托克參數：

$$M_{analyzer} = \begin{bmatrix} 1 & -\cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ -\cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & -\cos(2\theta)\sin(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta)\sin(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

$$S_{out} = \begin{bmatrix} I_0 \sin^2\left(\frac{\Gamma_s}{2} + \theta\right) \\ -\cos(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Gamma_s}{2} + \theta\right) \\ \sin(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Gamma_s}{2} + \theta\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

所以我們可以知道此系統的出射光強度為方程式(2-26)：

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\Gamma_s}{2} + \theta\right) \quad (2-26)$$

Γ_s :樣品的相位延遲

θ :檢偏器所轉的角度

當出射光強度最弱時，我們可以得到方程式(2-27)。

$$\Gamma_s = -2\theta \quad (2-27)$$

因此樣品所產生的相位延遲可由檢偏器旋轉的角度來得到。此外樣品之相位延遲可表示成方程式(2-28)，則可以得出方程式(2-29)：

$$\Gamma = 2\pi \cdot \Delta n \cdot d / \lambda \quad (2-28)$$

$$\delta = \Delta n \cdot d = \left(-\frac{\lambda}{\pi}\right) \cdot \theta \quad (2-29)$$

因此我們可以利用薩納曼特橢圓儀來量測樣品的相位延遲 δ 。

2-3-2 四分之一波板(Quarter Waveplate)

波板(Waveplate)又稱做延遲片(Retardation Plate)或相位轉變器(Phase Shifter)。通常是利用具有雙折射(Birefringence)性的物質做成的，例如石英晶體(Crystal Quartz)、雲母晶體(Crystal Mica)。因為雙折射性使波板具有兩個相互垂直的主軸(Principle Axis)：快軸(Extraordinary Axis)與慢軸(Ordinary Axis)，這兩個主軸分別具有不一樣的折射係數。慢軸的折射係數較快軸的折射係數大。當光入射波板時均可被分成兩道平行於快軸與慢軸的光。平行於慢軸的光因為慢軸的折射率較快軸大，所以光走的比較慢。而平行於快軸的光因為快軸折射率較小，所以光走的比較快。當兩道光再度合併的時候，因為速度的不同會造成一個相位差。相位差可以由公式(2-30)表示：

$$\Gamma(\lambda, d) = 2\pi(n_e - n_o)d/\lambda \quad (2-30)$$

Γ : 相位延遲(Phase Difference)

λ : 入射光波長(Wavelength)

d : 波板厚度

n_e : 慢軸的折射係數(Index of refraction)

n_o : 快軸的折射係射(Index of refraction)

對於特定波長而言，我們可以改變波板的厚度，來調整出射光的偏振行為。同樣的相同厚度對於不同的入射光波長，其出射光的相位延遲也會不一樣。然而波板只單純改變光的偏振行為，並不改變入射光的強度。較常使用的波板是半波板及四分之一波板。當相位延遲相當於半個波長時，稱為二分之一延遲板或是半波板(Half Waveplate)。當厚度減一半，即相位延遲相當於四分之一波長時，稱為四分之一延遲板或是四分之一波板(Quarter Waveplate)。在我們的系統架構中主要是使用四分之一

波板，所以以下只針對四分之一波板做介紹。

四分之一波板主要是利用來在線偏振光與圓偏振光之間做轉換。假設一道線偏振光入射四分之一波板，其電場振動方向與主軸夾角四十五度，則入射光可以被分成兩道分別平行於快軸與慢軸的光，則出射光會被轉變為圓偏振光。

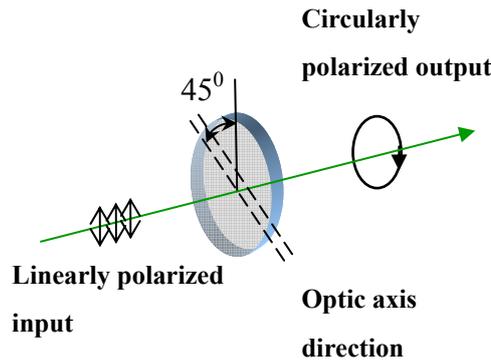


圖 2-7 四分之一波板偏振轉換

當入射光電場偏振方向與四分之一波板不是夾四十五度時，隨著夾角由零度增加到四十五度時，出射光會由線偏振光慢慢轉變為橢圓偏振光，在漸漸轉為圓偏振光。可由圖 2-8 表示。

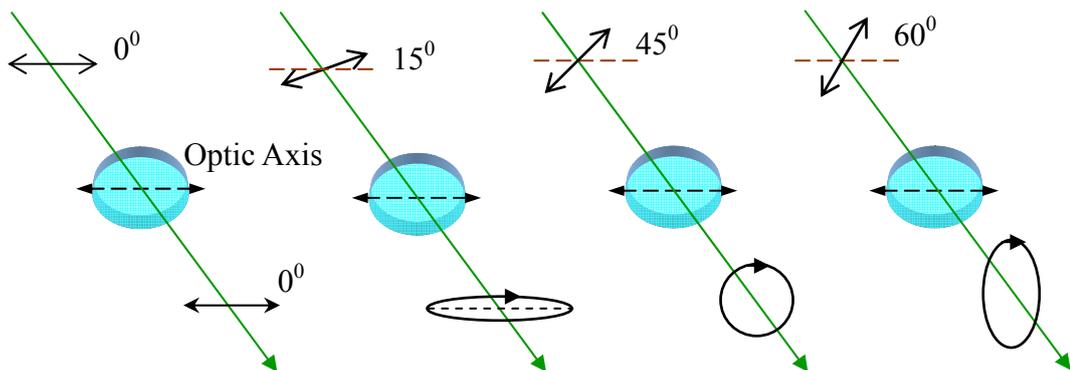


圖 2-8 線偏振光經過四分之一波板後的偏振態

其中偏振光的電場振動方向與四分之一波板所夾的角度與穿透光橢圓偏振的長軸 a 、短軸 b 的關係可由方程式 2-31 表示。

$$\tan \alpha = \frac{b}{a} \quad (2-31)$$

a : 橢圓長軸長度

b : 橢圓短軸長度

α : 線偏振光與波板主軸夾角

一般市面上的波板有兩種，一種是零階延遲片 (Zero Order Waveplate) 而另一種是高階延遲片 (Multiple Order Waveplate)。零階延遲片是利用兩對含相互垂直的石英晶體組合而成，它可利用最小的厚度來形成相位差。對於四分之一波板而言其所形成的相位延遲為 $\pi/2$ 。高階延遲片則是利用單一的石英材料做成，同樣對於四分之一波板其相位延遲則為 $(2k+1)\pi/2$ ， k 為整數。高階延遲片對於工作溫度、入射波長、光的入射角度都有很大的敏感度，零階延遲片則不會。在此實驗架構中所購買的四分之一波板是美國公司 Lattice Electro Optics 生產的，是屬於高階延遲片。實驗中發現工作溫度的改變會造成量測上極大的誤差，故我們將四分之一波板放在溫度控制裝置中來增加穩定度。

2.4 摩刷配向原理

摩刷配向是一個傳統的液晶配向方法，是利用絨布在配向膜上做摩刷配向的動作，這是一個簡易且方便的配向方法。配向劑是為一種聚合物(polymer)，由許多單體(monomer)鑿結所組成。透過硬烤讓硫亞胺群(imide group)將聚合物鍵結起來時，即便形成聚亞醞胺(polyimide)。圖 2-9 所示的聚亞醞胺是一種商業常用的配向劑，其內部硫亞胺群的有環式結構。

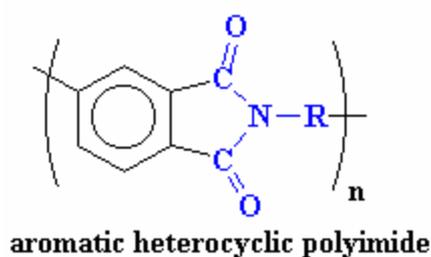


圖 2-9 聚亞醞胺(polyimide)內部結構

傳統摩刷配向所用的絨布，其絨毛跟聚亞醞胺薄膜接觸的時候，可使聚亞醞胺的分子做順向排列，並且能使液晶分子順著配向分子的方向做排列[8]。當配向分子順向排列之後，會使得配向膜具有異方性(anisotropy)的分部，這可引發薄膜具有雙折射性。另外，當絨布摩刷過聚亞醞胺薄膜後，也會在薄膜表面上形成溝槽結構[9]，這同樣可使液晶分子配向，也會引發薄膜的雙折射性。當薄膜具有雙折射性之後，就會有一個可以被量測的光學參數：相位延遲。也就是說一道線性偏振光入射薄膜，會使得出射光轉變成橢圓偏振光。本實驗所使用的配向材料為一般用來作為摩刷配向的 PI 膜，型號為 SUNEVER SE-130B，為生揚股份有限公司提供。

2.5 摩刷強度(Rubbing Strength)原理

摩刷機台的結構大致上如圖 2-10：

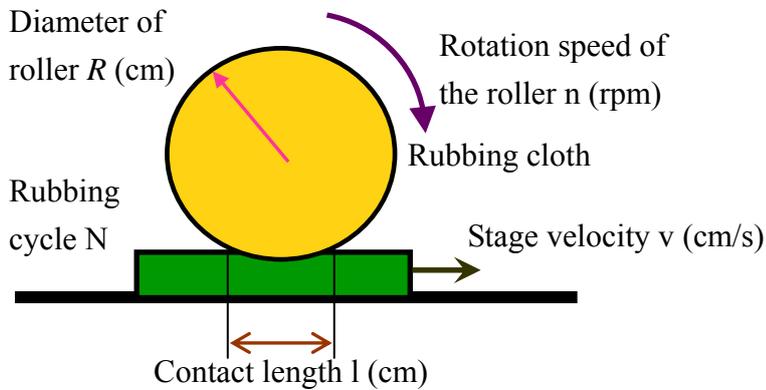


圖 2-10 摩刷機台結構

主要的結構有覆蓋絨布的滾筒，絨布的表面是由短纖毛構成。放置樣品的平移台移動方向為單一，當滾輪在旋轉時會摩刷過鍍有聚亞醯胺的樣品表面。摩刷時的條件，如滾筒的速度、平台前進速度、摩刷次數等都是可以輕易控制的條件。因此，Uchida 定義出摩刷強度[10]：

$$R_s = \gamma L \quad (2-31)$$

其中 γ 是與摩刷壓力、絨布的纖毛密度以及摩擦係數等等有關的係數。而 L 是配向膜上每個點被絨布摩刷的摩刷總長度，騎定義為：

$$L = Nl(1 + 2\pi Rn / 60v) \quad (2-32)$$

l 是滾輪與樣品所接觸的長度， R 是滾輪的半徑， n 是滾輪的轉速 (rpm)， v 是平台前進的速度 (cm/s)。 l 可由控制滾輪及樣品之間間距來調整，它會隨著摩刷壓力增加而加大。

2.6 光配向原理及照光步驟

光配向為一種非接觸式的配向方法，其優點為可避免玻璃基板表面的污染。光配向法是利用線偏極的紫外光照射在具有感光基的高分子聚合物配向膜上，使得高分子聚合物具有配向能力。一般光配向的配向劑可以分成三大類：

第一類為配向膜在照射到線性偏極紫外光後，在偏極方向上的分子會鍵結成為長鏈分子，如圖 2-11 所示[11]，這會使得配向膜具有異方性 (anisotropy) 的分布，液晶分子就會順著長鏈分子方向排列。

第二類為配向膜照光後，在偏極方向上的長鏈分子會被紫外光破壞，使配向膜產生非等向性的分布，液晶分子就會順著未被破壞的長鏈分子方向排列[11]。

第三類為 cis-trans，一般是使用含有偶氮分子的配向劑，配向劑照光前後會產生不同方向的排列[12][13]，如圖 2-12。此三種配向膜皆可使其具有雙折射性，即便具有可被量測的相位延遲。而本實驗所使用的光配向劑是工研院電子所提供的 PI 膜，型號：NISSAN RN-1349。

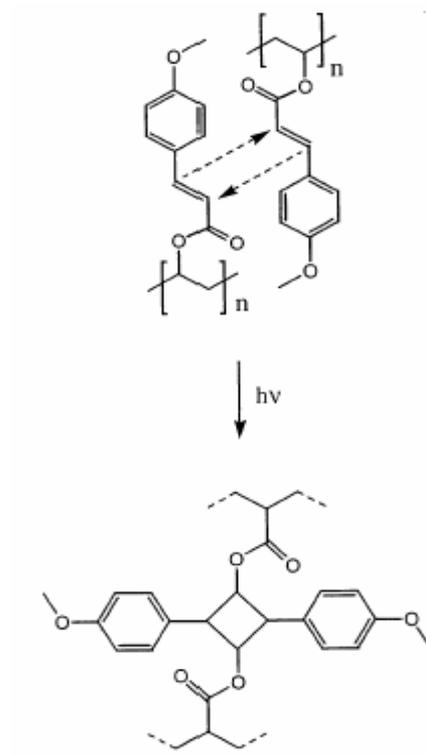


圖 2-11 聚合物經過紫外光照射形成 Cross-Linking

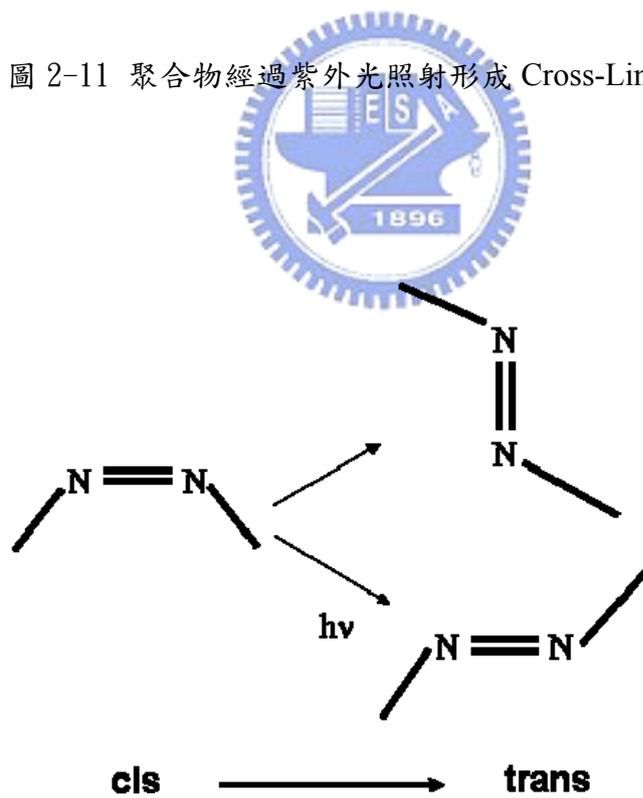


圖 2-12 光配向劑形成 cis-trans 示意圖

PI 膜經過硬烤，會進行聚合作用(polymerization)，將單體變成為聚合物。要使 PI 膜具有光配向效果，我們需要使用兩個照光步驟方式[14]：

Step 1: S-Polarization UV Light with Incident Angle 45°

利用線偏振紫外光照射 PI 膜，聚合物與聚合物會形成排列，由於是利用線偏極光照射的緣故，所以只有特定方向的聚合物會整齊的排列，達到液晶分子配向的效果，且液晶分子排列方向與紫外光偏極的方向垂直。

Step 2: Unpolarized UV Light with Incident angle 45°

經過 step 1 的處理之後，液晶分子可能傾斜的方向如圖 2-13 所示，這種現象稱為預傾角簡併(pretilt angle degeneracy)。利用斜向入射的非偏化紫外光可去除預傾角簡併的現象，非偏極紫外光入射方向與液晶分子傾斜的方向關係如圖 2-14，其中與光的偏極化方向較垂直的方向即為液晶的排列方向。

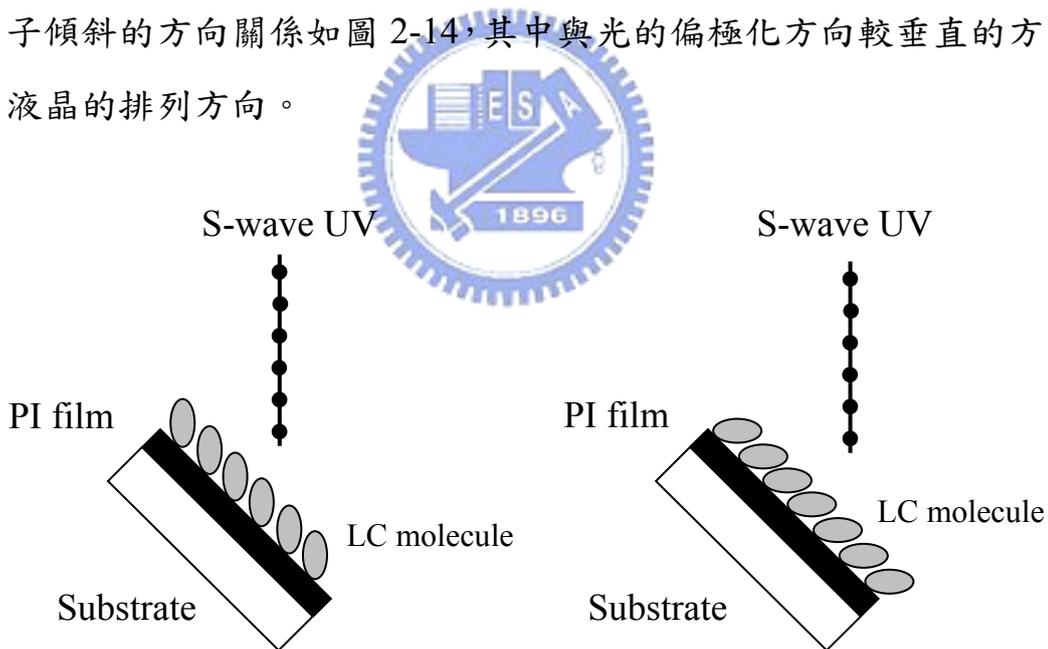


圖 2-13 預傾角簡併(pretilt angle degeneracy)

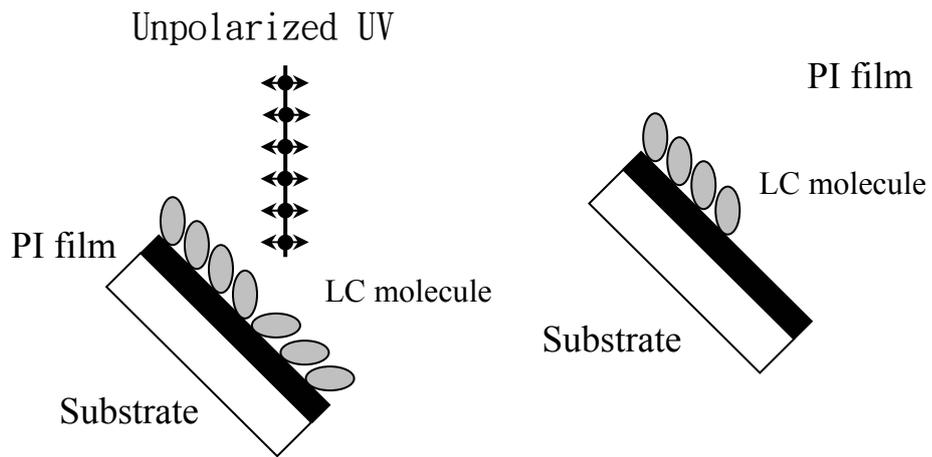


圖 2-14 消除預傾角簡併現象



2.7 表面定向強度量測原理[14]

製作一平行配向樣品，並灌入有自旋性的液晶（向列型液晶+自旋摻雜物），置於 Crossed polarizer 下（偏極片與檢偏片夾角為 90° ），液晶元件與檢偏片均架設在旋轉平台上，偏極片、檢偏片與液晶元件間的關係如圖 2-15。

在此裝置下，並考慮液晶分子的旋轉角度，則穿透率為：

$$T = \left[\frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\sqrt{1+u^2}\theta) \sin(\theta - \psi_{pol}) + \cos(\sqrt{1+u^2}\theta) \cos(\theta - \psi_{pol}) \right]^2 + \frac{u^2}{1+u^2} \sin^2(\sqrt{1+u^2}\theta) \cos^2(\theta + 2\psi_0 - \psi_{pol}) \quad (2-33)$$

θ = 液晶分子的旋轉角度(twist angle)

ψ_0 = 偏極片偏極方向與第一層液晶的夾角

ψ_{pol} = 偏極片偏極方向與檢偏片偏極方向的夾角

$$u = \frac{\pi d}{\lambda \theta} (n_e - n_o) \quad (2-34)$$

d = 液晶元件的兩片玻璃基板間距(cell gap)

n_e = extraordinary index of refraction

n_o = ordinary index of refraction

λ = 入射光的波長

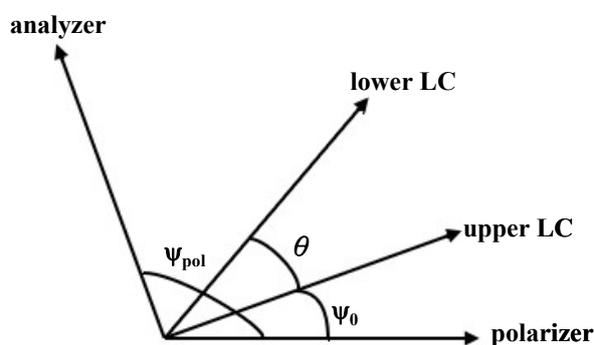


圖 2-15 偏極片、檢偏片與液晶元件間的關係

當穿透率 T 最小時，由 (2-33) 可得下列兩關係式：

$$\theta + 2\psi_0 - \psi_{pol} = \pm \frac{\pi}{2} \quad (\text{for anti parallel cells}) \quad (2-35)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\sqrt{1+u^2}\theta) \sin(\theta - \psi_{pol}) + \cos(\sqrt{1+u^2}\theta) \cos(\theta - \psi_{pol}) = 0 \quad (2-36)$$

若液晶元件旋轉 $\Delta\theta$ ，為了符合 (2-35)，則：

$$\theta + 2(\psi_0 + \Delta\theta) - (\psi_{pol} + 2\Delta\theta) = \pm \frac{\pi}{2} \quad (2-37)$$

必須令檢偏片 (analyzer) 旋轉的角度為液晶元件旋轉角度的兩倍。

實際量測的時候，旋轉液晶元件與檢偏片，量測其穿透率變化，找出穿透率 T 最小時的 ψ_{pol} ，將 ψ_{pol} 代入 (2-35)，解 (2-36) 即可得到液晶分子的旋轉角度 (twist angle) [15]。

表面定向強度 (Surface anchoring strength) 是指液晶分子與玻璃基板上的配向膜之間的作用力強度。一般會由於不同的配向方式，而有不同的定向強度。當液晶元件中的向列型液晶 (nematic liquid crystal) 摻雜自旋添加物 (chiral dopant) 後，液晶分子的自由能 F (free energy) 包含了彈性自由能 F_d (the elastic energy) 和表面定向能 F_s (the surface anchoring energy)：

$$F = F_d + F_s \quad (2-38)$$

其中

$$F_d = \frac{1}{2} K_{22} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{\theta}{d} \right)^2 \cdot d \quad (2-39)$$

$$F_s = \frac{1}{2} A \cdot \sin^2 \phi_s \quad (2-40)$$

K_{22} = 旋轉彈性係數 (twist elastic constant)

P_0 = 自旋螺距 (natural pitch)

d = 液晶元件玻璃基板間距 (cell gap)

θ = 液晶分子的旋轉角度 (twist angle)

A = 表面定向強度 (surface anchoring strength)

ϕ_s = 表面液晶分子方向與配向方向的夾角

又假設此液晶元件的兩面玻璃基板的表面配向條件均相等，則液晶分子的旋轉角度 θ 與表面液晶分子方向與配向方向的夾角 ϕ_s ，有下列的關係：

$$\theta = m\pi + 2\phi_s \quad m \text{ 為整數} \quad (2-41)$$

因為液晶元件具有兩片玻璃基板，因此總能量密度為：

$$F = F_d + 2F_s \quad (2-42)$$

在液晶元件中，液晶分子的自然排列下，所具有的自由能 F 最小，也就是：

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_s} = 0 \quad (2-43)$$

根據上列各式，將 (2-43) 進行化簡：

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \phi_s} &= \frac{\partial}{\partial \phi_s} \left(\frac{1}{2} K_{22} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{m\pi + 2\phi_s}{d} \right)^2 \cdot d + 2 \cdot \frac{1}{2} A \cdot \sin^2 \phi_s \right) \\ &= -2K_{22} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{m\pi + 2\phi_s}{d} \right) + 2A \cos \phi_s \sin \phi_s = 0 \end{aligned} \quad (2-44)$$

$$\Rightarrow K_{22} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{m\pi + 2\phi_s}{d} \right) = A \cos \phi_s \sin \phi_s \quad (2-45)$$

$$\Rightarrow K_{22} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{\theta}{d} \right) = \frac{1}{2} A \sin 2\phi_s \quad (2-46)$$

最後可得表面定向強度 A (surface anchoring strength) 為：

$$A = \frac{2K_{22}}{\sin 2\phi_s} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{\theta}{d} \right) \quad (2-47)$$

將上節所得之旋轉角度 θ 代入，即可得到表面定向強度 A [16]。

第三章 實驗方法與量測系統介紹

在實驗的一開始，我們架設薩納曼特橢圓儀系統以及對其系統進行校正。之後我們使用兩種基板：ITO 玻璃及石英玻璃。當進行摩刷配向時，皆使用 ITO 玻璃當基板。在光配向的部分使用石英玻璃。我們亦使用兩種配向劑：SUNEVER 130B(SE-130B)及 NISSAN RN-1349。SE-130B 為生揚股份有限公司提供的配向劑，其濃度為 6.5 wt%。在實驗過程中無稀釋，使用公司出廠的濃度。

我們將兩種配向劑塗佈在 ITO 玻璃及石英玻璃上，分別進行摩刷配向以及光配向行為。將配向好之單一配向基板進行相位延遲量測。當進行摩刷配向時，使用鍍在 ITO 玻璃上的 SE-130B 配向膜改變摩刷強度觀察其跟相位延遲的關係。同時也改變 SE-130B 及 RN-1349 配向劑塗佈厚度，在相同摩刷強度下探討其與相位延遲之關係。在光配向的部分使用鍍在石英玻璃的 RN-1349 配向膜改變照光時間、照光步驟以及配向膜塗佈厚度，觀察其相位延遲的變化。同時我們也利用配向劑 SE-130B，改變塗佈厚度觀察同樣照光條件下其相位延遲變化。

另外我們將相同配向之兩片 SE-130B 及 RN-1349 配向基板做成液晶盒，SE-130B 經由摩刷配向，RN-1349 經由線偏極紫外光配向，之後進行定向強度量測來探討配向膜相位延遲與定向強度的關係。我們也將薩納曼特橢圓儀利用在量測液晶樣品的相位延遲上：利用 RN-1349 配向膜製作有光配向及無配向之液晶盒，每次增加照射線性偏極紫外光及非偏振紫外光時間 5:1 在製作好的液晶盒上，利用薩納曼特橢圓儀量測相位延遲，觀察液晶樣品的相位延遲變化。

3-1 薩納曼特橢圓儀系統架設與校正

I. 薩納曼特橢圓儀系統架設

系統架設的第一步驟，先將偏振器(polarizer)以及檢偏器(analyzer)擺設為光吸收軸相互垂直的情況，使通過之光強度最低。之後加入四分之一波板(quarter waveplate)，當四分之一波板之光軸與偏振器光軸平行時，通過四分之一波板的光並不會被改變光之偏振態，所以之後再度通過檢偏器時，光強度依然會是最弱。我們可藉由此來確認四分之一波板光軸與偏振器光軸平行。

將檢偏器放置在可旋轉的平台上，我們定義偏振片光軸所在的角度為零度，光學桌水平方向為 $+45^\circ$ ，則四分之一波板光軸的角度也為零度，之後使檢偏器旋轉的方向為 $-\theta$ 。我們將樣品擺放在偏振器之後，樣品為聚亞醯胺薄膜上做配向動作，而我們將樣品的配向方向擺放在零度。樣品的雙折射性會使入射的線偏振光轉變為橢圓偏振光，但因為樣品所形成的相位差很小，所以橢圓偏振光的長軸還是會在 0° 的方向，而之後的四分之一波板會將此橢圓光轉變為線偏振光，而之後利用旋轉的檢偏器來找尋線偏振光電場偏振的角度，此角度包含了樣品的相位延遲在裡面，藉由公式可以計算出樣品的相位延遲。

II. 薩納曼特橢圓儀系統校正

為了使四分之一波板的主軸能夠精準的調整到與起偏器主軸方向平行，我們使用有微調鈕的鏡片架，其精確度可以到 0.1° 。由於樣品的相位延遲由文獻值可知道大約是 1 nm 左右，經過四分之一波板的線偏振光所形成的角度偏差在 1 degree 左右，所以檢偏器所改變的角度會在 1 degree 以內，因此我們加上鎖相放大器，來使訊號不受外界影響。

由於所購買的四分之一波板，是屬於高階延遲片。工作溫度會影響

四分之一波板產生的相位延遲，所以在量測的同時必須將四分之一波板放置在溫控的系統之中。控制溫度在攝氏 28 度 C，則四分之一波板的敏感度可以降低，使得系統的量測值可以精確到 0.01 degree。

III. 薩納曼特橢圓儀系統量測方式

利用 LABVIEW 虛擬程式控制來做系統的量測行為。控制檢偏器旋轉讀取光強度值，找尋光強度低點利用拋物線方程式去擬合找出光強度低點所對應之檢偏器偏移角度 θ 。則樣品之相位延遲可以由公式(2-22)來得到，而之後相位延遲的表示方法皆使用公式(2-23)來表示，單位 nm。



3-2 樣品製作:

I. 清洗玻璃:

1. 將 ITO 玻璃或石英玻璃大小裁切成 20mmx15mm。
2. 將裁切好的玻璃放入清洗用的燒杯中，加入中性清潔劑，加水蓋過玻璃，利用超音波震盪器清洗十分鐘。
3. 將玻璃用自來水沖洗乾淨，再將玻璃裝入乾淨的燒杯，加入去離子水用超音波震盪器清洗五分鐘。
4. 再將玻璃放入另一個燒杯中，倒入丙酮蓋過玻璃，利用超音波震盪器清洗十分鐘，將丙酮回收以免污染。
5. 同樣的再將玻璃放入裝有甲醇的燒杯中，利用超音波震盪器清洗十分鐘，將甲醇回收以免污染。
6. 加入去離子水到燒杯內，將燒杯放入超音波機器中用超音波震盪清洗 10 分鐘。
7. 將玻璃一一夾出，利用氮氣將玻璃吹乾，放入溫度設定為 100⁰C 的烤箱中將水氣烤乾。

II. 配向膜之被覆

1. SE-130B 平日要保存在攝氏溫度 -10⁰ C 冰箱裡，使用之前從冰箱裡取出，放置在防潮箱裡 2~3 小時以回到室溫 25⁰C。注意放置期間不要搖晃，以免空氣融入配向劑內。
2. RN-1349 平日也是保存在攝氏溫度 -10⁰ C 冰箱裡，使用之前取出退冰，放置 1~2 小時之後即可使用。
3. 將洗乾淨的 ITO 玻璃(或石英玻璃)放置在光阻塗佈機上。
4. 塗佈方法：
使用微量滴管取 SE-130B 或 RN-1349 滴數滴在有 ITO 面的玻璃上

(或是石英玻璃上)，設定旋轉塗佈機旋轉步驟分兩步：第一步為轉速 500rpm(15sec)，第二步為轉速 4000rpm(25sec)。我們亦曾利用第二步的轉速來改變膜的厚度。改變轉速為 1000rpm、2000rpm、3000rpm。旋轉塗佈時間固定為 25sec。

將玻璃取下放在加熱板上預烤，SE-130B 及 RN-1349 的預烤時間分別為 3 分鐘及 80sec。

5. 硬烤：

將塗佈配向劑的玻璃放置在烤箱中，設定硬烤溫度(SE-130B 為 170⁰C、RN-1349 為 250⁰C)烤一個小時。

6. 將硬烤完之後的 ITO 玻璃或石英玻璃取出，放置在乾淨的培養皿之中冷卻，等待配向。

III 摩刷配向

本實驗所使用的摩刷機台為向聯揚精技股份有限公司購買的配向機台。我們調整摩刷機台的摩刷條件，如絨毛滾筒下壓深度、樣品台前進速度、以及滾筒轉速等參數使絨布摩刷配向膜以達配向效果。亦可多次摩刷，增加摩刷強度。由之前的 2.7 節可得知，摩刷強度可定義為[13]：

$$R_s = rL \quad (3-1)$$

$$L = Nl(1 + 2\pi n / 60v) \quad (3-2)$$

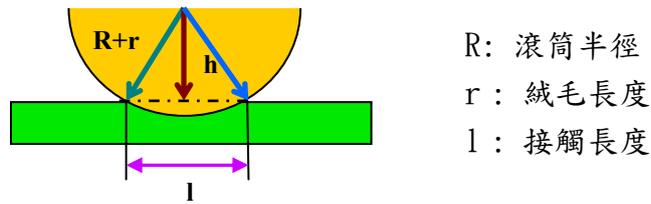


圖 3-1 摩刷機台下壓深度示意圖

我們可以由摩刷機台的使用參數來計算出摩刷總長度。滾筒的半徑為 R ($R=40.025\text{mm}$)，當貼上絨布時其總半徑會增加為 $R+r$ ，故 r 為絨毛的長度。



圖 3-2 顯微鏡觀察下的絨毛

我們將絨布上的絨毛取一小塊，利用光學顯微鏡觀察，並計算其長度。在光學顯微鏡下，拍的照片與實際長度的轉換為： $1 \text{ pixel}=2.80\mu\text{m}$ ，故可以得到絨毛的平均長度為 1.9mm ，如圖 3-2。之後可以利用簡單的數學方法來計算我們想得到的接觸長度(contact length)為：

$$l = 2\sqrt{(R+r)^2 - h^2} \quad (3-3)$$

其中 h 可由摩刷機台參數來決定，當絨毛剛剛接觸樣品的時候，其 $h=R+r$ ($l=0$)。我們可以控制摩刷機台下壓的深度，以每次改變 0.05mm 為基準。當下壓深度為 0.05mm 時，算出其接觸長度為 4.10mm 。摩刷總長度的計算需要滾筒的轉速(rpm)以及平台的前進速度(cm/s)，在本實驗所選擇的滾筒轉速為 817rpm ，平台前進速度為 1.12cm/s ，可以計算出摩刷總長度為 125.58cm 。在本實驗中，我們設定下壓深度為

0.7mm，其摩刷總長度可增大為 429.80cm。

IV 光配向

本實驗所使用的光配向光源為氙燈，型號為 Thermo Oriel Instruments 的 900W Xenon arc lamp，照光系統示意圖如圖 3-3。我們進行兩種照光步驟：

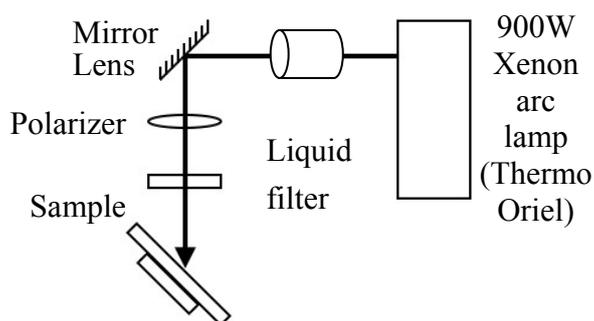


圖 3-3 照光示意圖

1.增加照光時間：利用線偏振紫外光入射樣品，樣品水平擺置，每照光五分鐘之後量測其相位延遲。

2.消除簡併且增加照光時間：樣品擺設四十五度傾斜，線偏振紫外光入射，照光五分鐘之後，再利用非偏振紫外光入射，照光一分鐘，量測其相位延遲。線偏振紫外光與非偏振紫外光時間比為 5:1。

IV 液晶盒之製作

A. 在定向強度之量測中，分別量測摩刷配向以及光配向的液晶樣品定向強度。在摩刷配向的部分，取鍍上配向劑 SE-130B 的 ITO 玻璃(第二步塗佈轉速為 4000rpm)，利用摩刷機台配向。改變滾筒下壓深度，配向完畢之後在兩片玻璃之間夾間隙物(Mylar)6 μm 來控制厚度。在光配向的部份，取鍍上 RN-1349 的石英玻璃(第二步塗佈轉速為 4000rpm)，進行消除簡併的光配向實驗。累積線性偏振光時間比累積非線性偏振光比為 5:1。

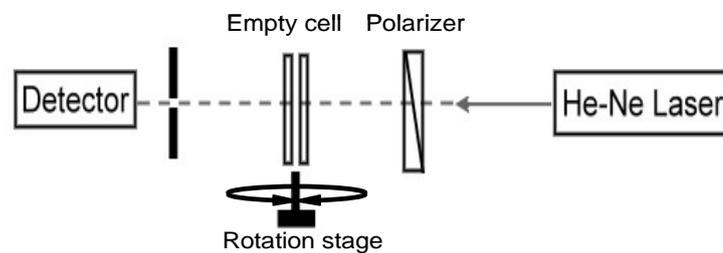


圖 3-4 厚度量測系統

將兩片紫外光照射完成的玻璃基板中間夾間隙物(6 μm)來控制厚度，利用厚度量測系統量測製作好的空液晶盒，厚度系統量測示意圖如圖 3-4[17]。將空樣品灌入向列型液晶 E7+ZLI811(0.15%)左旋 chrial dopant (pitch=56 μm)，利用表面定向強度量測系統量測定向強度 [18][19]，系統示意圖如圖 3-5。

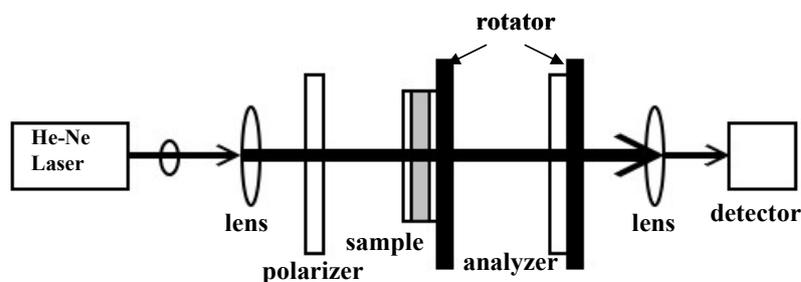


圖 3-5 表面定向強度量測裝置示意圖

B. 在薩納曼特橢圓儀在液晶樣品的應用上，我們製作兩種樣品：有配向樣品與無配向樣品。有配向樣品為使用 RN-1349 塗佈在石英玻璃上(第二步塗佈轉速為 4000rpm)，將兩片基板進行光配向：照射線偏極紫外光十分鐘，在利用非線偏極紫外光照射兩分鐘。配向完畢之後在兩片玻璃之間夾間隙物(Mylar)6um 來控制厚度，之後灌入向列型液晶 E7。而無配向之樣品為使用 RN-1349 塗佈在石英玻璃上(第二步塗佈轉速為 4000rpm)，不進行配向，在兩片玻璃之間夾間隙物(Mylar)6um 來控制厚度，之後灌入向列型液晶 E7。利用薩納曼特橢圓儀量測液晶樣品的相位延遲。每次增加照射線性偏極紫外光及非線性紫外光時間 5:1，觀察液晶盒的相位延遲變化。



第四章 實驗結果與討論

4-1 系統內稟相位差

理論上在系統沒有放樣品的情況下，系統量測到的訊號為如圖 4-1 中的實線，代表樣品的相位延遲為零。但在樣品尚未放置前，我們先量測在無樣品下系統的量測值。在溫度控制 28°C 下，系統量測二十次，取平均值為 -0.00953nm ，標準差 0.01979nm 。故系統有一個內稟向位差，如圖 4-1 中的細虛線。而真正在量測有相位延遲的樣品的時候，系統量測如圖 4-1 中的粗虛線，所以在之後系統量測上，會將這個量測值加上系統內稟向位差。

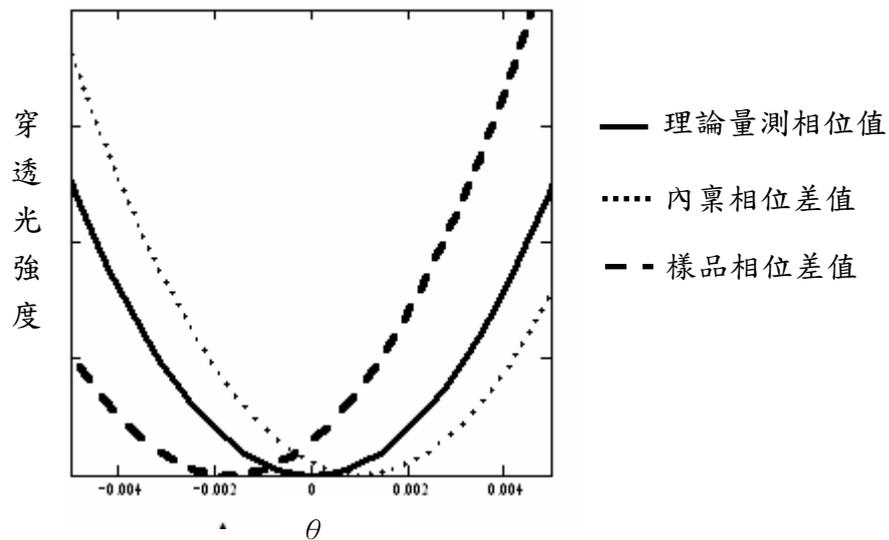


圖 4-1 系統訊號量測圖

4-2 玻璃基板量測

我們所使用的玻璃基板有兩種，一種是鍍上 ITO 的玻璃，另一種是石英玻璃。分別量測清洗乾淨後的兩種玻璃：ITO 玻璃相位延遲值 -0.25834nm ，石英玻璃相位延遲值 -0.021480nm 。之後量測的配向樣品相位延遲，皆有扣除內稟相位延遲以及玻璃基板相位延遲。

4-3 摩刷配向量測

4-3-1. 摩刷強度之影響

我們製作配向膜樣品:SE-130B 鍍在 ITO 玻璃上。首先改變滾筒下壓深度，下壓深度改變由 $0\text{mm}\sim 0.7\text{mm}$ ，如圖 4-2。隨著下壓深度越深，配向膜的相位延遲隨之加大，當下壓深度到達 0.25mm 時，相位延遲到達飽和，大約 0.67nm 左右。但是下壓深度繼續增加時，相位延遲開始有降低的現象。實心圓與空心圓分別代表不同次實驗值。

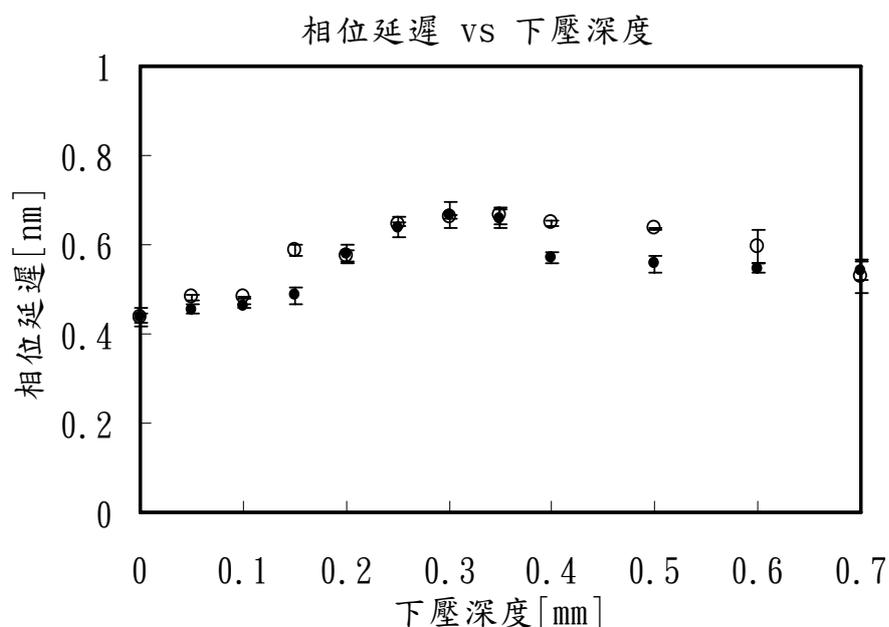


圖 4-2 摩刷機台下壓深度與配向膜(SE-130B)之相位延遲圖

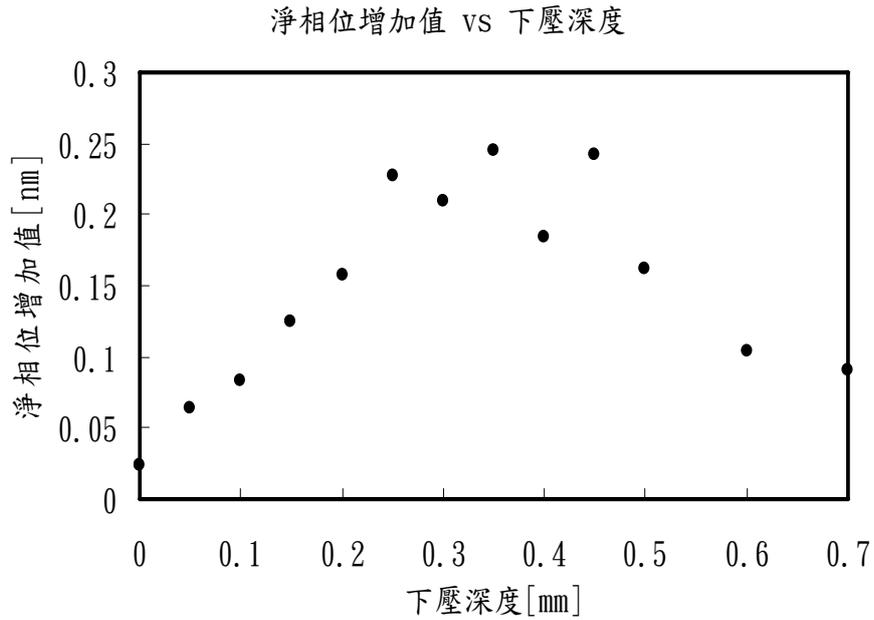


圖 4-3 摩刷機台下壓深度與配向膜(SE-130B)淨相位增加值圖

當我們在摩刷配向之前，也先量測配向膜的相位延遲，則可計算出單純由摩刷所造成的淨相位延遲增加值。發現 SE-130B 在尚未配向之前，其相位延遲大約在 0.4nm 左右，之後在經過配向所能產生的相位延遲改變不多，產生最大相位延遲在 0.25nm 左右。

將滾筒絨布摩刷時所調整的參數：滾筒轉速為 817rpm，平臺前進速度為 1.12cm/s，利用 3-1 節中的摩刷強度計算方法來計算摩刷強度 (Rubbing Strength)，則由圖 4-2 可得到相位延遲相對於摩刷強度的圖，如圖 4-4。

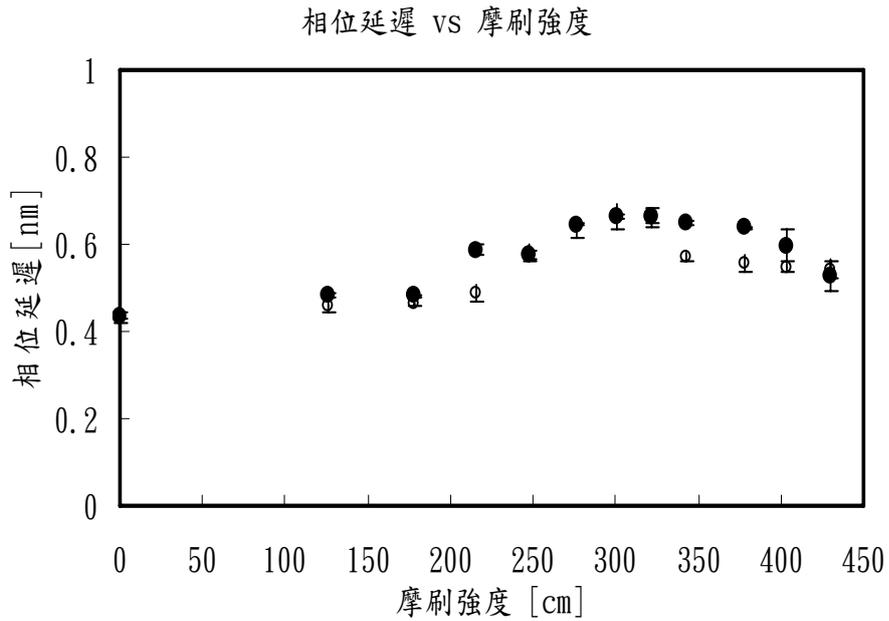


圖 4-4 不同下壓深度之摩刷強度參數(Rubbing Strength Parameter)與配向膜(SE-130B)相位延遲圖

當我們固定摩刷機台配向條件，逐次增加摩刷次數，每當配向一次便量測其相位延遲，如圖 4-5。發現隨著次數的增加，相位延遲會逐漸飽和，接近 0.9nm。下壓深度 0.2mm 條件下所造成的相位延遲皆會大於下壓深度 0.1mm 的條件。

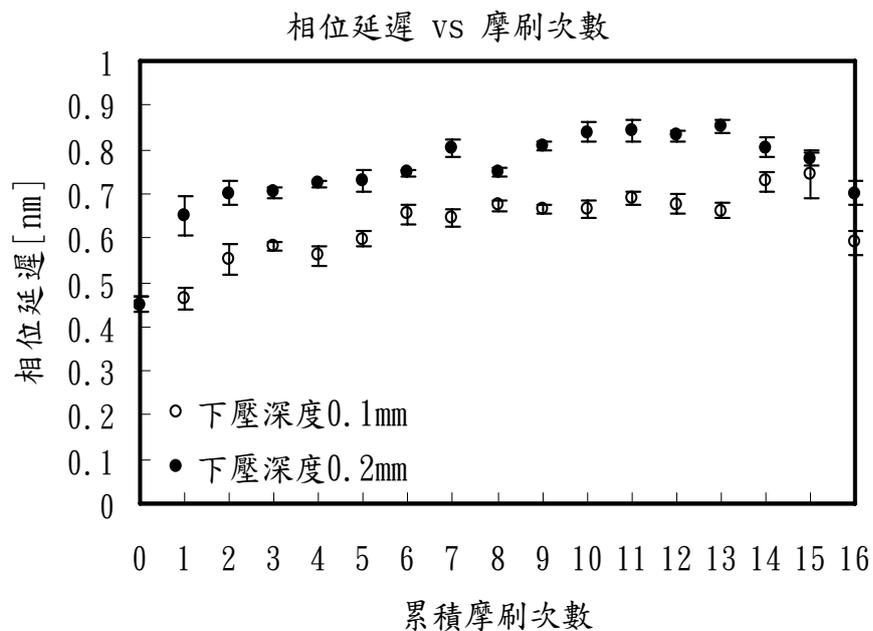


圖 4-5 增加摩刷次數與配向膜(SE-130B)之相位延遲圖

同時計算摩刷強度(滾筒轉速為 817rpm，平臺前進速度為 1.12cm/s)，由圖 4-5 可得到相位延遲相對於摩刷強度參數(Rubbing Strength Parameter)的圖 4-6。

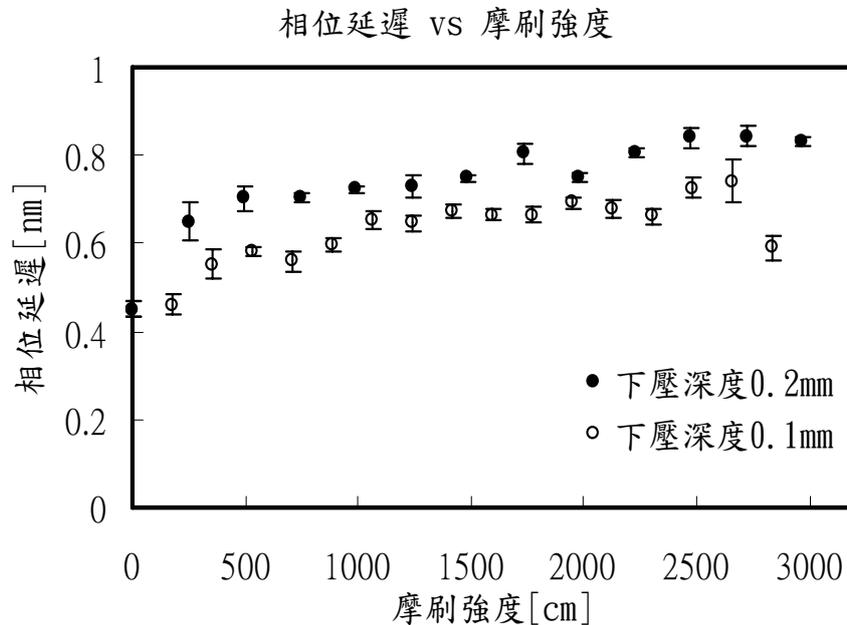


圖 4-6 增加摩刷次數之摩刷強度參數(Rubbing Strength Parameter)與配向膜(SE-130B)之相位延遲圖

我們將不同滾筒絨毛下壓深度的相位延遲圖(圖 4-4)以及增加摩刷次數的相位延遲圖(圖 4-5)合併，如圖 4-7。發現在下壓深度 0.35mm(摩刷強度為 321cm)之前的相位延遲增加趨勢符合在增加摩刷次數相位增加的趨勢，然而在滾筒下壓深度超過 0.4mm(摩刷強度為 343cm)開始，相位延遲有下降的趨勢，對於此結果推測原因為滾筒下壓深度過深，已經開始刮傷配向膜，以至於相位延遲無法如預期的增加。我們利用肉眼觀察經由下壓深度 0.4mm 以上配向的配向膜，也確實有發現配向膜被刮傷的痕跡。

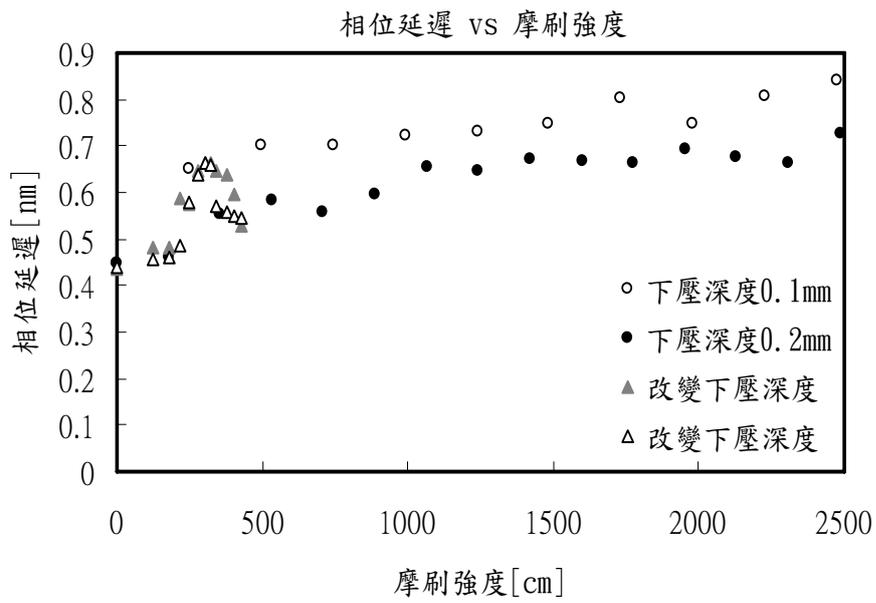


圖 4-7 摩刷強度參數(Rubbing Strength Parameter)與配向膜 (SE-130B)之相位延遲圖



4-3-2.配向膜厚之影響

控制旋轉塗佈機台的轉速，第一步驟固定 500rpm(15sec)，第二步驟改變四種轉速，分別為 1000rpm、2000rpm、3000rpm、4000rpm(25sec)。選擇兩種配向劑：一種為 SE-130B，另一種為 RN-1349。我們量測兩種不同配向劑在塗佈機轉速 2000rpm 以及 4000rpm 下之膜厚度:利用光譜量測方法，改變不同入射光波長，在已知折射率之下偵測樣品的反射光干涉訊號，如表 4-1。摩刷配向條件固定為滾筒下壓深度 0.2mm。SE-130B 量測其相位延遲，如圖 4-8。而 RN-1349 相位延遲如圖 4-9。

	2000rpm	4000rpm
SE-130B	785.7nm	513.8nm
RN-1349	303.3nm	150.5nm

表 4-1 旋轉塗佈機轉速 2000rpm 以及 4000rpm 量測之膜厚度

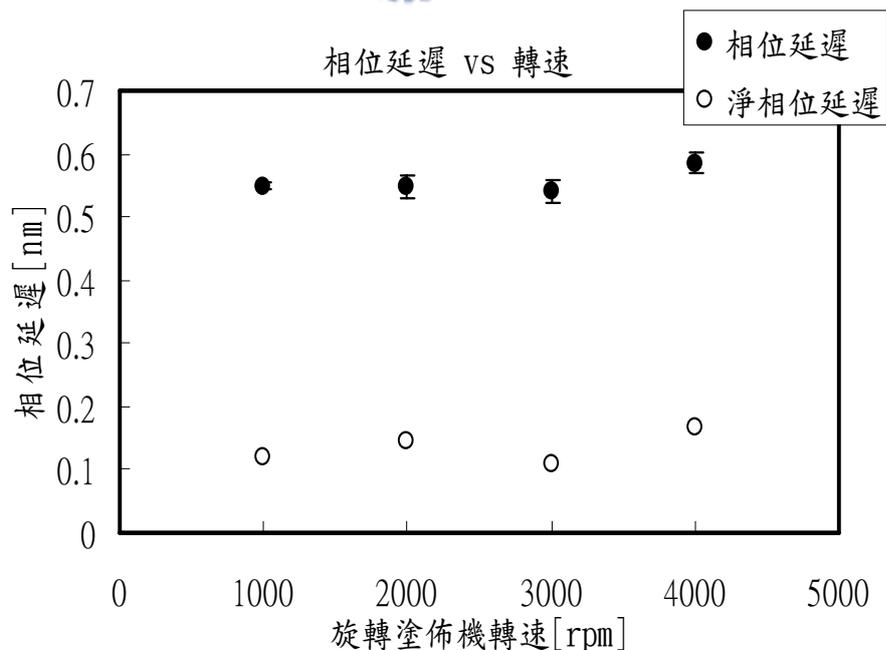


圖 4-8 旋轉塗佈機轉速與配向膜(SE-130B)相位延遲圖

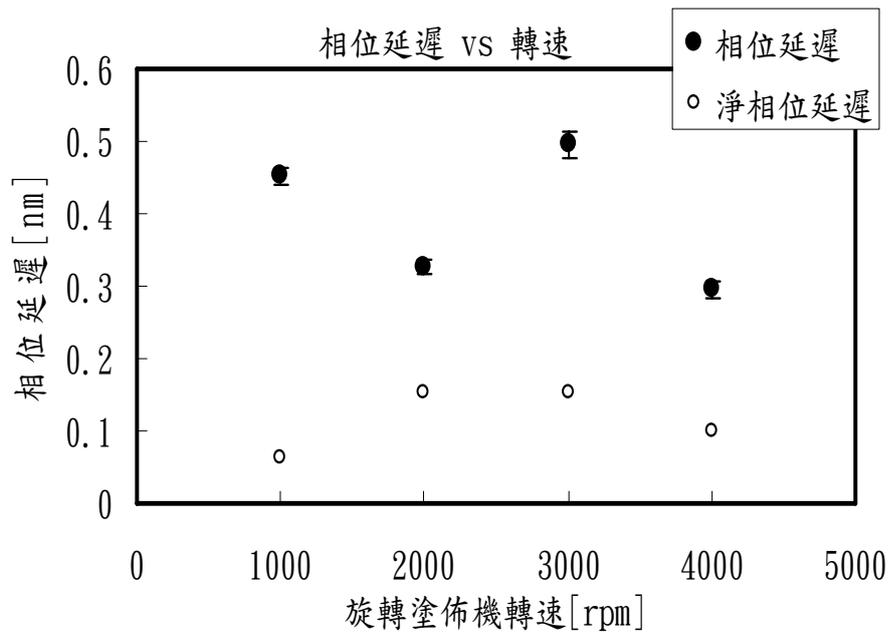


圖 4-9 旋轉塗佈機轉速與配向膜(RN-1349)相位延遲圖

實心的點代表樣品的相位延遲，空心的淨相位延遲為摩刷前後量測的相位延遲值相減。由圖 4-8 可以發現 SE-130B 不管配向膜厚的改變，在相同的摩刷條件下其所引發的相位延遲差不多，皆在 0.1nm 左右。而由圖 4-9 會發現，RN-1349 不同膜後在經由相同摩刷條件下產生的相位延遲差異有點大，這是由於在配向之前量測出的相位延遲有正負的差異，2000rpm 及 4000rpm 配向前的相位延遲為負，1000rpm 及 3000rpm 相位延遲為正。然而 RN-1349 的淨相位延遲在經由相同的摩刷條件下，產生相位延遲也是在 0.1nm 左右。兩種配向劑：SE-130B 及 RN-1349，不管厚度的變化，在固定滾筒的下壓深度下，所產生的相位延遲值都大約在 0.1nm 左右，不會大於 0.2nm。我們推測，摩刷配向是利用絨毛在配向膜表面的配向分子有異方性的分佈或是形成溝槽結構，這兩種機制都是只在配向膜的表層作用，因此我們認為配向膜厚度的改變不會影響摩刷配向相位延遲的產生。

4-4 光配向量測

I. 照光時間之影響

我們使用配向膜為 RN-1349。固定旋轉塗佈機的第二步轉速為 4000rpm，將配向膜利用實驗系統如圖 3-3 進行增加照光時間實驗。實驗過程中每次照光時間五分鐘，量測其相位延遲改變。此外我們將照光時間換算成照光能量：線偏振紫外光能量 $0.034\text{J}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$ ，結果如圖 4-10。

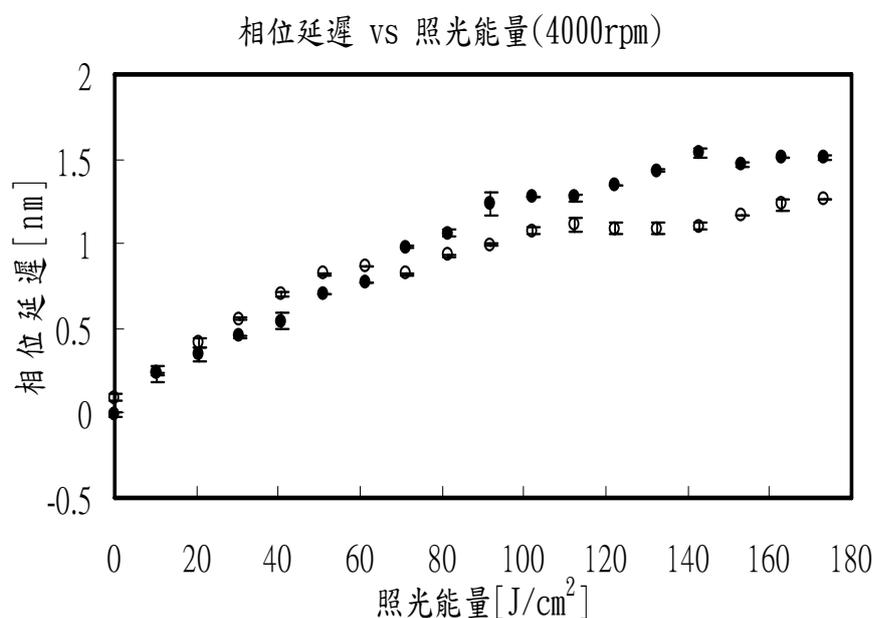


圖 4-10 旋轉塗佈機轉速 4000rpm 之配向膜(RN-1349)在增加照光能量下與相位延遲之關係

隨著照光能量增加，相位延遲也是隨之增加，直到累積照光能量到達 $100\text{J}/\text{cm}^2$ 左右，相位延遲開始到達飽和。空心點與實心點分別進行兩次一樣的實驗條件所得到的數據。到達飽和時的相位延遲有所差異，有可能是因為樣品本身所造成的差異。另外改變旋轉塗佈機速度，第二步驟改為轉速 2000rpm，進行增加照光時間實驗，結果如圖 4-11。結果顯示在照光能量累積到 $100\text{J}/\text{cm}^2$ 之前，樣品的相位延遲也是隨之增加，在 $100\text{J}/\text{cm}^2$ 之後便漸漸到達飽和。空心點與實心點分別進行兩次一樣的實

驗條件所得到的數據。到達飽和時的相位延遲差異不大，顯示這次選擇的兩個樣品本身的差異性不大。

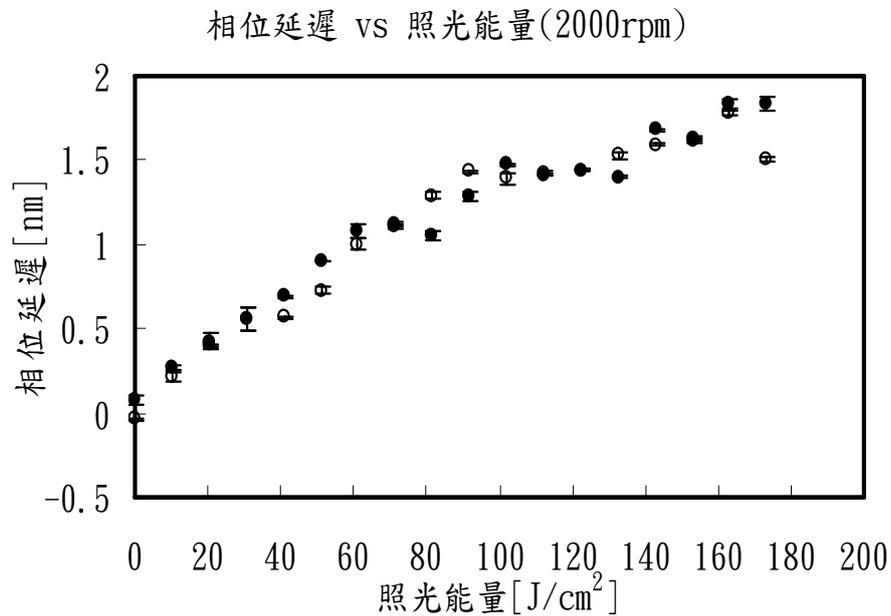


圖 4-11 旋轉塗佈機轉速 2000rpm 之配向膜(RN-1349)在增加照光能量下與相位延遲之關係

再一次改變旋轉塗佈機速度，調整為轉速 1000rpm，進行相同實驗，結果如圖 4-12。此次的樣品在照光能量超過 100J/cm²之後，其相位延遲還是繼續增加，幾乎到了累積照光能量超過 350 J/cm²才有飽和現象，且其相位延遲會增加到 3nm 左右。

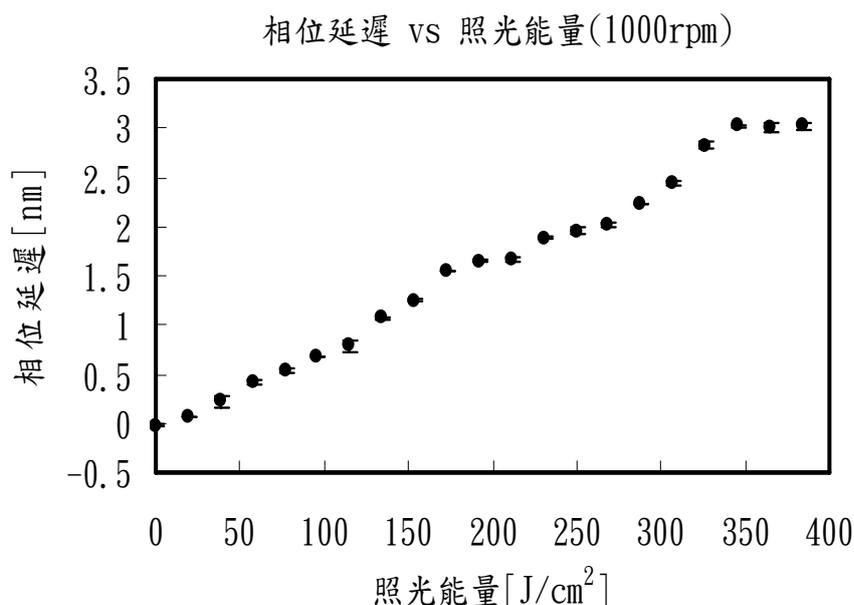


圖 4-12 旋轉塗佈機轉速 1000rpm 之配向膜(RN-1349)在增加照光能量下與相位延遲之關係

比較此三種不同轉速的樣品相位延遲(如圖 4-13)，在剛開始照光時，相位延遲都是很穩定的上升。推測此現象是因為配向膜剛開始照光時，改變的都是較表層分子的異方性，因此所造成的相位延遲都差不多，且穩定的上升。當持續增加照光能量，先到達飽和的是轉速 4000rpm，再來是轉速 2000rpm，接著是轉速 1000rpm。會造成此現象是因為轉速慢所塗佈的配向膜厚度會大於轉速快所塗佈的配向膜厚度。而光配向所照射的線偏極紫外光是深層的配向行為，因此厚的配向膜會造成較大相位延遲。

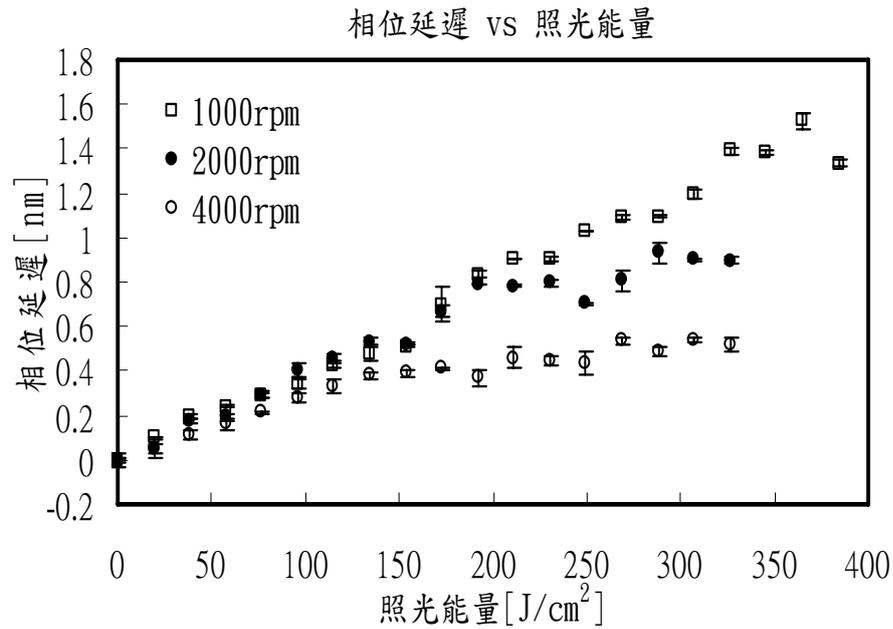


圖 4-13 不同旋轉塗佈機轉速之配向膜(RN-1349)在增加照光能量下與相位延遲之關係

II. 消除簡併之效應

同樣選擇配向膜為 RN-1349，鍍膜條件選擇同樣改變第二步轉速為 4000rpm。進行消除簡併且增加照光時間實驗，結果如圖 4-14。將照光時間換算成累積照光能量，線偏極紫外光能量： $0.034J/s \cdot cm^2$ 、非線性偏極光能量： $0.15J/s \cdot cm^2$ 。在消除簡併的過程中，線偏振紫外光時間為非線性偏極光的五倍，我們將照射兩種光的能量相加。

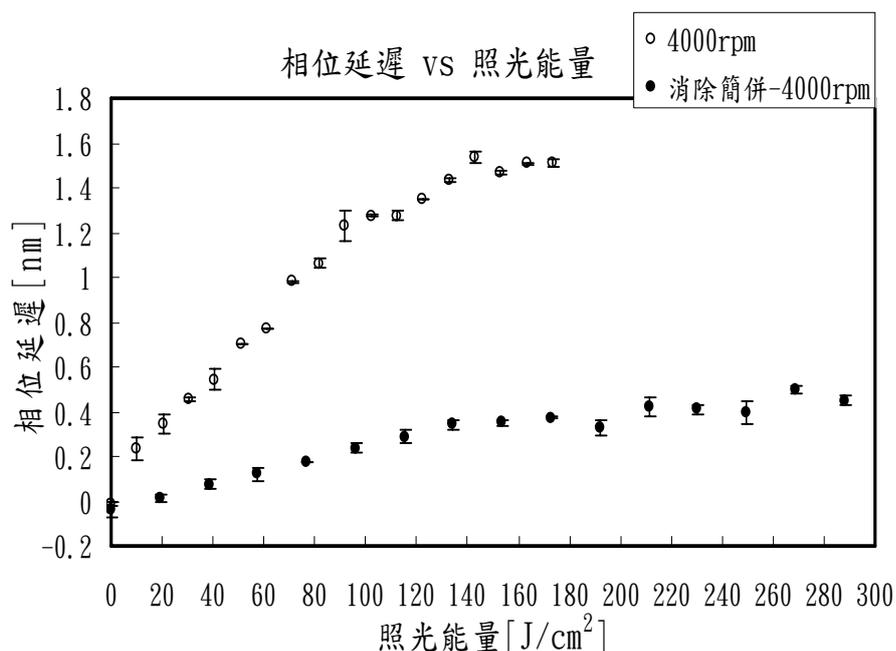


圖 4-14 旋轉塗佈機轉速 4000rpm 之配向膜(RN-1349)在有無消除簡併照光情況下與相位延遲之關係

在塗佈機轉速 4000rpm 情況下，不同的照光條件下所造成的相位延遲也會大不同。在有消除簡併的情況下，即使增加照光能量，樣品的相位延遲不會上升太多，當照光能量累積到 $70\text{J}/\text{cm}^2$ 之後，相位延遲達 0.5nm 左右飽和。在無消除簡併下，累積照光能量到 $140\text{J}/\text{cm}^2$ 其相位延遲才即將到達飽和，其相位延遲可達 1.5nm 。在光配向配向原理中我們了解當配向膜經由第一步照射線偏極紫外光後，特定方向的聚合物會整齊排列，但是此時的液晶分子會有預傾角簡併的現象，而第二照光步驟的非線性紫外光可以消除簡併，使液晶分子排列方向為非偏極化方向垂直的方向。我們推斷在照射非線性偏極光時，會破壞特定方向已經聚合的聚合物，因此當我們量測其相位延遲時，會比無消除簡併照光步驟的樣品其相位延遲低。

我們亦選擇第二步塗佈速度為 2000rpm 及 1000rpm 的 RN-1349 配向膜，進行相同的實驗：消除簡併照光，實驗結果如圖 4-15 及 4-16。

我們也可將三組數據合併一起觀察，如圖 4-17。

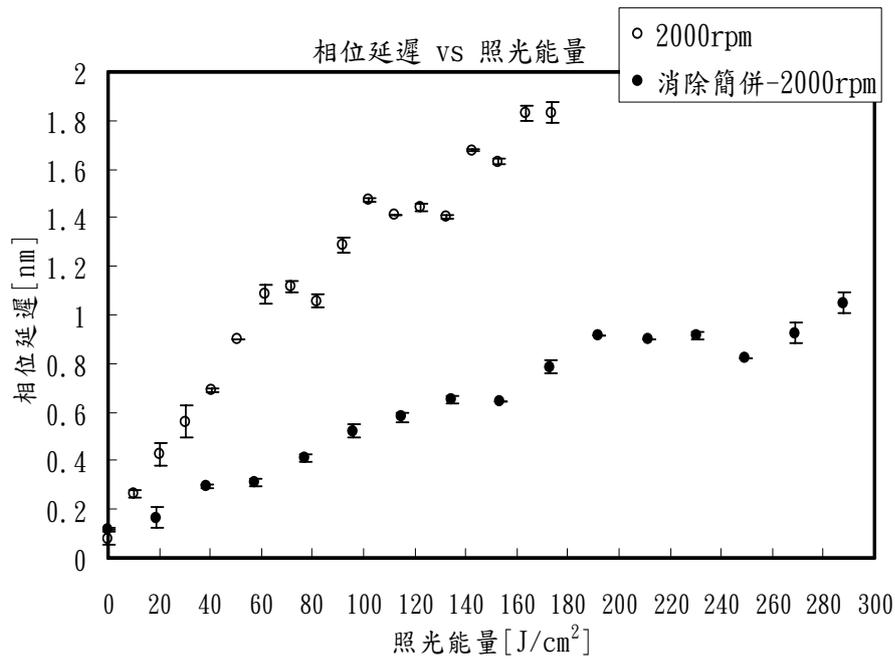


圖 4-15 旋轉塗佈機轉速 2000rpm 之配向膜(RN-1349)在有無消除簡併照光情況下與相位延遲之關係

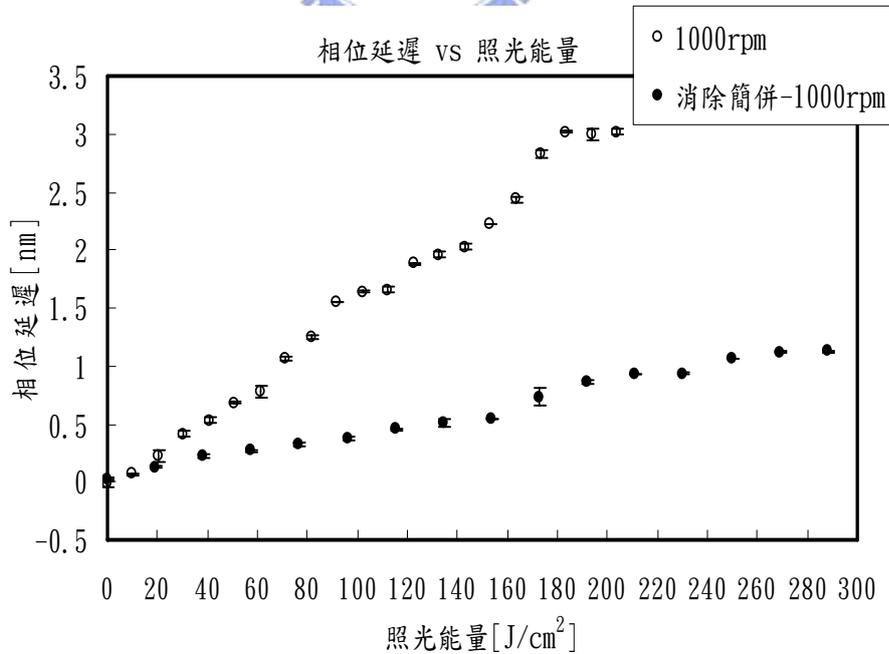


圖 4-16 旋轉塗佈機轉速 1000rpm 之配向膜(RN-1349)在有無消除簡併照光情況下與相位延遲之關係

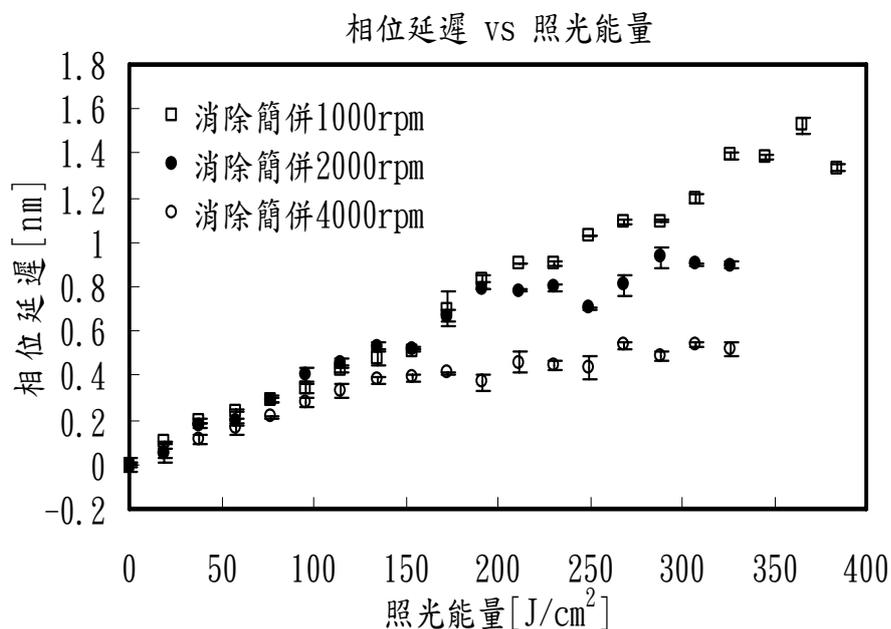


圖 4-17 不同旋轉塗佈機轉速之配向膜(RN-1349)在無消除簡併照光情況下與相位延遲之關係

由圖 4-13 與圖 4-17 可看出，雖然照光步驟不同，但是配向膜相位延遲依然是：轉速 1000rpm > 2000rpm > 4000rpm。再一次驗證膜厚厚的在光配向之中可以引發較大的相位延遲。

III. 膜厚度之影響

我們選擇塗佈在石英玻璃上的配向劑SE-130B當作樣品，控制旋轉塗佈機台的轉速，第一步驟固定 500rpm(15sec)，第二步驟改變四種轉速，分別為 1000rpm、2000rpm、3000rpm、4000rpm(25sec)。進行無消除簡併的照光步驟，每個樣品照射線偏極紫外光十分鐘，累積照光能量為 20J/cm²。結果如圖 4-18：

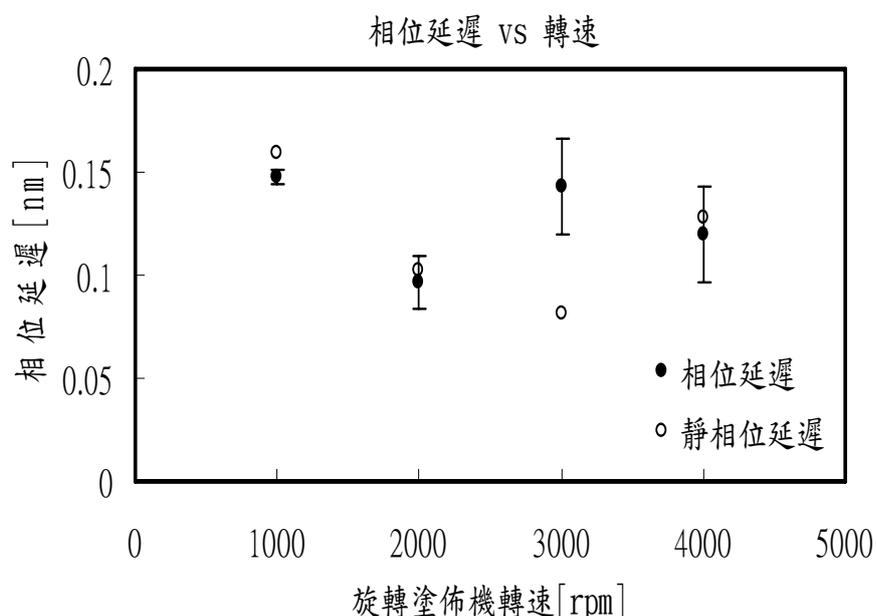


圖 4-18 在相同照光能量下旋轉塗佈機轉速之配向膜(SE-130B)與其相位延遲圖之關係

結果可以看出，SE-130B經過照光十分鐘之後，所形成的相位延遲大約在 0.1nm上下，相對於RN-1349 而言，在照光能量 $20\text{J}/\text{cm}^2$ 之下，所產生的相位延遲大約在 0.4nm左右(如圖 4-13)。由此可以推斷，SE-130B在光配向的技術下，所能產生的相位延遲不如RN-1349，因此推斷SE-130B不適合當作光配向的材料。此外，RN-1349 在經過長時間照光之後，其厚度的影響是很明顯的，但是SE-130B卻不如此，其可能的原因之一是其照光後所產生的相位延遲較小，相對的雜訊與訊號比值會較大，所以不易看出差別。另一可能的原因是照光時間不夠長，尚看不出差別。

4-5 定向強度與相位延遲之關係

I. 摩刷配向之定向強度

我們選擇配向劑塗佈在 ITO 玻璃上的 SE-130B 配向劑，控制第二步塗佈機速度為 4000rpm，改變摩刷配向機台滾輪下壓深度，製作不同下壓深度的液晶盒。實驗結果如圖 4-19。

由 4-3-1 的實驗中可以發現，當下壓深度為 0.3mm~0.4mm 時所引發的相位延遲為最大，而在圖 4-19 中也發現液晶盒此時的定向強度可到達 $2 \times 10^{-4} J/m^2$ 。因此在摩刷配向上，配向膜的相位延遲與液晶盒的定向強度關係上，有一致的效果。推斷可能的原因是因為摩刷配向只是讓配向膜表面的分子產生異方性，因此可與液晶盒的定向強度有一致的關係。

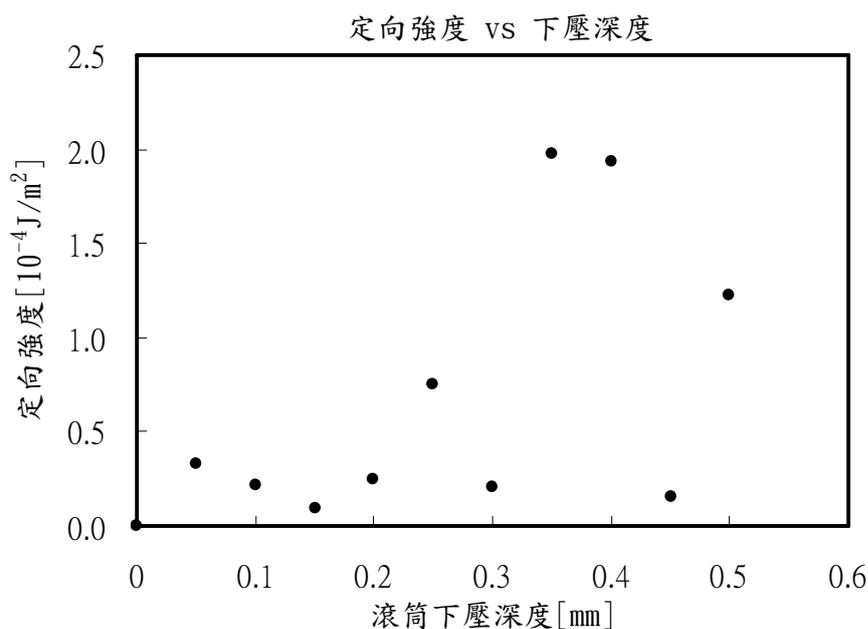


圖 4-19 不同滾筒下壓深度與配向膜(SE-130B)定向強度之關係

II. 光配向之定向強度

選擇配向劑 RN-1349，旋轉塗佈機固定速度為 4000rpm。利用紫外光進行配向，入射偏振紫外光與非偏振光時間比為 5:1。製作液晶樣品，量測在不同照光累積能量下其定向強度。照光能量為兩個照光步驟能量的總合。實驗結果如圖 4-20，圖中的不同符號代表不同樣品的量測值。

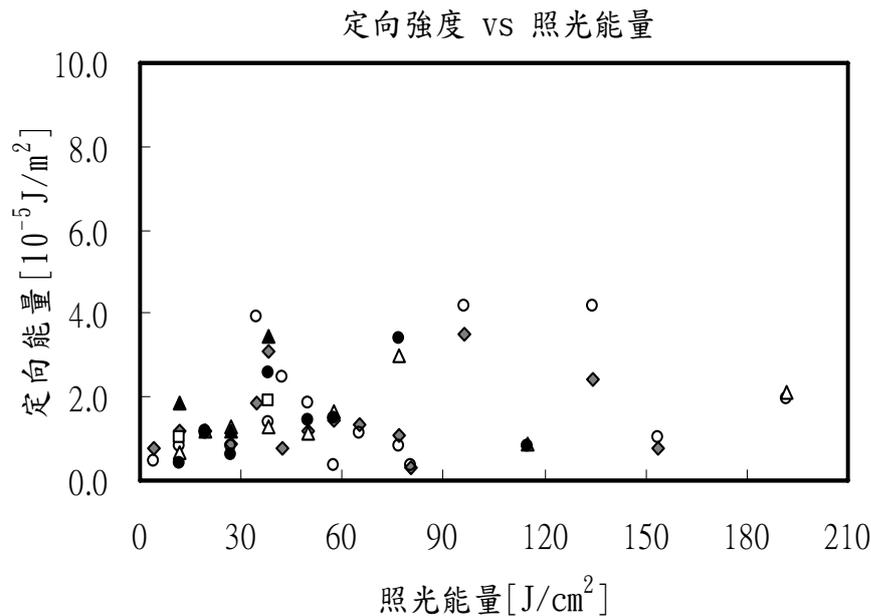


圖 4-20 不同照光能量與配向膜(RN-1349)定向強度之關係

可以觀察出隨著累積照光能量的增加，定向強度有增加的趨勢。當能量增加超過 $30J/cm^2$ 之後，定向強度不會繼續增加。但是在本章的 4-3 II 消除簡併的實驗中，觀察到照光能量超過 $30J/cm^2$ ，相位延遲依然是繼續增加。由此可見對於液晶配向而言，影響的只有配向膜表面的異向性，而深層的分異向性對於液晶配向而言，沒有太大的影響。

將相同累積照光能量下產生的相位延遲與樣品的表面定向強度做圖，如圖 4-21。可以觀察到隨著相位延遲的增加，表面定向強度也隨之增加。但當配向膜相位延遲大於 $0.1nm$ 之後，定向強度只維持在 $1 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5} J/m^2$ 之間。由此可見只有配向膜表面的分子異方性對液晶分子的配向有影響。因此單只觀察配向膜的相位延遲變化，無法直接判

斷何時的相位延遲對於液晶分子的配向具有最大的效果。

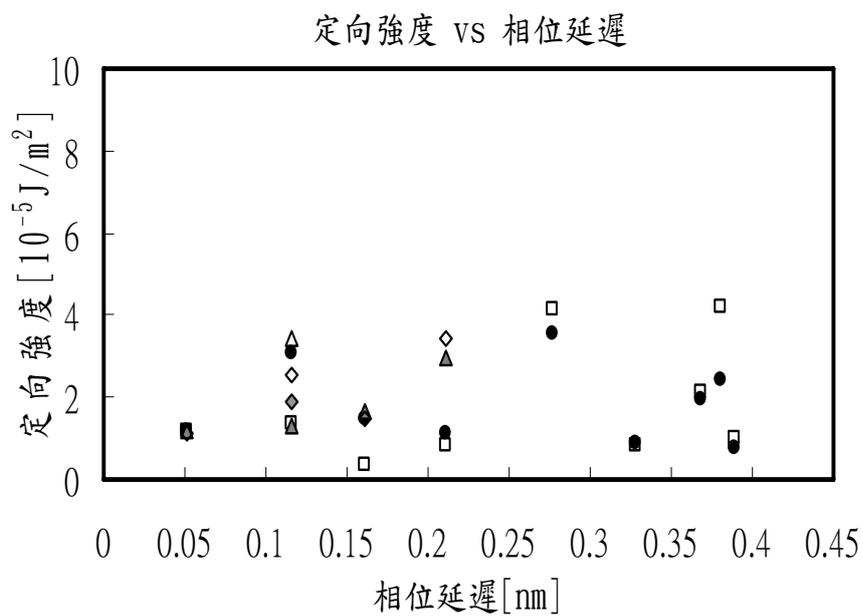


圖 4-21 相位延遲與定向強度之關係



4-6 薩納曼特橢圓儀在液晶樣品上之應用

製作兩種不同液晶樣品：第一種液晶樣品的配向膜有經過線偏極紫外光照射十分鐘、非線性紫外光照射兩分鐘(為有配向)，照光之後組成液晶樣品。第二種液晶樣品的配向膜沒有經過任何配向行為(為無配向)，直接組成液晶樣品。兩個液晶盒灌入的液晶為 E7。之後開始增加照光時間，每次照射線偏極紫外光五分鐘，之後照射非線性偏極光一分鐘，等待平衡之後利用薩納曼特橢圓儀量測液晶樣品的相位延遲。有配向之液晶樣品結果如圖 4-22，無配向之液晶樣品如圖 4-23。

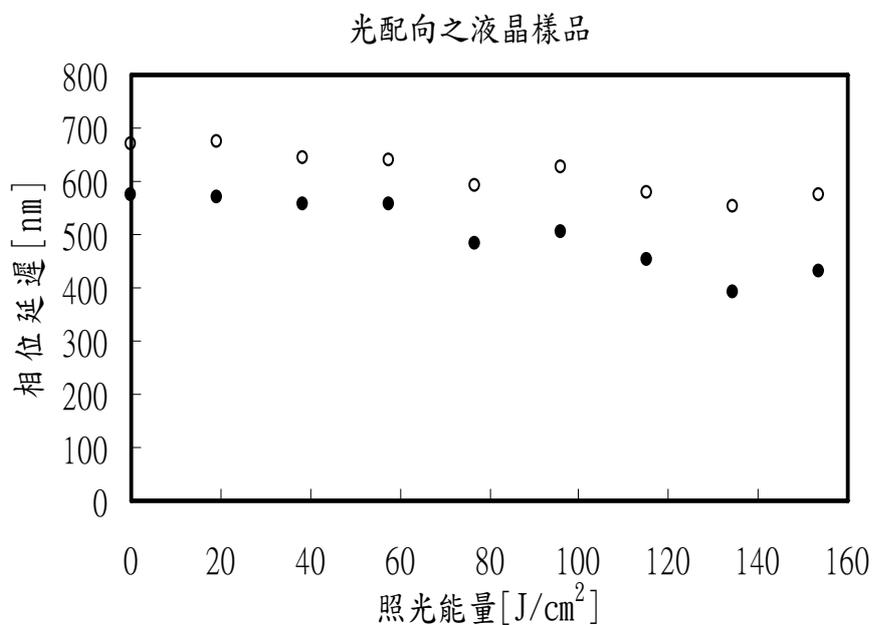


圖 4-22 有預照的液晶樣品其相位延遲隨著照光能量增加的變化

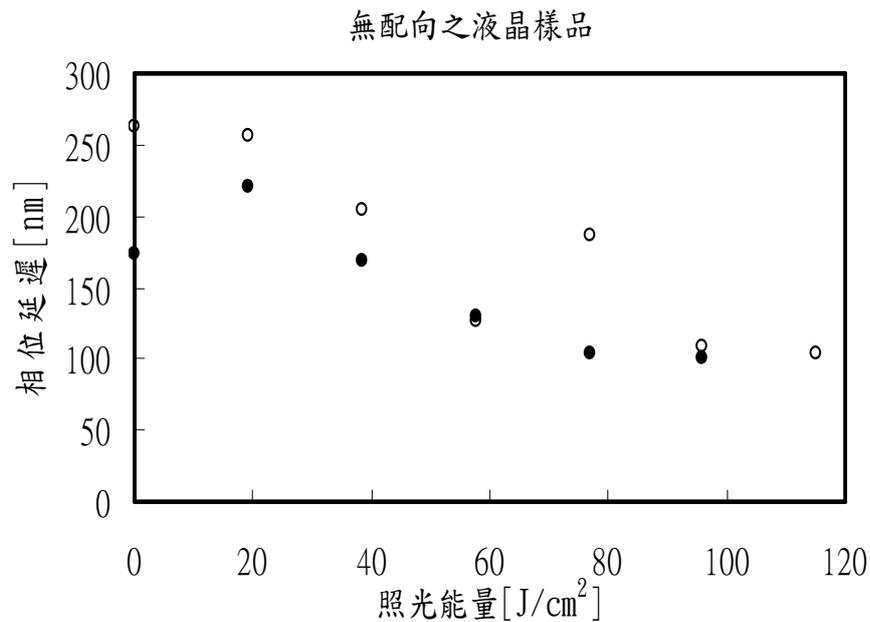


圖 4-23 無預照的液晶樣品其相位延遲隨著照光能量增加的變化

發現有配向的液晶樣品其相位延遲不太會隨著之後照光能量的增加而改變。然而無配向的液晶樣品其相位延遲經過照光能量的增加，其相位延遲改變很大。推斷可能的原因為原本就有配向的液晶樣品，其液晶分子的排列會由原本的配向方向控制，雖然之後增加照光能量，但也無法順利的改變液晶分子的排列方向。而在原本無配向的液晶分子中，液晶分子會有一個大致上的排列方向，因此會有相位延遲。但是由於無配向的關係，在之後照射的線性偏極紫外光及非線性偏振光便會輕易的改變液晶分子排列的方向，這便會造成液晶樣品的相位延遲有很大的改變。

4-7 綜合討論

在本實驗中我們利用了兩種配向方式：摩刷配向及光配向；使用兩種配向劑：SE-130B 及 RN-1349。也利用了旋轉塗佈機控制旋轉速度來控制膜厚。

在摩刷配向中，SE-130B 經由摩刷配向產生的相位延遲在 0.4nm 左右；而摩刷強度的增加會使的配向膜引發的相位延遲增加，其中我們可以藉由增加滾筒下壓深度或是增加摩刷次數來增加摩刷強度。在不刮傷配向膜的前提下，逐漸增加摩刷強度，配向膜相位延遲可穩定上升直到飽和。

在光配向中，RN-1349 經過兩種不同照光步驟皆可產生較大的相位延遲，其中無消除簡併所產生的相位延遲大於有消除簡併的相位延遲，飽和平均值為 2:1。這可能是因為照射非線性偏振光會均勻破壞某些方向排列的聚合物，而使相位延遲降低。此外由於紫外光配向是穿透式的配向行為，因此膜厚的改變可以在累積足夠照光時間之後看出影響，剛開始照光時改變較表層的配向分子鍵結，經過長時間照射之後，可改變更深層配向分子的鍵結。

我們亦將兩種配向劑同時使用在摩刷配向之中，可以看出這兩種配向劑在相同摩刷配向方面皆可產生差不多的相位延遲，代表這兩種配向劑在摩刷配向方法之中皆可以使用。同時也將兩種配向劑使用在光配向之中，發現 SE-130B 與 RN-1349 在同樣的照光條件下，SE-130B 所引發的相位延遲很明顯小於 RN-1349，因此推斷 SE-130B 不太適合利用紫外光來進行配向。

在配向膜之相位延遲與液晶盒定向強度關係中，由於液晶分子的配向只與配向膜表層分子異方性有關，因此在改變配向膜表面分子異方性的摩刷配向中，可以觀察到配向膜相位延遲與定向強度有一致的關

係。因此可利用先得知摩刷配向之最大相位延遲來得到較好的液晶配向樣品。然而在穿透式改變整體配向膜分子的異方性之光配向中，相位延遲的持續增加並不能與液晶盒的定向強度有所對應。

此外薩納曼特橢圓儀也可以利用在量測液晶樣品的相位延遲，發現無配向的液晶樣品可藉由再度光配向行為來使液晶產生相位延遲的改變。因此無配向之液晶樣品可以藉由外在再度照光配向而使液晶分子重新排列，此現象可以由薩納曼特橢圓儀量測出來。



第五章 結論與未來展望

液晶的配向膜往往與液晶樣品的參數有密不可分的關係，在本實驗中，成功的架設薩納曼特橢圓儀系統，可以來量測摩擦配向與光配向之配向膜的相位延遲。並且驗證了液晶樣品的定向強度只與配向膜表面分子的異方性有關。

在不同照光條件下，即有無消除簡併的過程中，兩者的相位延遲明顯相差極大。在光配向的機制中，第二步的非線性偏振光主要是用來消除簡併，平均上來說有消除簡併的相位延遲應該為無消除簡併相位延遲的二分之一，但是結果顯示不是如此。未來可以嘗試進一步研究在兩者不同的照光情形下對於配向膜影響的機制。

在薩納曼特橢圓儀系統中，我們可以嘗試將樣品做垂直光學桌軸心旋轉，將已經配向完畢的配向膜做不同雷射光入射角之相位延遲變化。在入射角與相位延遲關係圖中，我們可以得知配向膜中分子的傾角，而此傾角可能會與液晶分子配向參數中的預傾角有關係[5]！

判別液晶配向的重要參數：表面定向強度(Anchoring Strength)必須要在液晶樣品已經製作完成之後，才能量測以及判別是否為我們所需要的液晶樣品，因此在不斷嘗試找出所需要的液晶樣品之中，往往花許多時間在製作液晶樣品。或許我們可以嘗試將薩納曼特橢圓儀系統改良成為可以即時量測的系統，在配向的過程中，可以即時的量測到當下配向膜的相位延遲，以此來調整配向過程的條件，得到我們所需要最佳的配向膜。

參考文獻

- [1] Minoru Nakamura, *J. Appl. Phys.*, Vol. 52, No. 7, 4561, July 1981.
- [2] O. Yaroshchuk, L. G. Cada, M. Sonpatki, and L.-C. Chien, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 1, 2 July 2001.
- [3] E. Collet: “*Polarized Light*” (Marcel Dekker, New York, 1992).
- [4] M. Nakayama, H. Ohaku, M. Ozeki, H. Koh and Y. Nakagawa: *Dig. 17th Ekisyu Touronkai (Japanese Liquid Crystal Conf.)* (Nihon Kagakukai, Tokyo, 1991) p. 52 [in Japanese].
- [5] Kwan-Young Han, Peter Vetter and Tatsuo Uchida, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 32 (1993) pp.L1242-L1244.
- [6] Hoi-Sing Kwok, Vladimir G. Chigrinov, Hirokazu Takada, Haruyoshi Takatsu, *IEEE/OSA J. DIS. TEC*, Vol.1, No.1, 2005
- [7] 劉育承, ”光彈調變式橢圓偏光儀對扭轉式液晶盒的量測”, 國立交通大學電子物理系碩士論文, 2005.
- [8] D. W. Berreman, *Phys. Rev. Lett.*, 28, pp. 1683-1686, (1972).
- [9] J. M. Geary, J. W. Goodby, A. R. Kmetz, and J. S. Patel, *J. Appl. Phys.* 62, pp.4100-4108, (1987).
- [10] T. Uchida, M. Hirano, and H. Sasaki: *Liq. Cryst.* 5 (1989) 1127.
- [11] Martin Schadt, Klaus Schmitt, Vladimir Kozinkov, and Vladimir Chigrinov, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, 2155, 1992.
- [12] I. Janossy, *Pramana- journal of physics*, Vol. 61, 435, 2003.
- [13] W.M. Gibbons, P. J. Shannon, S. T. Sun, and B. G. Swetlin, *Nature*, Vol. 351, 49, 1991.
- [14] 張忠益, ”紫外光照射光配向膜之方法及性質研究”, 國立交通大學電

- 子物理系碩士班畢業論文, 2001.
- [14] Yukito Saitoh, Alan Lien, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39 (2000)
pp.1743-1746.
- [15] A. Lien, *J. SID 1* (1993) 159.
- [16] Yumiko Sato, Kazutoshi Sato, Tatsuo Uchida, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 31
(1992) pp. L579-L581.
- [17]K. H. Yang, *J. Appl. Phys.*, Vol. 64, 4780, 1988.
- [18]Tea-Feng Lin, Ming-Chao Tsou, and Ru-Pin Pan, *Chin. J. Phys.*, Vol. 43,
NO.6 (2005)
- [19]呂欣穎, ”溝槽配向定向強度對溫度變化之關係”, 國立交通大學電子物
理系碩士班畢業論文, 2003.



附錄 A

四分之一波板(Quarter Waveplate)相位延遲檢測

高階延遲片(Multiple Order Waveplane)之相位延遲會因為工作環境而並非完全可使入射光產生相位延遲為 $\pi/2$ ，可由簡易的方式檢測。將系統裝置擺設如圖 5-1：

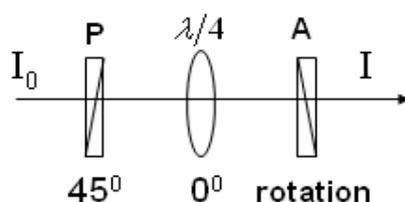


圖 5-1 四分之一波板裝置檢測圖

起偏器與四分之一波板主軸相差四十五度，旋轉檢偏器由偵測器讀取光強度變化。理論上雷射光經過起偏器之後，成為線偏振光入射四分之一波板，但由於偏振光電場方向與四分之一波板主軸相交四十五度，假設為一片理想中的四分之一波板，則出射光會一圓偏振光，所以即使檢偏器旋轉，偵測器所偵測到的光強度不會隨著檢偏器轉的角度而有變化。但經過我們的量測，發現光強度會因為檢偏器旋轉角度而有所改變。利用數學軟體 Mathematica 計算出出射光理論公式：

$$I = \frac{I_0}{2}(1 - \cos(\theta)\cos(\Delta)) \quad (5-1)$$

θ : 檢偏器旋轉角度

Δ : 四分之一波板相位延遲

利用理論公式可以擬合出四分之一波板的相位延遲(Δ)。

附錄 B

四分之一波板(Quarter Waveplate)相位延遲表現

系統裝置一樣如圖 5-1，將四分之一波板裝置在解析度達 0.1 degree 的旋轉鏡架上，嘗試調整四分之一波板與起偏器所夾的角度，改變相差角度(α)由 44 degree~46 degree。旋轉檢偏器利用偵測器量測光強度。當四分之一波板之相位延遲(Δ)為九十度時， α 理論模擬光偵測強度，如圖 5-2。當相位延遲(Δ)並非九十度時(如 88 dergee)，理論模擬為圖 5-3。

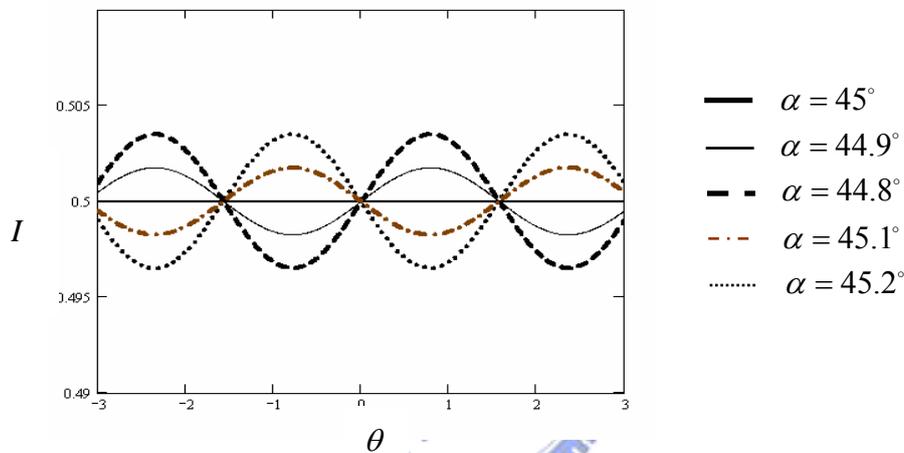


圖 5-2 理論之四分之一波板擺設不同相差角度(α)之下檢偏器旋轉角度與光強度之關係

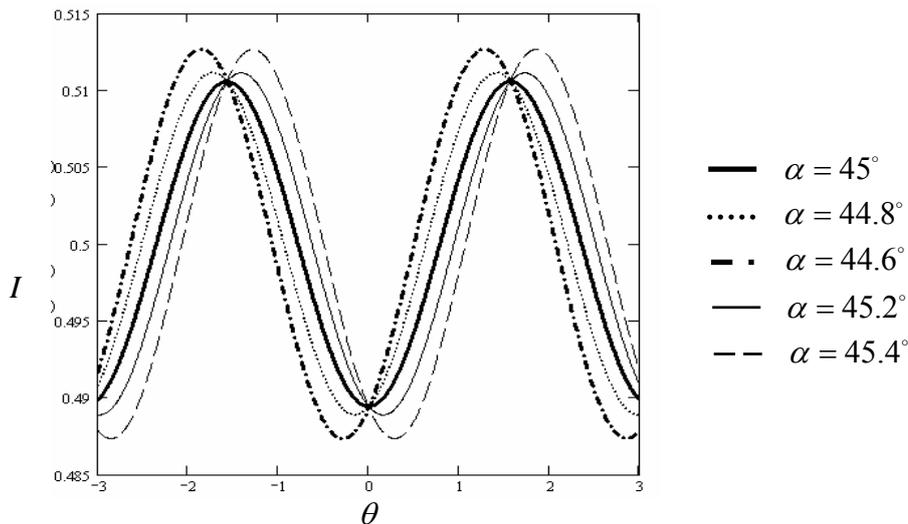


圖 5-3 實際之四分之一波板擺設不同相差角度(α)之下檢偏器旋轉角度與光強度之關係

可以發現當四分之一波板相位延遲(Δ)並非九十度時，每當改變四分之一波板與起偏器所夾的角度(α)時，可以看到光強度的低點值在改變。理論上不同相位延遲所造成的低點偏移現象如圖 5-4。

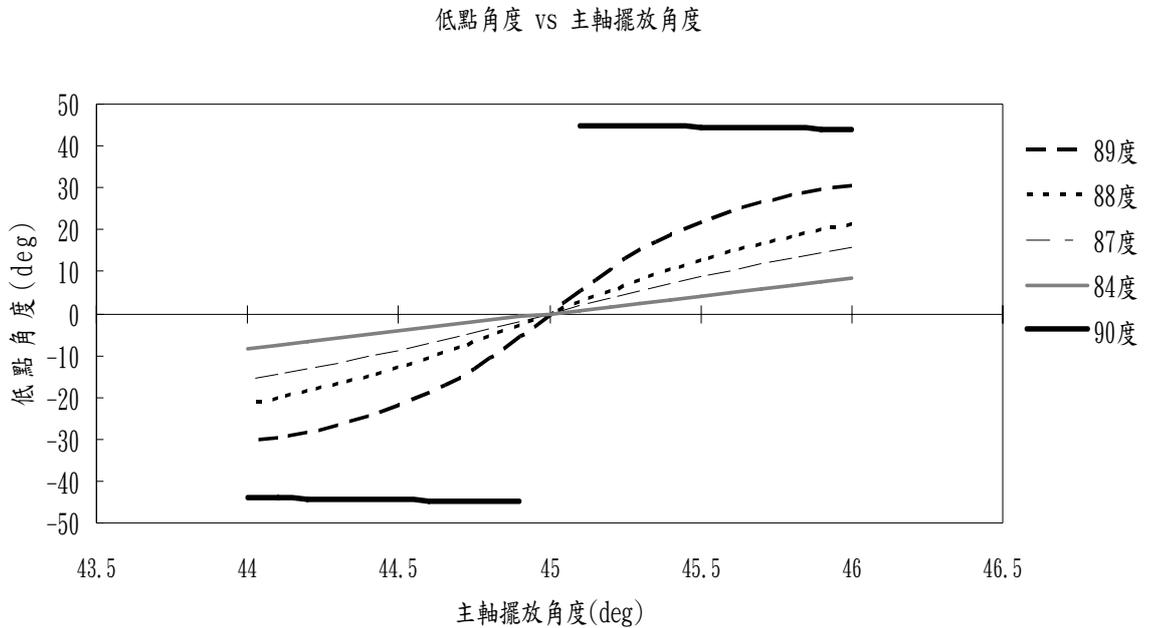
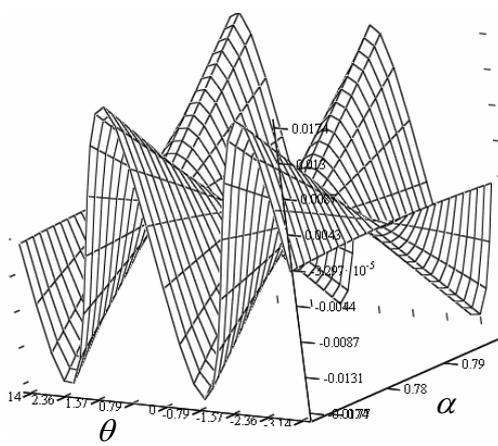
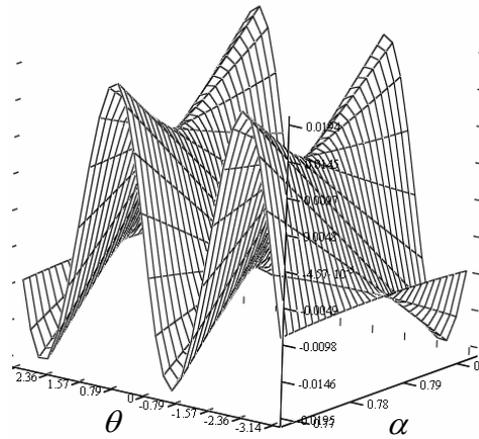


圖 5-4 理論上四分之一波板不同相位延遲(Δ)所造成的光強度低點偏移現象

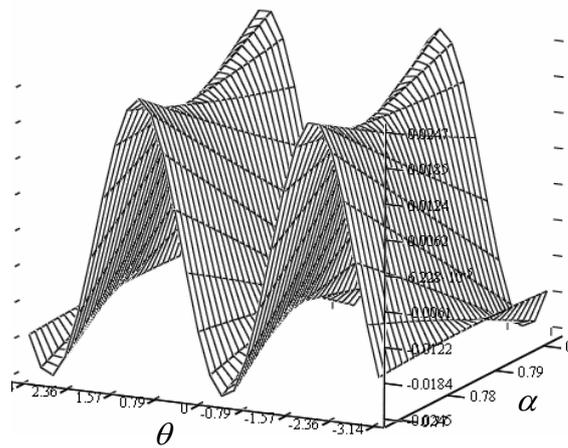
圖中顯示當四分之一波板相位延遲(Δ)為九十度時，光強度低點幾乎沒有移動，然而當相位延遲(Δ)並非九十度時，低點移動十分明顯。但隨著相位延遲變大，低點移動現象漸減。考慮相位延遲(Δ)在不同數值之下，嘗試將三種變數：檢偏器旋轉角度(θ)、四分之一波板主軸擺放偏移角度(α)以及光強度變化在三維的圖形中呈現，如圖 5-5。



$\Delta = 90^\circ$



$\Delta = 89^\circ$



$\Delta = 88^\circ$

圖 5-5 不同相位延遲下檢偏器旋轉角度、四分之一波板主軸擺放偏移角度及光強度變化之關係