

國立交通大學

電子物理系碩士班

畢業論文

液晶於摩刷聚醯亞胺薄膜上之光致重新配向暨
基板溫度對光配向之影響

Photo-realignment of Liquid Crystal on Rubbed Polyimide Film
and the Substrate Temperature Effect on Photo-alignment

研究生：洪國騰

指導教授：趙如蘋 教授

中華民國九十五年七月

液晶於摩刷聚醯亞胺薄膜上之光致重新 配向暨基板溫度對光配向之影響

研究生：洪國騰

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

Nissan RN-1349 一般是用在光配向的配向劑，本實驗證實 Nissan RN-1349 於摩刷配向後仍可利用紫外光改變配向方向。

本實驗的量測發現，於已摩刷的基板進行光致重新配向時，經由摩刷的表面定向強度越強，光致重新配向的效果越差。另外，摩刷過的基板在組成樣品之前先行照光，光致重新配向的效果會比在組成樣品之前未照光好。

玻璃基板進行光配向時，配向膜會吸收入射光源導致溫度上升，由實驗發現，在實驗之溫度範圍(30 ~ 80°C)，液晶的配向參數，如預傾角(pretilt angle)及表面定向強度(surface anchoring strength)，並不會受到溫度的影響。


Photo-realignment of Liquid Crystal on Rubbed Polyimide Film and the Substrate Temperature Effect on Photo-alignment

Student: Guo-Teng Hong

Advisor: Dr. Ru-Pin Pan

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

ABSTRACT



Nissan RN-1349 is usually used as a photoalignment polyimide. In this work we demonstrate that its alignment direction can be changed by irradiating polarized UV light after it has been rubbed. We find that if the rubbed substrates have stronger anchoring, the photo-realignment is more difficult to achieve for both preexposed and non-preexposed substrate. Moreover, if the rubbed substrates are exposed to the polarized UV light before assembling, the photo-realignment will be easier to achieve than those without exposing to polarized UV light before assembling.

When the substrates are under exposure, the polyimide may absorb the energy of light and cause a temperature increasing. In this study, we find that the parameters of the liquid crystal samples, such as pretilt angle and anchoring strength, are not infected by the temperature within the study range, i.e., 30-80°C.

致謝

兩年的碩士生涯一下就過去了，感謝趙如蘋老師在這兩年中對於我研究態度以及實驗方法的指導，實事求是的精神和嚴謹的態度，不僅對於研究上有所幫助，生活上更是獲益良多。

感謝實驗室的雅峰、昭遠、信穎、宗達、卓帆、宇泰、家任以及政達等學長以及佳瑩在我實驗上遇到瓶頸時可以給我建議以及鼓勵；雅峰學長謝謝您總是替我帶來新的影集；信穎總是酷酷的，但和你聊研究以及生活上的事真的很有趣；有卓帆、家任和宇泰在的地方一定會充滿笑聲，感謝他們在我生活以及實驗上的敦敦教誨，不愧是師大的(宇泰是清大)。

感謝實驗室的學弟，俊賢、穎弟、小倩和誌佑，有你們在我才可以專心的做自己的研究，也因為有你們實驗室似乎更有活力了！

感謝我的父母對我的提攜，也慶幸一路走來我並沒有讓他們多操心。謝謝總是關心我身體的哥哥以及經常幫我分憂的姐姐。

最後，謹以此論文獻給我的父親，願我永遠是他心中的驕傲。

目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
致謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	vi
一、緒論.....	1
二、實驗量測原理與系統.....	3
2-1 樣品間隙量測.....	3
2-1-1 量測原理.....	3
2-1-2 量測系統.....	4
2-2 穿透光強度量測.....	4
2-2-1 平行樣品之穿透光強度.....	5
2-2-2 TN 型樣品之瓊斯矩陣.....	6
2-2-3 TN 型樣品之穿透光強度.....	8
2-3 預傾角量測.....	9
2-3-1 量測理論.....	9
2-3-2 系統與量測方法.....	12
2-4 表面定向強度量測.....	12
2-4-1 液晶分子扭轉角的量測原理.....	13
2-4-2 平行樣品加入旋光物質的表面定向強度的理論.....	13
2-4-3 TN 型樣品的表面定向強度理論.....	16
2-4-4 樣品扭轉角量測系統與方法.....	17

三、光配向方法及樣品	18
3-1 基板製作	18
3-1-1 清洗玻璃	18
3-1-2 鍍膜	19
3-2 照光系統與照光步驟	19
3-2-1 照光系統	19
3-2-2 照光步驟	20
3-3 摩刷機台與摩刷條件	20
3-4 液晶樣品製作	21
四、實驗方法與結果	23
4-1 配向劑 Nissan RN-1349 之光配向方向與摩刷配向方向	23
4-1-1 實驗方法	23
4-1-2 實驗結果	23
4-2 光配向時的基板溫度對配向之影響	24
4-2-1 預傾角量測結果	25
4-2-2 表面定向強度量測結果	25
4-3 液晶於摩刷配向膜上之光致重新配向	26
4-3-1 摩刷強度與預照條件	27
4-3-2 摩刷強度與預照對光致重新配向之影響	27
4-3-3 扭轉角簡併之討論	29
4-3-4 光偏振方向及預照對光致重新配向之影響	30
五、結論與未來展望	31
參考文獻	33

圖 表 目 錄

圖 2-1	光入射空樣品示意圖.....	35
圖 2-2	厚度量測系統示意圖.....	35
圖 2-3	樣品間隙穿透光強度變化圖.....	36
圖 2-4	穿透光強度及預傾角量測裝置示意圖.....	36
圖 2-5	平行樣品座標系定義參考圖.....	37
圖 2-6	液晶扭轉角示意圖.....	37
圖 2-7	TN 型樣品座標系定義參考圖.....	38
圖 2-8	起偏器、檢偏器與液晶元件間的關係圖.....	38
圖 2-9	傾角與玻璃基板的關係圖.....	39
圖 2-10	光徑示意圖.....	39
圖 2-11	穿透率 $I(\varphi)$ 對入射角 φ 之模擬圖.....	40
圖 2-12	相位延遲 $\Gamma(\varphi)$ 對入射角 φ 之模擬圖.....	40
圖 2-13	TN 型樣品角度關係圖.....	41
圖 2-14	扭轉角量測系統示意圖.....	41
圖 2-15	穿透光強度 I 與樣品旋轉角度 Ψ_0 關係圖.....	42
圖 2-16	穿透光強度 I 與檢偏器旋轉角度 Ψ_{pol} 關係圖.....	42
圖 3-1	氙燈光譜圖.....	43
圖 3-2	照光系統示意圖.....	43

圖 3-3	溫控制照光系統示意圖.....	44
圖 3-4	光配向劑 RN-1349 吸收譜線圖.....	44
圖 3-5	預傾角簡併示意圖.....	45
圖 3-6	消除預傾角簡併示意圖.....	46
圖 3-7	摩刷機台與摩刷配向示意圖.....	46
圖 3-8	Double Cell 製作流程示意圖.....	47
圖 4-1	紫外光線偏振方向與摩刷配向方向示意圖.....	47
圖 4-2	確定 Nissan RN-1349 光配向方向之照片.....	48
圖 4-3	確定 Nissan RN-1349 摩刷配向方向之照片.....	48
表 4-1	溫度與電阻值對照表.....	49
表 4-2	不同溫度下照光的樣品之預傾角數值表.....	50
圖 4-4	溫度對預傾角影響之關係圖.....	50
表 4-3	不同溫度下照光的樣品之表面定向強度數值表.....	51
圖 4-5	溫度對表面定向強度影響之關係圖.....	51
圖 4-6	光致重新配向實驗示意圖.....	52
表 4-4	光致重新配向實驗數據表(H-90°-P).....	52
表 4-5	光致重新配向實驗數據表(S-90°-P).....	53
表 4-6	光致重新配向實驗數據表(H-90°-N).....	53
表 4-7	光致重新配向實驗數據表(S-90°-N).....	54

圖 4-7	固定光配向方向與摩刷配向方向為 90° 之扭轉角與照光 能量密度關係圖.....	55
圖 4-8(a)	固定光配向方向與摩刷配向方向為 90° 之表面定向強度 與照光能量密度關係圖.....	56
圖 4-8(b)	圖 4-8(a) 之區域放大圖.....	57
表 4-8	光致重新配向實驗數據表(H- 60° -P)	58
表 4-9	光致重新配向實驗數據表(H- 60° -N)	58
表 4-10	光致重新配向實驗數據表(S- 60° -P)	59
表 4-11	光致重新配向實驗數據表(S- 60° -N)	59
圖 4-9	固定光配向方向與摩刷配向方向為 60° 之扭轉角與照光 能量密度關係圖.....	60
圖 4-10(a)	固定光配向方向與摩刷配向方向為 60° 之表面定向強度 與照光能量密度關係圖.....	61
圖 4-10(b)	圖 4-10(a) 之區域放大圖.....	62
圖 4-11	固定沒有預照之扭轉角與照光能量密度關係圖.....	63
圖 4-12	固定沒有預照之表面定向強度與照光能量密度關係圖.....	64
圖 4-13	固定有預照之扭轉角與照光能量密度關係圖.....	65
圖 4-14(a)	固定有預照之表面定向強度與照光能量密度關係圖.....	66
圖 4-14(b)	圖 4-14(a) 之區域放大圖.....	67

第一章 緒論

液晶(liquid crystal ,LC)於西元 1888 年被奧地利植物學家 F.Reinitzer 發現，隔年德國物理學家 O.Lehmann 利用偏光顯微鏡觀察液晶時看到了奇妙的現象，因而發現液晶具有異方性(anisotropy)所特有的雙折射性質(birefringence)，因而也開啟了液晶多采多姿的世界，至今液晶發展已經一百多年的歷史，液晶已經變成人人耳熟能詳的名詞，液晶相關的光電產品也已經普遍存在我們生活週遭。

對於液晶，無論學術研究或是工業產品的應用，都需要一種機制來使液晶分子產生有序的排列，此種機制我們稱之為配向(alignment)，目前已有許多的配向技術，如：在聚醯亞胺 (PI ,Polyimide) 上摩刷配向 (Rubbing alignment) 法[1]、傾斜蒸著氧化矽法[2]、離子束傾斜轟擊法[3]、以線性偏振紫外光照射有感光基的配向劑[4]等等。

目前最廣為使用配向方法為摩刷配向 (Rubbing alignment) 法，但是在摩刷的過程中，由於利用絨布進行接觸式的摩擦，因此會產生靜電和顆粒的污染，而這些污染容易造成液晶元件的損壞，因此非接觸式的配向方法之研究也是如火如荼的展開，以避免靜電及顆粒等污染。其中最被大家所熟知的非接觸式配向方法為以線性偏振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(photoalignment)。

本實驗所使用的光配向劑為 NISSAN RN-1349，為一種聚合物

(polyimide)，未處理前光配向劑是由許多單體的小分子(monomer)所組成的巨大物質，經過加熱後進行聚合作用(polymerization)而使小分子間鍵結為大分子，我們稱此加熱的動作為硬烤，RN-1349 的硬烤溫度為 250°C。

配向膜經過硬烤之後，在將鍍上配向膜的基板拿到紫外光下曝光進行配向。配向膜吸收了線性偏振紫外光時，鍵結成大分子的配向膜沿著線性偏振方向的鍵結會被打斷，因此液晶就會順著尚未被打斷鍵結的長軸分子排列，也就是液晶的配向方向會沿著基板且垂直於偏振光。進行光配向時，我們可以藉由改變照光的能量，線性偏振紫外光的入射角度等，來調變液晶的配向參數，如預傾角以及表面定向強度。

本實驗的目的有二，第一部分為研究進行光配向時配向膜的溫度是否會影響到液晶的配向參數，另一部分是研究在摩刷配向的樣品上進行光配向，是否仍可以由照光的方式調變液晶配向。

在第二章中，將介紹液晶樣品的基本量測理論及系統，如樣品間隙(cell gap)、預傾角、穿透光強度以及表面定向強度；第三章我們將介紹光配向原理、照光系統以及液晶樣品的製作；第四章將討論到我們實驗的方法以及所得到的實驗數據以及結果；第五章會對本實驗作一個結論並且提出未來的研究方向。

第二章 實驗量測原理與系統

本章所介紹的內容，為本論文題目進行研究時，所用到的基本量測原理以及量測時所使用的系統，包含樣品間隙 (cell gap)、液晶樣品穿透光強度、預傾角 (pretilt angle) 和表面定向強度 (surface anchoring strength)。

2-1 樣品間隙量測

在表面定向強度的量測時，需要預先知道樣品間隙這個參數。再者，本實驗的液晶樣品在製作時，會使用一些已知厚度的薄墊片夾於兩片玻璃基板中間，以利控制樣品間隙，但是玻璃表面或是薄墊片的平整度皆會影響到間隙的大小，這也是我們必須事先再確認一次的原因。



2-1-1 量測原理[5]

如圖 2-1，入射的雷射光可以看成許多相互平行之光入射，利用雷射光在旋轉的空樣品 (empty cell) 多次反射，由其光程差的建設性與破壞性干涉產生的週期震盪圖形，即可求出樣品間隙的大小。

公式推導如下：

$$\begin{aligned}\delta(\text{光程差}) &= \frac{2d}{\cos\theta} - 2d \tan\theta \sin\theta \\ &= \frac{2d}{\cos\theta} (1 - \sin^2\theta) \\ &= 2d \cos\theta\end{aligned}\tag{2-1-1}$$

當光程差為波長的整數倍時，產生建設性干涉。若入射角為 θ_1 與 θ_2 時均為建設性干涉，即有穿透極大值時：

$$\begin{aligned} 2d \cos \theta_1 &= m_1 \lambda \\ 2d \cos \theta_2 &= m_2 \lambda \end{aligned} \quad m_1, m_2 \text{ 均為整數} \quad (2-1-2)$$

$$m_1 \lambda - m_2 \lambda = \Delta m \lambda = 2d \cos \theta_2 - 2d \cos \theta_1 \quad (2-1-3)$$

$$d = \frac{\Delta m \lambda}{2(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)} \quad (2-1-4)$$

2-1-2 量測系統

樣品間隙的量測之系統基本架構如圖 2-2，將欲量測間隙之空樣品放至於旋轉平台(rotation stage)上，記錄穿透光強度及相對應的旋轉平台之旋轉角度，即可得到類似圖 2-3 般的數據圖，從圖中任意選取兩穿透極大值，讀取對應之角度 θ_1 、 θ_2 ，並計算此二極大值間的波谷值數目 Δm ，帶入式子(2-1-4)中即可得到空樣品的間隙值大小。

2-2 穿透光強度量測

在任一液晶樣品之量測實驗中，我們最後得到的數值是雷射光經過各種光學元件及液晶樣品之後的結果，因此了解穿透率之理論也有助於進一步對實驗的了解，如預傾角以及表面定向強度的量測中，都會利用到穿透光強度的理論。

在進行本論文題目之實驗時，所用到的液晶樣品有兩種，分別為平行樣品及 TN(twist nematic)型樣品，平行樣品為上下兩片玻璃基板之配向方向反平行(anti-parallel)，TN 型樣品則是兩片玻璃基板的配向方向不平行，致使液晶於樣品中有扭轉的現象。

進行實驗時，通常我們會將液晶樣品放在一組正交的偏振片(cross polarizers)中，如圖 2-4。下面將會分別介紹此兩種樣品在光學系統中穿透光之理論。

2-2-1 平行樣品之穿透光強度

接下來的理論推導我們將會利用瓊斯矩陣(Jones matrix)，首先定義起偏器(polarizer)的偏振方向為原始座標系 XY 的 X 軸，如圖 2-5 所示，圖中液晶分子之長軸與 X 軸夾一角度 θ ，所以我們在液晶的長軸方向定義一個新的座標系 $X'Y'$ 。當光通過起偏器之後電場的偏振方向為：

$$E_p = \begin{pmatrix} E_X \\ E_Y \end{pmatrix} = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_{XY} \quad (2-2-1)$$

接著將電場分量由 XY 座標系轉換到 $X'Y'$ 座標系，座標轉換可以利用旋轉矩陣 R 來達成，其形式為：

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2-2-2)$$

$$E'_p = R(\theta)E_p = E_0 \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2-2-3)$$

$$\Rightarrow E'_p = E_0 \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix}_{X'Y'} \quad (2-2-4)$$

液晶樣品對於電場的效應等同於一個相位延遲器，因此電場分量通過液晶樣品可以表示為：

$$E'_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} e^{in_e kd} & 0 \\ 0 & e^{in_o kd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ -\sin \theta \end{pmatrix} \quad (2-2-5)$$

$$\Rightarrow E'_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} e^{in_e kd} \cos \theta \\ -e^{in_o kd} \sin \theta \end{pmatrix}_{X'Y'} \quad (2-2-6)$$

接著將 E'_{LC} 由 $X'Y'$ 座標系轉換回 XY 座標系：

$$E_{LC} = R(-\theta)E'_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{in_e kd} \cos \theta \\ -e^{in_o kd} \sin \theta \end{pmatrix} \quad (2-2-7)$$

$$\Rightarrow E_{LC} = E_0 \begin{pmatrix} e^{in_e kd} \cos^2 \theta + e^{in_o kd} \sin^2 \theta \\ e^{in_e kd} \cos \theta \sin \theta - e^{in_o kd} \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix}_{XY} \quad (2-2-8)$$

最後電場經過檢偏器(analyzer)可以寫成：

$$E_A = E_0 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{in_e kd} \cos^2 \theta + e^{in_o kd} \sin^2 \theta \\ e^{in_e kd} \cos \theta \sin \theta - e^{in_o kd} \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2-2-9)$$

$$\Rightarrow E_A = E_0 \begin{pmatrix} 0 \\ e^{in_e kd} \cos \theta \sin \theta - e^{in_o kd} \sin \theta \cos \theta \end{pmatrix}_{XY} \quad (2-2-10)$$

所以雷射光經過整個光學系統之後只剩下 Y 分量到達光檢器(photo detector)

$$\vec{E}_A = E_0 (e^{in_e kd} \cos \theta \sin \theta - e^{in_o kd} \sin \theta \cos \theta) \hat{y} \quad (2-2-11)$$

$$\vec{E}_A = E_0 e^{i\bar{n}kd} \sin \theta \cos \theta \left(e^{i\frac{\Delta n}{2}kd} - e^{-i\frac{\Delta n}{2}kd} \right) \hat{y} \quad (2-2-12)$$

$$\vec{E}_A = E_0 e^{i\bar{n}kd} \sin \theta \cos \theta \left(2i \sin \frac{\Delta n kd}{2} \right) \hat{y} \quad (2-2-13)$$

$$\bar{n} = \frac{n_e + n_o}{2}, \quad \Delta n = n_e - n_o$$

因此光檢器所偵測到的光強度為：

$$I = |\vec{E}_A|^2 = I_0 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \quad (2-2-14)$$

$$\Gamma(\text{相位延遲}) = \Delta n kd = \Delta n \frac{2\pi}{\lambda} d \quad (2-2-15)$$

2-2-2 TN 型樣品之瓊斯矩陣[6][7]

考慮一 TN 型之液晶樣品，如圖 2-6 所示，液晶於樣品中扭轉了 ϕ 角度，現在我們沿著 \hat{Z} 軸將液晶切割成 N 層相同厚度的薄層，假設每一層液晶所扭轉的角度為線性連續，因此每一液晶薄層的相位延遲可以表示成 Γ/N ，而每一層之扭轉角大小為 $\rho = \phi/N$ ，且沿著 z 軸每層液晶扭轉之方位角(azimuth angle)表示為：

$$\psi(z) = \beta z \quad (2-2-16)$$

$$\beta = \text{Constant}$$

$$\phi = \psi(d) = \beta d \quad (2-2-17)$$

TN 型液晶樣品的瓊斯矩陣可以寫成 N 層液晶薄層作用的結果，表示為：

$$E_{TN} = \prod_{m=1}^n R(-m\rho) E_{phase} R(m\rho) \quad (2-2-18)$$

$$E_{phase} = \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma}{2N}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma}{2N}} \end{pmatrix} \quad (2-2-19)$$

由於 $\rho = \phi/N$ 且 $R(\psi_1) R(\psi_2) = R(\psi_1 + \psi_2)$ ，則(2-2-18)式可以寫成

$$E_{TN} = R(-\phi) \left[E_{phase} R\left(\frac{\phi}{N}\right) \right]^N \quad (2-2-20)$$

$$E_{TN} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \frac{\phi}{N} e^{-i\Gamma/2N} & \sin \frac{\phi}{N} e^{-i\Gamma/2N} \\ -\sin \frac{\phi}{N} e^{-i\Gamma/2N} & \cos \frac{\phi}{N} e^{i\Gamma/2N} \end{pmatrix}^N \quad (2-2-21)$$

為了簡化(2-2-21)式，要使用到 Chebyshev's identity：

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}^m = \begin{pmatrix} \frac{A \sin mZ - \sin(m-1)Z}{\sin Z} & \frac{B \sin mZ}{\sin Z} \\ \frac{C \sin mZ}{\sin Z} & \frac{D \sin mZ - \sin(m-1)Z}{\sin Z} \end{pmatrix} \quad (2-2-22)$$

$$Z = \cos^{-1} \left[\frac{1}{2}(A+D) \right]$$

考慮將 TN 型液晶樣品切割成無限多層 ($N \rightarrow \infty$)，則(2-2-21)式可以寫成

$$E_{TN} = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos X - i \frac{\Gamma \sin X}{2X} & \phi \frac{\sin X}{X} \\ -\phi \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma \sin X}{2X} \end{pmatrix} \quad (2-2-23)$$

$$X = \sqrt{\phi^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2}$$

$$\Rightarrow E_{TN} = \begin{pmatrix} p+iq & r+is \\ -r+is & p-iq \end{pmatrix} \quad (2-2-24)$$

$$p = \frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\phi\sqrt{1+u^2}) \sin\phi + \cos(\phi\sqrt{1+u^2}) \cos\phi$$

$$q = \frac{u}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\phi\sqrt{1+u^2}) \cos\phi \quad (2-2-25)$$

$$r = \frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\phi\sqrt{1+u^2}) \sin\phi - \cos(\phi\sqrt{1+u^2}) \sin\phi$$

$$s = \frac{u}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\phi\sqrt{1+u^2}) \sin\phi$$

$$u = \frac{\pi d}{\lambda \phi} \Delta n_{96}$$

d：樣品間隙

Δn ：液晶的雙折射率(Birefringence)

λ ：入射光波長

ϕ ：液晶扭轉角(twist angle)

2-2-3 TN 型樣品之穿透光強度[7]

下面要介紹把 TN 型樣品放置於一組偏振片間(如圖 2-4) 此時的穿透光強度。同樣定義起偏器的偏振方向為原始座標系 XY 的 X 軸，如圖 2-7， \hat{n} 為第一層液晶分子方向矢(director)，入射光沿 \hat{Z} 軸

入射紙面，則通過此光學系統之出射電場可以表示為：

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = E'_A E'_{TN} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2-2-26)$$

其中 E'_{TN} 和 E'_A 分別為 TN 型樣品和檢偏器的瓊斯矩陣：

$$\begin{aligned} E'_{TN} &= R(-\Psi_0) E_{TN} R(\Psi_0) \\ E'_A &= R(-\Psi_{pol}) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} R(\Psi_{pol}) \end{aligned} \quad (2-2-27)$$

Ψ_{pol} 為起偏器與檢偏器的夾角，而 Ψ_0 為第一層液晶分子方向矢(director)與起偏器的夾角，相對角度關係如圖 2-8。由(2-2-26)與(2-2-27)式，則穿透光強度：

$$\begin{aligned} I &= \left[\frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin(\varphi\sqrt{1+u^2}) \sin(\varphi - \Psi_{pol}) \right. \\ &\quad \left. + \cos(\varphi\sqrt{1+u^2}) \cos(\varphi - \Psi_{pol}) \right]^2 \\ &\quad + \frac{u^2}{1+u^2} \sin^2(\varphi\sqrt{1+u^2}) \cos^2(\varphi + 2\Psi_0 - \Psi_{pol}) \end{aligned} \quad (2-2-28)$$

2-3 預傾角量測

液晶分子的光軸 (optic axis) 與玻璃基板表面所夾的角稱為預傾角。預傾角的大小會影響到液晶樣品的表現。具有小預傾角的液晶樣品會有光散射的效應，具有大預傾角的液晶樣品具有干涉的色彩和較小的樣品電容值，因此預傾角的量測是非常重要的。

2-3-1 量測理論[8]

液晶分子可以視為一個長形的單軸分子，且具有雙折射 (Birefringence) 性質，因此入射光進入到液晶樣品中時，入射光會分為兩道光：尋常光(ordinary ray, 簡稱o-ray)和非尋常光(extraordinary ray, 簡稱e-ray)，液晶分子對應此兩道光的折射率分別為 n_o 與 $n_{eff}(\theta_{eff})$ ，

θ_{eff} 為e-ray行進方向與液晶分子光軸(optic axis)所夾的角(參考圖 2-9)。

首先推導這兩道光的相位延遲(phase retardation)。在考慮預傾角的情形下，圖 2-10 為單層液晶的光徑圖，其中，

$$\begin{aligned}\hat{n} &= (0 \quad \cos\alpha \quad \sin\alpha) \\ \hat{k} &= (0 \quad \sin\varphi \quad \cos\varphi) \\ \hat{k}_e &= (0 \quad \sin\varphi_e \quad \cos\varphi_e) \\ \hat{k}_o &= (0 \quad \sin\varphi_o \quad \cos\varphi_o)\end{aligned}\quad (2-3-1)$$

\hat{n} = 液晶分子的光軸單位向量

\hat{k} = 入射光的波數

\hat{k}_e = 非尋常光(e-ray)的波數

\hat{k}_o = 尋常光(o-ray)的波數

又 \hat{n} 與 \hat{k}_e 的夾角為 θ_{eff} ，則由此兩向量的內積可得

$$\cos\theta_{eff} = \hat{n} \cdot \hat{k}_e = (\cos\alpha \sin\varphi_e + \sin\alpha \cos\varphi_e) \quad (2-3-2)$$

又在折射邊界，入射光與折射光需滿足 Snell's Law，則可得：

$$\sin\varphi = n_{eff} \sin\varphi_e = n_o \sin\varphi_o \quad (2-3-3)$$

由於考慮預傾角的存在，液晶分子長軸與入射光行進方向夾角並不是 90° ，而是 θ_{eff} ，因此對於o-ray和e-ray所看到的折射率為：

$$\begin{aligned}n_o &= n_o \\ n_{eff}(\theta_{eff}) &= \left(\frac{\sin^2\theta_{eff}}{n_e^2} + \frac{\cos^2\theta_{eff}}{n_o^2} \right)^{-1/2}\end{aligned}\quad (2-3-4)$$

由圖 2-10，o-ray 由 A→B 的光程為：

$$OPL_{o-ray} = n_o \frac{d}{\cos\varphi_o} \quad (2-3-5)$$

e-ray 由 A→B' 的光程為：

$$OPL_{e-ray} = \left[n_{eff}(\theta_{eff}) \frac{1}{\cos\varphi_e} + (\tan\varphi_o - \tan\varphi_e) \sin\varphi \right] d \quad (2-3-6)$$

由 (2-2-5)、(2-2-6) 可知 o-ray 與 e-ray 的光程差為：

$$\begin{aligned}\delta &= OPL_{o\text{-ray}} - OPL_{e\text{-ray}} \\ &= \left[\frac{n_{\text{eff}}(\theta_{\text{eff}})}{\cos \varphi_e} + (\tan \varphi_o - \tan \varphi_e) \sin \varphi - \frac{n_o}{\cos \varphi_o} \right] d\end{aligned}\quad (2-3-7)$$

由 (2-2-2) 、 (2-2-3) 、 (2-2-4) 將 $n_{\text{eff}}(\theta_{\text{eff}})$ 以 n_e 、 n_o 、 α 、 φ 代換，則此兩道光的相位差為：

$$\begin{aligned}\Gamma(\varphi) &= \frac{2\pi}{\lambda} \delta \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot f(\alpha, \varphi)\end{aligned}\quad (2-3-8)$$

其中

$$\begin{aligned}f(\alpha, \varphi) &= \frac{1}{c^2} (a^2 - b^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \varphi \\ &\quad + \frac{1}{c} \left(1 - \frac{a^2 b^2}{c^2} \sin^2 \varphi \right)^{\frac{1}{2}}\end{aligned}\quad (2-3-9)$$

$$\begin{aligned}a &= \frac{1}{n_e}, \quad b = \frac{1}{n_o}, \\ c^2 &= a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha\end{aligned}$$

由上節討論得到 (2-2-14)

$$I = |\bar{E}_A|^2 = I_0 \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)$$

為量測穿透率之變化，將液晶樣品置於一對正交的偏振片間，如圖 2-4，並使起偏器之偏振方向與液晶配向方向夾 45° ，則穿透強度可改寫為：

$$I(\varphi) = I_0 \sin^2\left(\frac{\Gamma(\varphi)}{2}\right)\quad (2-3-10)$$

將所量測到的穿透光強度 $I(\varphi)$ 對 φ 作圖，其如圖 2-11，可得到一個對稱角度 φ_x ，此角度就是最大相位延遲時的入射角，因此將相位延遲 $\Gamma(\varphi)$ 對 φ 微分：

$$\left. \frac{d\Gamma(\varphi)}{d\varphi} \right|_{\varphi_x} = 0 \quad (2-3-11)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{2\pi}{\lambda} d \left[\frac{1}{c^2} (a^2 - b^2) \sin \alpha \cos \alpha \cos \varphi_x \right. \\ \left. - \frac{a^2 b^2}{c^3} \cos \varphi_x \sin \varphi_x \left(1 - \frac{a^2 b^2}{c^2} \sin^2 \varphi_x \right)^{-1/2} \right. \\ \left. + b \cos \varphi_x \sin \varphi_x \left(1 - b^2 \sin^2 \varphi_x \right)^{-1/2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (2-3-12)$$

n_e 為液晶分子的非尋常折射率（extraordinary refractive index）， n_o 為液晶分子的尋常折射率（ordinary refractive index）， φ_x 為有最大相位延遲的入射角，也就是 $T(\varphi)$ 對 φ 作圖中的對稱點，如圖 2-12。將 φ_x 代入 (2-4-14)，因 n_e 、 n_o 均已知，解此方程式即可得到預傾角 α 。

2-3-2 系統與量測方法

預傾角的量測方法有許多種，包括最大相位延遲法(crystal rotation method)、電容法(capacitive method)以及磁場法(magnetic null method)。本實驗中使用最大相位延遲法(crystal rotation method)。

預傾角的量測系統如圖 2-4，樣品放置在一對正交的偏振片之間，且偏振片的偏振方向分別與水平面夾 45° 。樣品為平行配向，且配向方向沿水平面擺放，至於旋轉平台上。

2-4 表面定向強度量測

藉由量測液晶樣品的表面定向強度，可以了解到配向膜對於液晶配向能力的好壞，當我們對於配向膜或是配向方法進行研究時，量測表面定向強度可以知道配向膜之於液晶的影響為何，是相當方便的工具。

2-4-1 液晶分子扭轉角的量測原理[9]

我們量測表面定向強度時所用的樣品，為平行樣品加入具有旋光分子的液晶，並放置於一對正交偏振片之間，此光學系統的穿透光強度與之前提到的 TN 型樣品相同，即為(2-2-28)式：

$$I = \left[\frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin\left(\phi\sqrt{1+u^2}\right) \sin(\phi - \Psi_{pol}) + \cos\left(\phi\sqrt{1+u^2}\right) \cos(\phi - \Psi_{pol}) \right]^2 + \frac{u^2}{1+u^2} \sin^2\left(\phi\sqrt{1+u^2}\right) \cos^2(\phi + 2\Psi_0 - \Psi_{pol})$$

ϕ = 液晶分子的扭轉角度(twist angle)

Ψ_0 = 起偏器偏振方向與第一層液晶的夾角

Ψ_{pol} = 起偏器偏振方向與檢偏器偏振方向的夾角

欲得到穿透率 I 為最小值時，由 (2-2-28) 須滿足下列兩關係式：

$$\phi + 2\Psi_0 - \Psi_{pol} = \pm \frac{\pi}{2} \quad (2-4-1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin\left(\phi\sqrt{1+u^2}\right) \sin(\phi - \Psi_{pol}) + \cos\left(\phi\sqrt{1+u^2}\right) \cos(\phi - \Psi_{pol}) = 0 \quad (2-4-2)$$

若液晶樣品旋轉 $\Delta\Psi$ ，為了滿足(2-4-1)，必須令檢偏器旋轉的角度為液晶樣品旋轉角度的兩倍。則：

$$\phi + 2(\Psi_0 + \Delta\Psi) - (\Psi_{pol} + 2\Delta\Psi) = \phi + 2\Psi_0 - \Psi_{pol} = \pm \frac{\pi}{2} \quad (2-4-3)$$

再根據(2-4-2)式求出液晶扭轉角 ϕ 即可。

2-4-2 平行樣品加入自旋物質的表面定向強度的理論[10]

量測表面定向強度的樣品為是在空樣品(上下玻璃基板配向方向為反平行)內加入摻雜自旋添加物(chiral dopant)的向列型液晶(nematic liquid crystal)，而形成一類似 TN 型液晶樣品，考慮液晶樣品

內單位面積上的自由能，除了液晶因為扭轉而造成的形變能 (distortion energy) F_d 之外，尚需要考慮液晶分子與玻璃基板之間的表面自由能(surface anchoring energy) F_s 。

上面提到，我們將向列型液晶摻雜自旋添加物，因為自旋添加物的關係，向列型液晶變成另外一種稱為膽固醇型液晶(cholesterics)，其自由形變能量密度(distortion free energy density)可以寫成：

$$F'_d = \frac{1}{2}K_1(\bar{\nabla} \cdot \hat{n})^2 + \frac{1}{2}K_2(\hat{n} \cdot \bar{\nabla} \times \hat{n} + q_0)^2 + \frac{1}{2}K_3(\hat{n} \times \bar{\nabla} \times \hat{n})^2 \quad (2-4-4)$$

若我們考慮單純扭轉的情形，則

$$\begin{aligned} n_x &= \cos \theta(z) \\ n_y &= \sin \theta(z) \\ n_z &= 0 \end{aligned} \quad (2-4-5)$$

因此(2-4-4)式可以寫成

$$F'_d = \frac{1}{2}K_2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} - q_0 \right)^2 \quad (2-4-6)$$

將(2-4-6)式對 z 軸積分則可得自由形變能

$$F_d = \frac{1}{2}K_2 \int_0^d \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} - q_0 \right)^2 dz \quad (2-4-7)$$

(2-4-7)式中的 $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ 在單純扭轉型變時為常數，因此(2-4-7)式可寫成

$$F_d = \frac{1}{2d}K_2 \left(\phi - \frac{2\pi d}{P_0} \right)^2 \quad (2-4-8)$$

d : 樣品間隙

K_2 : 旋轉彈性係數(twist elastic constant)

P_0 : 自旋螺距

上面所提到的表面自由能可以表示為：

$$F_s = \frac{1}{2}A \sin^2 \phi_s \quad (2-4-9)$$

$$\phi_s = \frac{\phi - \phi_0}{2} \quad (\text{對平行樣品加入自旋性液晶而言}) \quad (2-4-10)$$

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

ϕ_0 : 偏移角(deviation angle)

上面提到的偏移角通常是由於玻璃基板在配向時出現失誤，造成配向方向偏移預定方向，或是於組裝樣品時兩面基板的配向方向錯位，致使液晶樣品本身就具有一偏移角 ϕ_0 。當樣品有偏移角時，我們也稱此樣品出現了錯誤配向(miss alignment)，此時若沒有將偏移角考慮進算式中，會致使算出來的表面定向強度較正確值小。

因此，液晶樣品內單位面積上的自由能 $F = F_d + 2F_s$ ，在液晶樣品中，液晶分子的自然排列下，所具有的自由能 F 最小，也就是：

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_s} = 0 \quad (2-4-11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \phi_s} &= \frac{\partial}{\partial \phi_s} \left(\frac{1}{2} K_2 \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{2\phi_s}{d} \right)^2 d + 2 \cdot \frac{1}{2} A \cdot \sin^2 \phi_s \right) \\ &= -2K_2 \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{2\phi_s}{d} \right) + 2A \cos \phi_s \sin \phi_s \\ &= -2K_2 \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{2\phi_s}{d} \right) + A \sin 2\phi_s = 0 \end{aligned} \quad (2-4-12)$$

$$\Rightarrow K_2 \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{2\phi_s}{d} \right) = A \sin 2\phi_s \quad (2-4-13)$$

最後可得表面定向強度 A 為：

$$A = \frac{2K_2}{\sin 2\phi_s} \left(\frac{2\pi}{P_0} - \frac{\phi}{d} \right) \quad (2-4-14)$$

根據(2-4-14)式，我們可以取同樣製程下的玻璃基板組成樣品，但是灌入不同旋性的液晶，則

$$\frac{1}{\sin(\phi_1 - \phi_0)} \left(\frac{2\pi}{P_1} - \frac{\phi_1}{d_1} \right) = \frac{1}{\sin(\phi_2 - \phi_0)} \left(\frac{2\pi}{P_2} - \frac{\phi_2}{d_2} \right) \quad (2-4-15)$$

利用(2-4-16)式求出樣品的偏移角，最後再將所得的數值帶入(2-4-14)

式中，即可得到表面定向強度 A 。

2-4-3 TN 型樣品的表面定向強度理論

若是液晶樣品為 TN 型時，液晶本身在液晶盒中就會扭轉，相對角度關係如圖 2-13。其自由形變能量密度(distortion free energy density) 可以寫成：

$$F'_d = \frac{1}{2} K_1 (\bar{\nabla} \cdot \hat{n})^2 + \frac{1}{2} K_2 (\hat{n} \cdot \bar{\nabla} \times \hat{n})^2 + \frac{1}{2} K_3 (\hat{n} \times \bar{\nabla} \times \hat{n})^2 \quad (2-4-16)$$

若我們考慮單純扭轉的情形，則

$$\begin{aligned} n_x &= \cos \theta(z) \\ n_y &= \sin \theta(z) \\ n_z &= 0 \end{aligned} \quad (2-4-17)$$

因此(2-4-4)式可以寫成

$$F'_d = \frac{1}{2} K_2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \quad (2-4-18)$$

將(2-4-6)式對 z 軸積分則可得自由形變能

$$F_d = \frac{1}{2} K_2 \int_0^d \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 dz \quad (2-4-19)$$

(2-4-7)式中的 $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ 在單純扭轉型變時為常數，因此(2-4-7)式可寫成

$$F_d = \frac{1}{2d} K_2 \phi^2 \quad (2-4-20)$$

d ：樣品間隙

K_2 ：旋轉彈性係數(twist elastic constant)

ϕ ：扭轉角(twist angle)

上面所提到的表面自由能可以表示為：

$$F_s = \frac{1}{2} A_n \sin^2 \phi_{sn} \quad (2-4-21)$$

$n=1$ or 2 (表示兩面不同基板)

考慮上下兩個基板表面自由能不同，則 $F = F_d + F_{s1} + F_{s2}$ ，在液晶樣品中，液晶分子的自然排列下，所具有的自由能 F 最小，也就是：

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_{s1}} = 0 \quad (2-4-22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \phi_{s1}} &= \left(\frac{\partial}{\partial \phi_{s1}} \frac{1}{2} K_2 \left(\frac{\theta_s - \phi_{s1} - \phi_{s2}}{d} \right)^2 d \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} A_1 \cdot \sin^2 \phi_{s1} + \frac{1}{2} A_2 \cdot \sin^2 \phi_{s2} \right) \\ &= -\frac{K_2}{d} (\theta_s - \phi_{s1} - \phi_{s2}) + A_1 \cos \phi_{s1} \sin \phi_{s1} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2-4-23)$$

$$\Rightarrow \frac{2K_2\phi}{d} = A_1 \sin 2\phi_{s1} \quad (2-4-24)$$

ϕ_s : 兩面基板配向方向的夾角

最後可得表面定向強度 A_1 為：

$$A_1 = \frac{2K_2\phi}{d \sin 2\phi_s} \quad (2-4-25)$$

同樣，將單位面積上總自由能對 ϕ_{s2} 微分，則

$$\frac{\partial F}{\partial \phi_{s2}} = 0 \Rightarrow A_2 = \frac{2K_2\phi}{d \sin 2\phi_{s2}} \quad (2-4-26)$$

2-4-4 樣品扭轉角量測系統與方法

將樣品放置於一對正交的偏振片之間，系統如圖 2-14，樣品的配向方向不需特別放置於任一軸上，首先會先旋轉樣品，得到數據如圖 2-15，找到圖中光穿透強度的最低點之後，將樣品轉到此角度，在以樣品旋轉角度比上檢偏器旋轉角度為 1：2 方式旋轉，如圖 2-16，圖中的最低點即為 Ψ_{pol} ，再將數值帶回(2-4-2)式中算出 ϕ ，最後利用(2-4-14)或(2-4-25)式求出表面定向強度。

第三章 光配向方法及樣品製作

在介紹樣品製作時，會逐步介紹製作流程，包括清洗玻璃，鍍膜，照光系統與照光步驟，摩刷系統與摩刷條件，以及最後的組裝以及本實驗所使用到的液晶。

3-1 基板製作

3-1-1 清洗玻璃

清洗玻璃的目的在於潔淨玻璃表面，因為玻璃表面若是有微粒或是污漬附著時會致使鍍磨時無法將配向劑附著玻璃表面，清洗步驟如下：

1. 本實驗我們所使用的石英玻璃（用於照光的基板）分為兩種大小，要製作成double cell的玻璃基板大小為 $20 \times 30 \text{ mm}^2$ ，且預先於基板長邊的一半處，利用玻璃切割器劃出一道割痕但先不將玻璃裂片，其他實驗所用的玻璃基板為 $15 \times 20 \text{ mm}^2$ 。
2. 將玻璃放入燒杯內，加入中性玻璃清潔劑，再加水蓋過玻璃，將燒杯放入超音波機器中用超音波清洗 10 分鐘。
3. 使用清水將玻璃沖洗乾淨，避免中性清潔劑殘留於玻璃上，沖洗乾淨後放置於另一個乾燥的燒杯。
4. 加入丙酮（Acetone）使丙酮蓋過玻璃，將燒杯放入超音波機器中用超音波震盪清洗 10 分鐘，將丙酮回收以免污染。
5. 加入甲醇（Methanol）到燒杯內使甲醇蓋過玻璃，將燒杯放入超音波機器中用超音波震盪清洗 10 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. 使用氮氣吹乾，放入烤箱中烤乾，冷卻備用。(清洗完成的玻璃必須在一天內上完配向劑，以免玻璃被污染，配向劑無法附著上。)

3-1-2 鍍膜

鍍磨時是利用旋轉塗佈機(spin coater)，利用旋轉的方式均勻的將我們的配向劑塗佈於玻璃表面，藉由固定旋轉的速度來固定配向磨的膜厚，鍍膜步驟如下：

1. 本實驗所使用的配向劑為 Nissan RN-1349 以及 Nissan 130B。
2. 將配向劑由冰箱中取出，置於防潮箱中，待其回復到室溫再行使用。
3. 將石英玻璃放於旋轉塗佈機上。
4. 用微量滴管取配向劑滴數滴在石英玻璃上，旋轉分為兩步驟，條件分別為第一步 2000 rpm(15 sec)，第二步 4000 rpm (25 sec)。
5. 將玻璃取下平放於加熱板上軟烤 60°C，約 2 分鐘，以使配向劑中的溶劑蒸發。
6. 將鍍好配向劑的玻璃放入已預熱高溫的烤箱中預硬烤 1 小時；Nissan RN-1349 配向劑的硬烤溫度為 250°C，Nissan 130B 則為 170°C。
7. 硬烤完成後，將玻璃取出放入培養皿中，冷卻備用。

3-2 照光系統與照光步驟

3-2-1 照光系統

本實驗所用的紫外光源為氙燈(Newport xenon arc lamp, model 6269)，其光譜如圖 3-1，在進行實驗時使用全波段的光源。

照光系統如圖 3-2、3-3 所示，圖中的 liquid filter 是為了吸收紅外線波段的光源。一般情況下照光系統為圖 3-2，圖 3-3 則是需要對基板溫控時，另外加上一保溫罩以使溫度穩定。

3-2-2 照光步驟[11]

圖 3-4 為 RN-1349 的吸收光譜，吸收率(absorbance)的定義為：

$$A_{\lambda} = -\log\left(\frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}}\right)$$

其中 S_{λ} 是波長為 λ 時的樣品穿透光強度(sample intensity)， D_{λ} 是波長 λ 時的最暗態穿透光強度(dark intensity)， R_{λ} 是波長 λ 時的參考穿透光強度(reference intensity)，我們是利用 Ocean Optics Inc. 的 ISS-UV-VIS Integrated Sampling System 與 USB2000 Miniature Fiber Optic Spectrometers 來進行量測。進行光配向時我們分為兩個步驟，稱為 double exposure method(DE)：

Step 1：S-polarization UV light with incident angle 45°

第一步我們利用線性偏振紫外光照射配向膜，液晶分子的排列方向會與紫外光偏振方向垂直，如圖 3-5(a)(b)所示，液晶分子產生預傾角在此兩個方向上的機率是相等的，我們稱之為預傾角簡併(pretilt angle degeneracy)。

Step 2：Unpolarized UV light with incident angle 45°

為了消除預傾角簡併的現象，我們利用非偏極化紫外光斜向入

射，可以把較為水平的預傾角消除，方向關係如圖 3-6。

3-3 摩刷機台與摩刷條件

摩刷機台的側視圖如圖 3-7，我們將已鍍上配向膜的玻璃基板放置於移動平台上，移動平台前進時會經過外層貼有絨布的滾筒，玻璃通過時會被絨毛膜刷而配向，移動平台前進方向即為摩刷配向方向。系統中滾筒的下壓深度，滾筒旋轉速度以及移動平台的前進速度可以依實驗要求而調整調整不同的數值。本論文中所需要摩刷的基板，滾筒旋轉速度固定 810 R.P.M，移動平台前進速度固定 1.8 m/min，而滾筒下壓深度則視實驗條件而調整。

3-4 液晶樣品製作

本論文題目進行時所使用的樣品，其玻璃基板所鍍的配向劑皆為 Nissan RN-1349，僅有確定配向劑 Nissan RN-1349 之光配向方向時，需要與一鍍上 Nissan 130B 的玻璃基板組成樣品，下面將樣品分為三類：

一、量測預傾角的樣品，使用的玻璃大小為 $15 \times 20 \text{ mm}^2$ ，將兩片紫外光照射完成的玻璃基板夾一薄墊片形成一上下基板配向方向為反平行之液晶盒(liquid crystal cell)。

二、量測表面定向強度的樣品，使用的玻璃大小為 $20 \times 30 \text{ mm}^2$ ，將兩片紫外光照射完成的玻璃基板夾一薄墊片形成一空樣品，兩片玻璃中間的割痕需重疊，待固定樣品的環氧樹脂(Epoxy)硬化後，施力將空樣品由中央割痕處裂片成為兩個液晶盒，上下基板配向方向為反平行，如圖 3-8 所示。

三、進行光致重新配向實驗的樣品，使用的玻璃大小為 15×20

mm²，先把玻璃基板摩刷配向，部份的樣品需要將已摩刷過的基板置於紫外光下照射後與另一片只經過摩刷配向的基板夾一薄墊片形成一上下基板之摩刷配向為反平行之液晶盒，部分樣品則直接將兩片摩刷配向的基板夾一薄墊片形成液晶盒。

上述所有樣品均於量測完樣品間隙之後灌入液晶，便可開始進行實驗。我們使用的液晶是 E7(Merck)，其旋轉彈性係數為 $6 \times 10^{-12} N$ ， $n_e = 1.737$ ， $n_o = 1.49$ ；量測表面定向強度時，用之於液晶盒中所使用的液晶則加入 Chiral dopant，使 E7 具有旋光性質。因裂片而一分為二的液晶盒分別灌入 E7+ZLI-811(左旋 pitch=62 μ m)與 E7+ZLI3786(右旋 pitch=63 μ m)。



第四章 實驗方法與結果

在本章一開始，會先對於配向劑 Nissan RN-1349 的配向方向作詳細的說明，然後進入本論文的主題，包含兩個部份，第一部份為當基板進行光配向時，控制基板溫度，並量測溫度對於液晶樣品預傾角以及表面定向強度是否有影響，另一部份則是光致重新配向的研究數據。

4-1 配向劑 Nissan RN-1349 之光配向方向與摩刷配向方向

4-1-1 實驗方法

為了確定配向劑 Nissan RN-1349 之配向方向，我們將一片鍍有 Nissan RN-1349 的玻璃基板經過配向處理後，與另一鍍有 Nissan 130B 且經過摩刷處理的基板組成樣品，由於已知 Nissan 130B 經過摩刷後，其配向方向平行於摩刷方向[12]，因此當兩片基板組成樣品之後，將樣品放在一對正交偏振片間並旋轉樣品，藉由觀察穿透光變化即可知道光配向方向。

欲對鍍有 Nissan RN-1349 的基板光配向時，其線性偏振紫外光的偏振方向平行於摩刷方向，如圖 4-1。另一方面，為了確定 Nissan RN-1349 之摩刷配向方向的基板，其摩刷配向方向平行於鍍有 Nissan 130B 之基板的摩刷配向。

4-1-2 實驗結果

當樣品在一對正交偏振片之間旋轉時，我們發現不論是確定 Nissan RN-1349 之光配向方向或是確定摩刷配向方向的樣品，當已知

配向方向的基板，其配向方向平行於偏振片的偏振方向時，皆觀察到最暗態；其配向方向與偏振片的偏振方向夾 45° 時觀察到最亮態，由此可知 Nissan RN-1349 的光配向方向垂直於光配向時線性偏振紫外光的偏振方向，而 Nissan RN-1349 的摩刷配向方向則平行於摩刷方向。確定 Nissan RN-1349 光配向方向的照片如圖 4-2，確定摩刷配向方向的照片如圖 4-3。

4-2 光配向時的基板溫度對配向之影響

本實驗需要用到溫光照光系統，如圖 3-3 所示。基板在照光之前，先將保溫罩蓋上樣品基座上 (stage)，開啟溫控器 (proportional temperature controller, YSI, model 72)，並將 2 支溫度探針 (probe, YSI, model 423) 插入預先在保溫罩上的開的洞。這兩支溫度探針，一支的功用是將基板溫度回饋給溫控器，令其微電腦了解是否需要再加熱，另一支溫度探針則接於多功能電表上 (multimeter, HP 34401A)，於電表上讀取電阻值，再對照相對應的溫度，以了解實際溫度為何，對照表如表 4-1。待到達設定之溫度並平衡之後，將保溫罩打開迅速將玻璃基板放入後關上保溫罩，等待 10 分鐘，使基板上得配向膜到達所需之溫度之後開始照光，Step 1：線性偏振光 45° 入射，曝光時間 5 分鐘，Step 2：非偏振光 45° 入射，曝光時間 1 分鐘。本實驗基板光配向時所控制的溫度範圍從 30°C 到 80°C ，利用相同溫度下照光的兩片玻璃基板製作成樣品，每隔 10°C 製作一個樣品。我

們作了 2 組樣品，一組用來量測溫度對於液晶樣品預傾角的影響，另一組製作成 double cell 的形式，用來量測溫度對液晶樣品表面定向強度的影響。

4-2-1 預傾角量測結果

照光溫度由 30°C 到 80°C 共有 6 個樣品，照光能量密度分別為：

Step 1 : 12.3 J/cm²

Step 2 : 10.8 J/cm²

我們在配向均勻的樣品上取數點量測預傾角，求取平均值以及標準差。量測所得的實驗數據如表 4-2 以及圖 4-4 所示。

由實驗得知，光配向劑 RN-1349 的預傾角，大約都在 0.4° 以下。各樣品預傾角之平均值都大略相同，也就是照光時配向膜的溫度並不會影響到預傾角的大小。

4-2-2 表面定向強度量測結果

表面定向強度樣品的照光能量密度分別為：

Step 1 : 9.0 J/cm²

Step 2 : 9.6 J/cm²

此照光強度略低於前一組樣品使用之光強度，這是因為實驗期間照光系統一度短路，修復之後照光強度稍微下降。不同溫度照光的表面定向強度，我們求取量測數據之平均值以及標準差，如表 4-3 及圖

4-5。實驗樣品利用了 double cell 來解決錯誤配向的問題。量測時於樣品的不同點取多組數據。

配向劑 RN-1349 在上述的照光能量下，所得到的表面定向強度約為 $1.8 \times 10^{-5} J/m^2$ ，雖然結果略微幅動，仍然可以看出照光時配向膜溫度對於表面定向強度同樣也是沒有影響。

4-3 液晶於摩刷配向膜上之光致重新配向

我們在玻璃基板上鍍上光配向劑 RN-1349，經過硬烤之後，先將基板利用絨布摩刷配向，然後利用偏振方向平行於摩刷方向之線性偏振紫外光改變原本摩刷配向的方向。我們將兩片相同摩刷配向條件的基板組成樣品並灌入液晶之後，將紫外光由其中一片基板(測試基板)處入射樣品，如圖 4-6。兩個照光步驟之時間均固定在 Step 1：Step 2=5：1 的比例。本實驗的目的為證實光致重新配向的現象並且找到影響重新配向的因素。

除照光時間外，實驗中所探討的因素分別有：摩刷配向強度的影響，測試基板是否有預照等最後會探討光偏振方向與摩刷方向夾角的關係。原來為平行摩刷配向的樣品經照光後，其液晶扭轉角隨照光時間而改變，在表 4-4~4-7 中，我們列出各條件下的關係，為了確定樣品扭轉是由於光致重新配向引起，因此我們在樣品裝灌入不具旋性的液晶，因此在量測表面定向強度時無法利用 double cell 修正錯誤配

向。早期照光強度為Step 1：184 mW/cm²及Step 2：42 mW/cm²，其後的數據由於照光系統短路，修復後照光強度下降成為Step 1：175 mW/cm²及Step 2：36 mW/cm²，表中照光時間有”*”號者為使用早期照光強度。

4-3-1 摩刷強度與預照條件

在本實驗中利用改變摩刷機台滾筒下壓深度來改變摩刷強度，以研究不同起始表面定向強度對光致重新配向的影響，以機台上垂直方向之位置刻度作為代號，我們選擇了兩種位置，其代號分別為 12 及 13。對此兩種位置摩刷出的樣品，先行測量其表面定向強度。機台刻度為 13 時之滾筒下壓深度比 12 淺，因此表面定向強度也應較弱。我們所得之表面定向強度則分別為 $1.13 \times 10^{-5} J/m^2$ (Soft rubbing) 及 $5.54 \times 10^{-5} J/m^2$ (Hard rubbing)，與預測相符合。

在本實驗中的預照是指測試基板經過摩刷配向後，先行利用線性偏振紫外光照射基板，然後再與一片只經過摩刷配向的基板組成樣品。預照的線性偏振光偏振方向和組成樣品之後的照光偏振方向一致。預照的照光時間為Step 1：20min及Step 2：5min；照光能量為Step 1：50.4 J/cm²及Step 2：55.2 J/cm²，照光系統修復後知照光能量為Step 1：43.2 J/cm²及Step 2：52.5 J/cm²。

4-3-2 摩刷強度與預照對光致重新配向之影響

我們將測量到的扭轉角度與照光能量密度的關係以圖 4-7 表示。

圖中 4 組數據分別由兩種摩刷配向之表面定向強度與有無預照過程之樣品量得。

圖例說明的標示上，H 與 S 代表兩種摩刷配向強度，其數值已在 4-3-1 節中提到，Soft rubbing 相較於 Hard rubbing 的表面定向強度是比較弱的，而 P 是代表樣品有預照，N 則代表沒有預照。

不管樣品的配向條件為何，我們發現樣品的扭轉角隨著照光能量增強而大。圖中 H-N 與 S-N 都是沒有經過預照的樣品，兩組數據皆持續穩定的隨照光能量增大其樣品扭轉角，但是相較於 H-P 以及 S-P 兩組有預照樣品的數據，沒有預照的樣品，其扭轉角增大的趨勢是較為不明顯的。

圖中兩組樣品有經過預照的數據 H-P 與 S-P 有一起始的扭轉角，這是因為有預照的基板其配向方向已經改變，並不與摩刷配向方向平行。在組成樣品後，起初照光對於改變樣品的扭轉角效果非常好，但隨即發現扭轉角會飽和在特定的角度，S-P 飽和的角度為 71° ，而 H-P 飽和的角度為 44° 。

光致重新配向的測試基板，其表面定向強度與照光能量密度的關係如圖 4-8(a)以及 4-8(b)，摩刷配向強度較弱的基板，經過光致重新

配向之後可以得到較大的表面定向強度，不論有無預照皆是如此。
Hard rubbing 且有經過預照此一條件的樣品所得到的表面定向強度明顯大於其他條件樣品的表面定向強度。

觀察圖中有預照以及沒有預照的數據，我們的實驗發現不論有預照或是沒有預照，摩刷配向強度較弱會使光致重新配向的效果較好，Soft rubbing 的樣品可使照光而重新配向的液晶樣品幾乎順著光配向的方向排列，這是由於在此條件下的光配向之表面定向強度較大。Hard rubbing 的樣品的扭轉角度大約只有預定光配向方向與摩刷配向方向的夾角的一半。對於樣品是否需要預照的實驗，我們發現有先預照的樣品，光致重新配向的效果非常好，而沒有預照的樣品扭轉角則偏小。



4-3-3 扭轉角簡併之討論

當樣品的預傾角很小時，若是樣品上下基板配向方向夾 90° 時，此時樣品扭轉角左旋和右旋的型式能量是相同，此種現象我們稱之為扭轉角簡併 (twist angle degeneracy)。我們於 4-2-1 節已經證實配向劑 Nissan RN-1349 的預傾角約 0.4° 左右，是屬於較小的預傾角。為了確定前述沒有預照與有預照的效果有差別，並不是由扭轉角簡併造成，我們進行了以下實驗。

前述的實驗中，光致重新配向所照射的線性偏振紫外光，其偏振

方向平行於摩刷配向方向，則光配向方向與摩刷配向方向的夾角，我們定義為 θ ， $\theta=90^\circ$ ，為了消除我們對於扭轉角簡併的疑慮，現在我們將線性偏振紫外光的偏振方向與摩刷方向夾 30° ，因此 $\theta=60^\circ$ ，這樣一來就不會有扭轉角簡併的問題在表 4-8~4-11 中我們列出當 $\theta=60^\circ$ 時各種條件下的實驗結果。

光配向方向與摩刷配向方向夾角 $\theta=60^\circ$ 時，樣品扭轉角對照光能量密度的關係如圖 4-9，我們得到的結果和 $\theta=60^\circ$ 時一致，Soft rubbing 的扭轉角大於 Hard rubbing，有預照的樣品扭轉角隨照光能量密度增強時有明顯的效果，而後於特定角度飽和，H-P 的飽和角度約為 28° ，而 S-P 的飽和角度約為 55° 。

表面定向強度與照光能量密度的關係如圖 4-10(a)以及 4-10(b)，S-P 的條件下的表面定向強度遠大於其他條件，這和 $\theta=90^\circ$ 時所得到的結果相同，從 $\theta=90^\circ$ 與 $\theta=60^\circ$ 的結果相比較，並沒有發現扭轉角簡併的現象。

4-3-4 光偏振方向及預照對光致重新配向之影響

當樣品沒有經過預照時，我們發現樣品扭轉角隨照光能量密度增強時，在相同的摩刷配向強度下是差不多的，如圖 4-11，Soft rubbing 時，不論 θ 為 90° 或是 60° ，扭轉角的變化趨勢幾乎一樣，但是 60° 的數據一直都略大於 90° ，Hard rubbing 的兩組數據結果也大略相同，

為了確定此一現象是不是由扭轉角簡併造成，我們觀察表面定向強度對照光能量關係圖，如圖 4-12，可以看到 θ 為 90° 的樣品，表面定向強度在 Soft rubbing 與 Hard rubbing 時類似， θ 為 60° 樣品的表面定向強度在 Soft rubbing 與 Hard rubbing 時則有很明顯的區別，因此猜測或許 θ 為 90° 的樣品有扭轉角簡併的現象，以致於 Soft rubbing 與 Hard rubbing 的效果沒有突顯出來。

樣品若是有經過預照的處理，在照光初期同樣的摩刷配向強度，扭轉角在 θ 為 90° 或是 60° 都有類似的變化率，但是樣品扭轉角的飽和點不同以致於曲線後來出現分歧，如圖 4-13。觀察在有預照時，表面定向強度對照光能量密度關係圖，如圖 4-14(a)及圖 4-14(b)，我們發現 S- 60° 樣品的表面定向強度遠大於其他數據，可達到配向劑 Nissan RN-1349 在一般光配向樣品的表面定向強度，對於這組數據我們需要重複此條件以確定表面定向強度的大小。

第五章 結論與未來展望

Nissan RN-1349 一般是用在光配向的配向劑，本實驗證實Nissan RN-1349 於摩刷配向後仍可利用紫外光改變配向方向，一般摩刷配刷配向的表面定向強度約為 $10^{-4} J/m^2$ 的數量級，而RN-1349 摩刷配向的表面定向強度可到達 $5 \times 10^{-5} J/m^2$ ，而且現在我們証實RN-1349 的光致重新配向的現象並且在有預照的情況下，Hard rubbing且光配向方向與摩刷配向方向夾角為 60° 時表面定向強度可達 $1.72 \times 10^{-5} J/m^2$ ，大大增加了RN-1349 配向膜的應用範圍。

光致重新配向已證實與摩刷配向的表面定向強度有關，未來可以嘗試量測不同表面定向強度的樣品，找出光致重新配向的效果最好的條件。另外，已經有人發表在 PI 內參雜染料(dye)作為光配向劑，可以在基板經由光配向組成樣品之後，利用偏振的雷射光將配向膜重新配向[13]，對於我們的光配向劑 RN-1349 也可以做此種實驗，或者進一步測試可以利用光致重新配向做幾次的覆寫(photoaddressing)[14]，甚至可以先將液晶樣品做好再來進行光配向，觀察配向時液晶已經存在的情況下，配向磨對液晶的影響。

玻璃基板進行光配向時，配向膜會吸收入射光源導致溫度上升，由實驗發現，在本實驗溫度範圍 $30 \sim 80^\circ C$ ，液晶的配向參數，如預傾

角及表面定向強度，並不會受到影響。但是對於更高的溫度，到達配向膜硬烤的溫度時，同時對其配向是否仍然不會受溫度影響則不得而知，目前受限於溫控設備而將實驗的最高溫定為 80°C，若能將保溫及加溫的設備改進，將數據點往更高溫補齊。



參 考 文 獻

- [1] Minoru Nakamura, *J. Appl. Phys.*, Vol. 52, 4561, 1981.
- [2] John L. Janning, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 21, 173, 1972.
- [3] Praveen Chaudhari, James A. Lacey, Shui-Chih Alan Lien, and James L. Speidell, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, L55, 1998.
- [4] O. Yaroshchuk, L. G. Cada, M. Sonpatki, and L.-C. Chien, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, 30, 2001.
- [5] K.H. Yang, *J. Appl. Phys.*, Vol. 64, 4780, 1988.
- [6] Pochi Yeh and Claire Gu, *Optics of Liquid Crystal Displays*, A Wiley Interscience Publication, New York, 1999.
- [7] T. Akahane, H. Kaneko, and M. Kimura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 35, 4434, 1996.
- [8] T. J. Scheffer, and J. Nehring, *J. Appl. Phys.*, Vol. 48, 1783, 1977.
- [9] Yukito Saitoh, and Alan Lien, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, 1743, 2000.
- [10] P. G. de Gennes, and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, second edition, Oxford Science Publications, Oxford, 1995
- [11] Yasufumi IIMURA, Shunsuke KOBAYASHI, Toru HASHIMOTO, Takashi SUGIYAMA, and Kazuhisa KATOH, *IEICE TRANS ELECTRON.*, Vol. E79-C, 1040, 1996.
- [12] 林家任, 紫外光照射配向膜之液晶光配向方法及性質研究, 國立交通大學電子物理系碩士班論文, 2004.
- [13] Wayne M. Gibbons, Paul J. Shannon, Shao-Tang Sun & Brian J. Swetlin, *NATURE*, Vol 351, 49, 1991.
- [14] Rumiko YAMAGUCHI, Akira SATO, and Susumu SATO, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, L336, 1998.

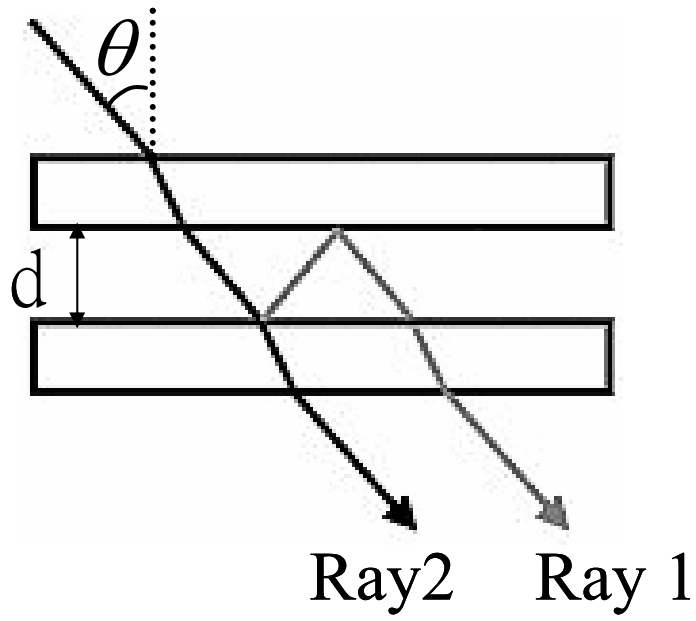


圖 2-1 光入射空樣品示意圖

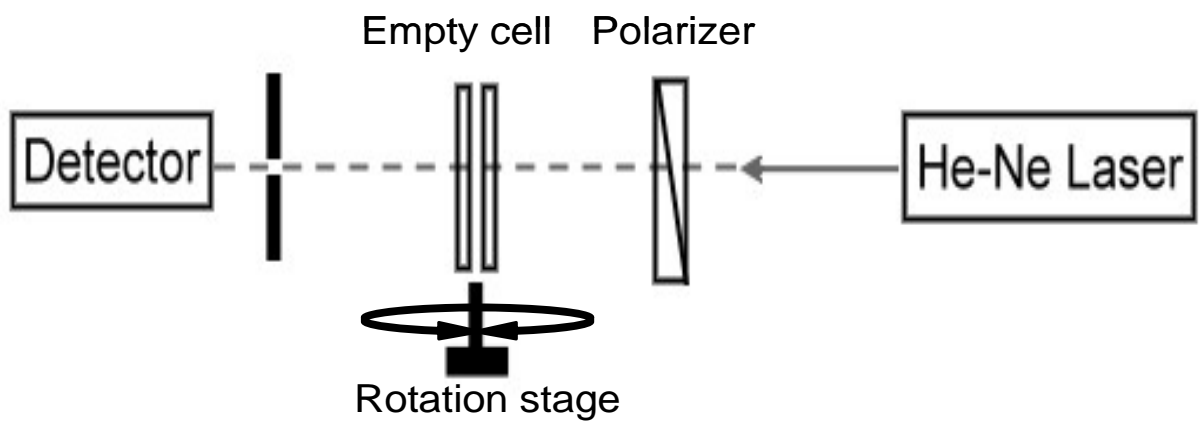


圖 2-2 厚度量測系統示意圖

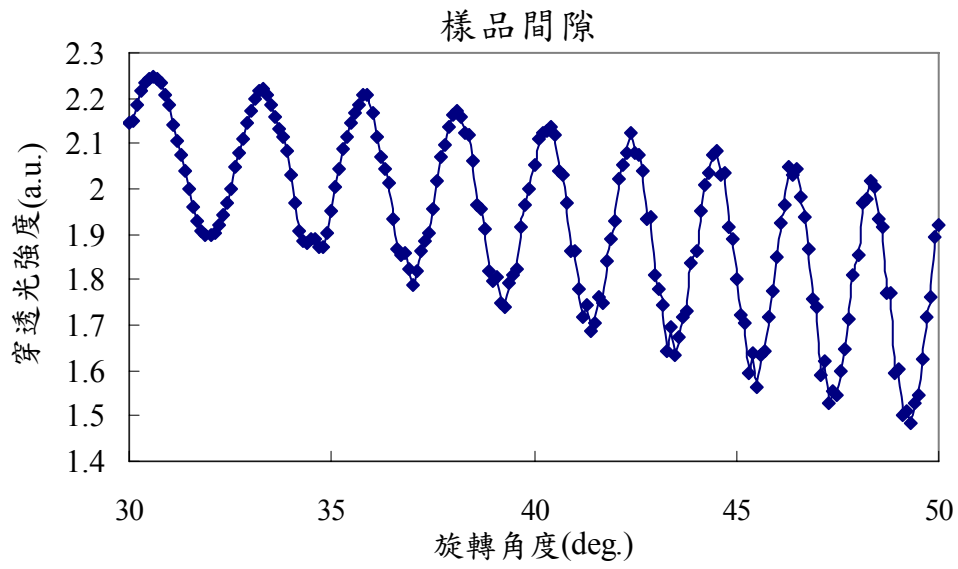


圖 2-3 樣品間隙穿透光強度變化圖

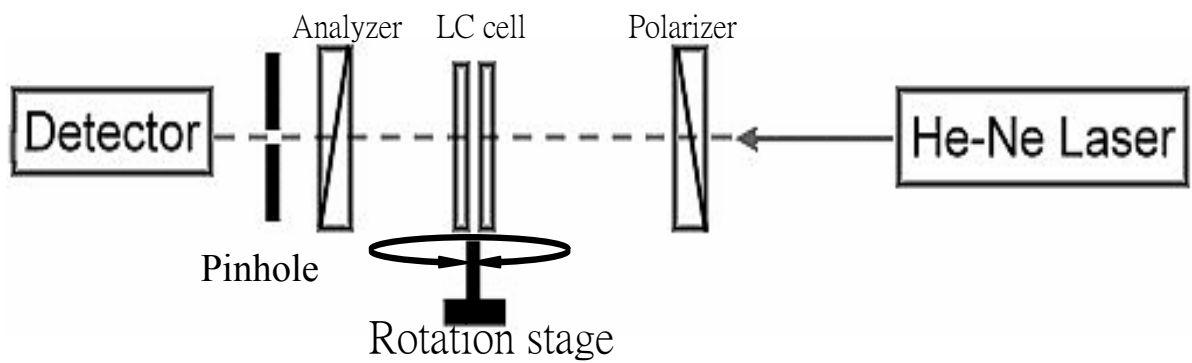
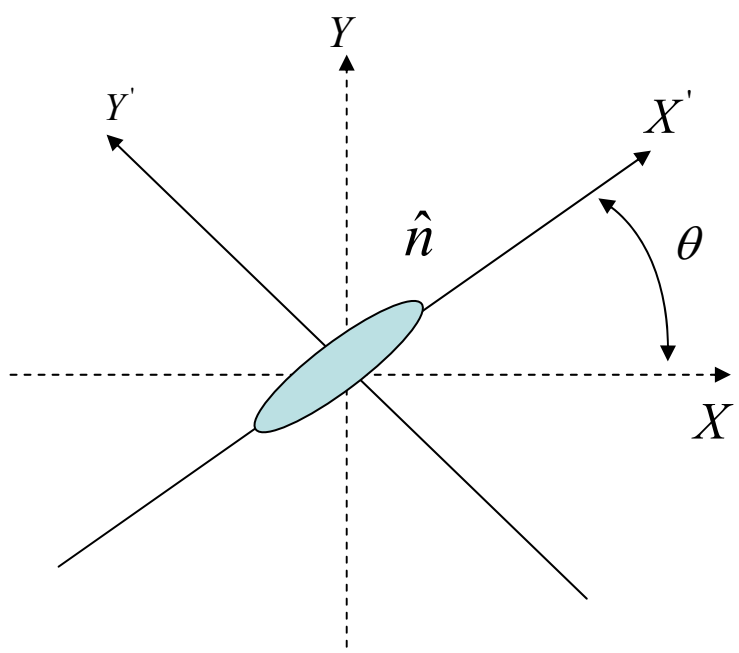
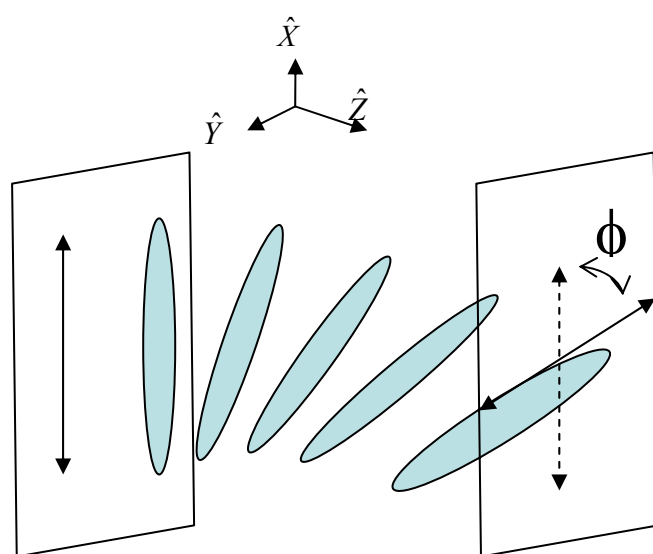


圖 2-4 穿透光強度及預傾角量測裝置示意圖



2-5 平行樣品座標系定義參考圖



2-6 液晶扭轉角示意圖

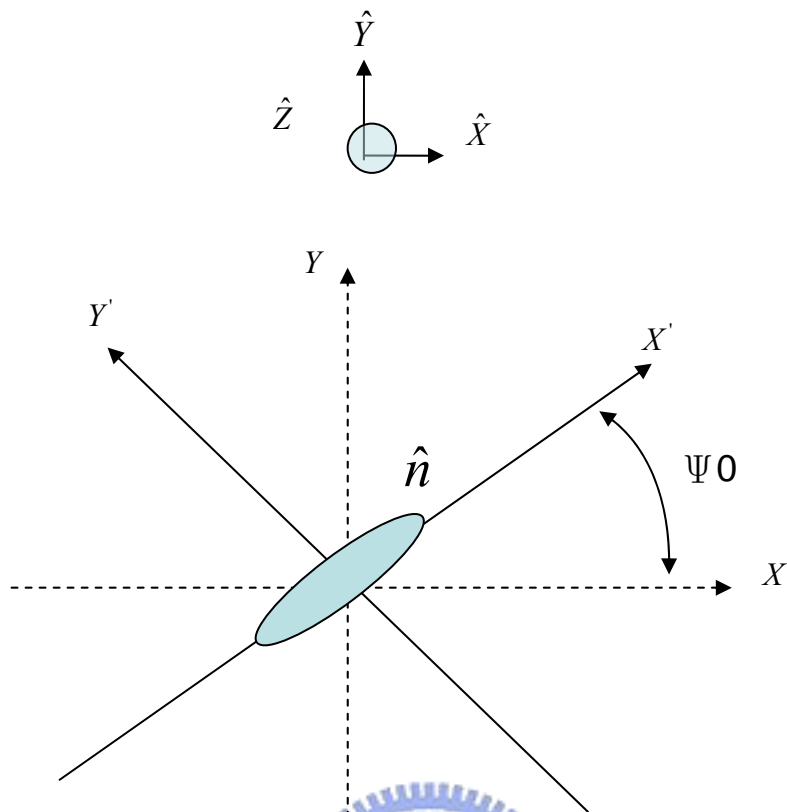


圖 2-7 TN 型樣品座標系定義參考圖

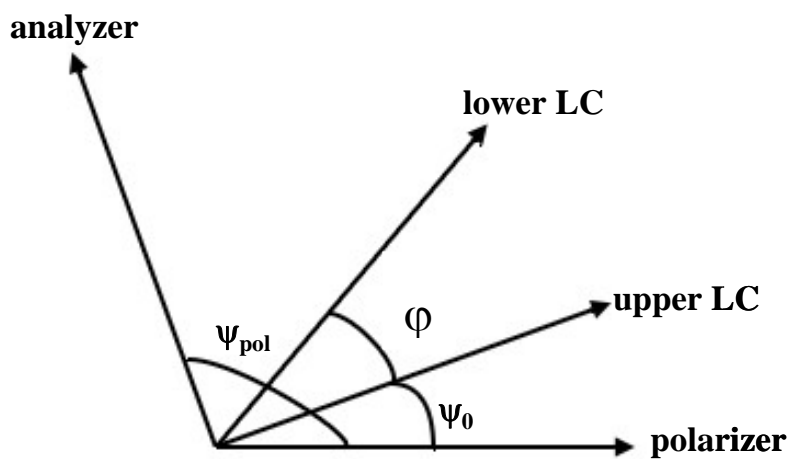


圖 2-8 起偏器、檢偏器與液晶元件間的關係圖

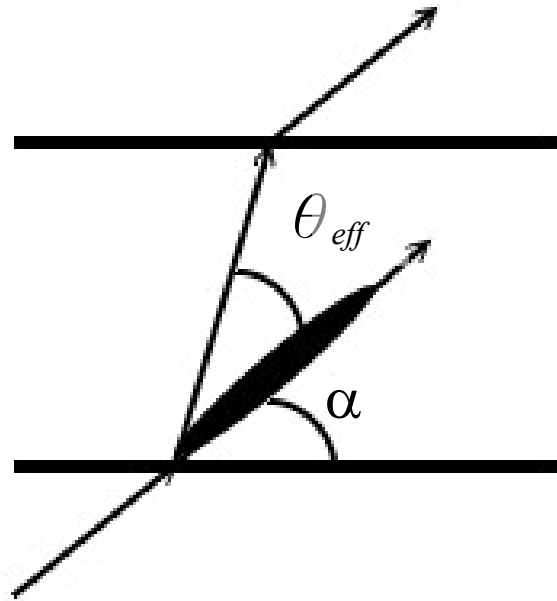


圖 2-9 傾角與玻璃基板的關係圖

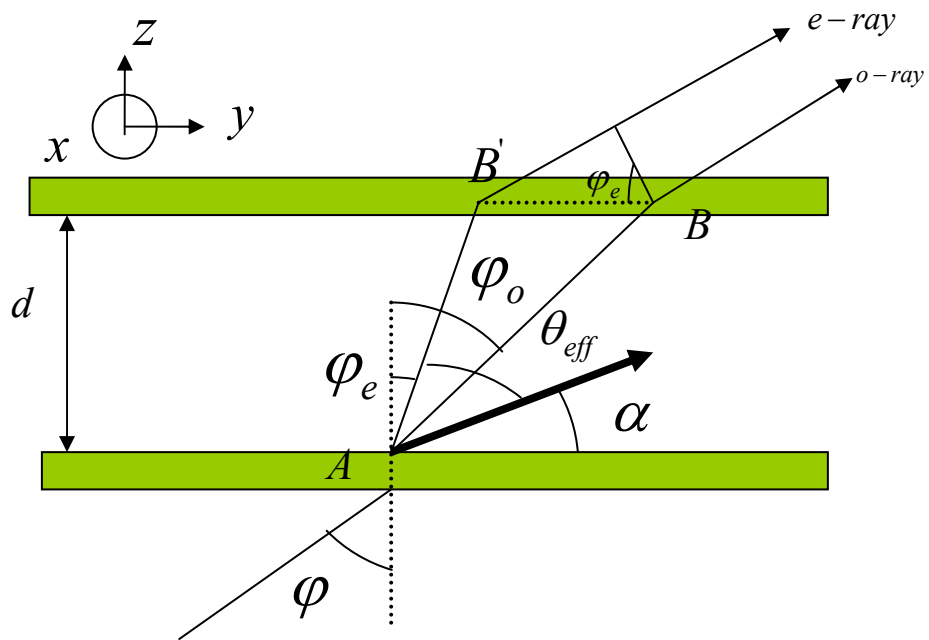
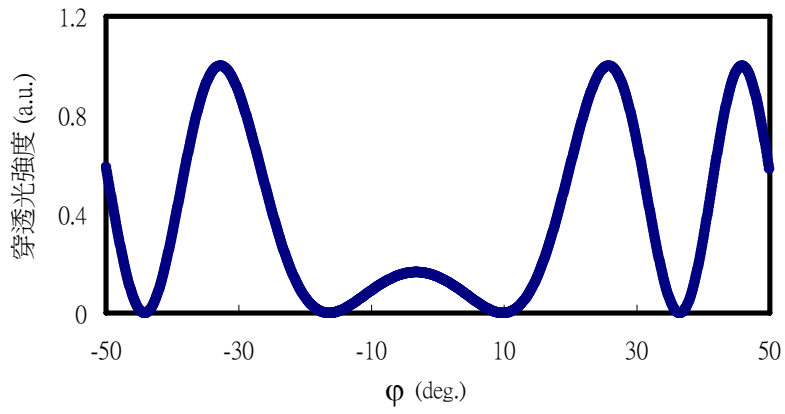


圖 2-10 光徑示意圖



2-11 穿透率 $I(\varphi)$ 對入射角 φ 之模擬圖

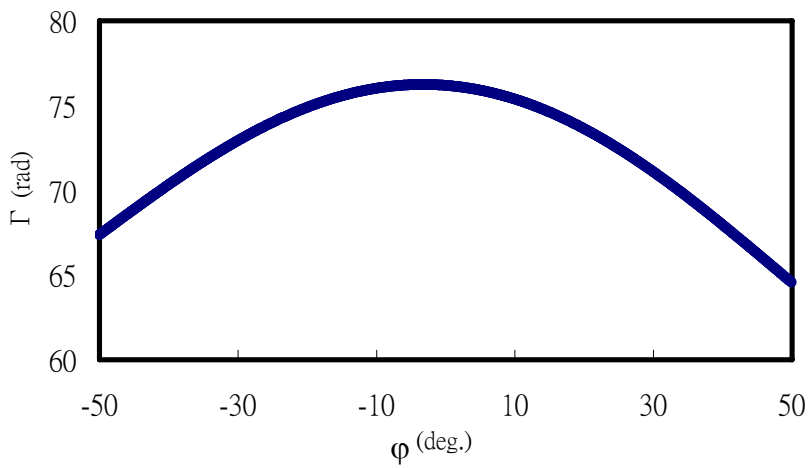


圖 2-12 相位延遲 $\Gamma(\varphi)$ 對入射角 φ 之模擬圖

對照圖 2-11，圖中顯示最大相位延遲的入射角即為穿透光強度對稱點。

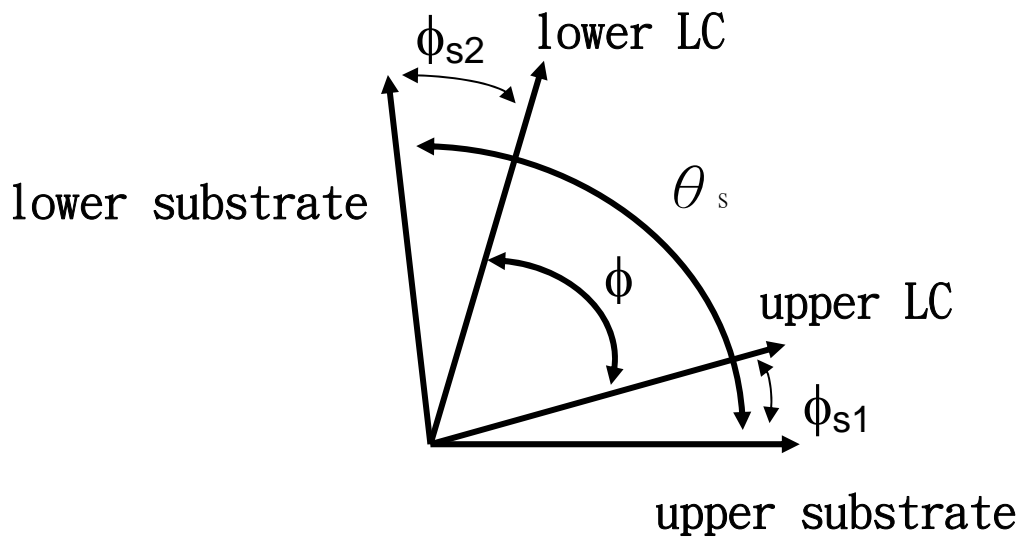


圖 2-13 TN 型樣品角度關係圖

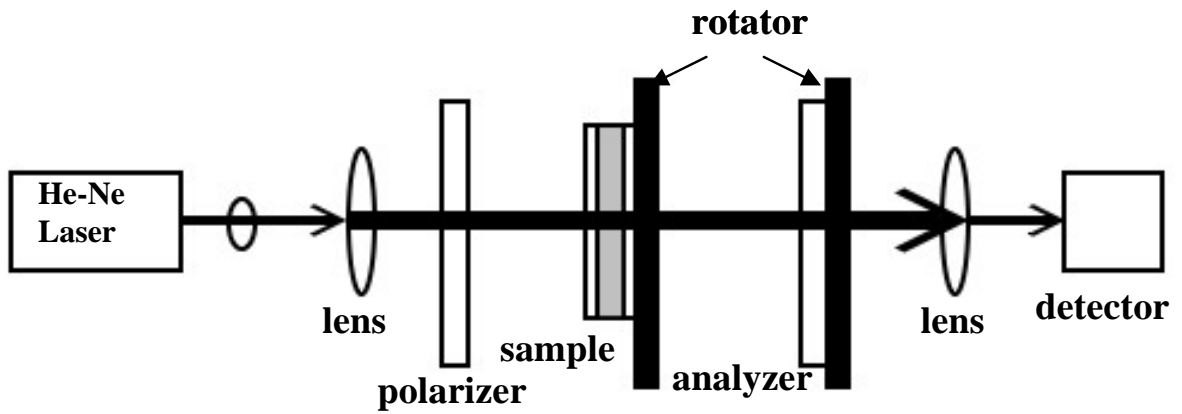


圖 2-14 扭轉角量測系統示意圖

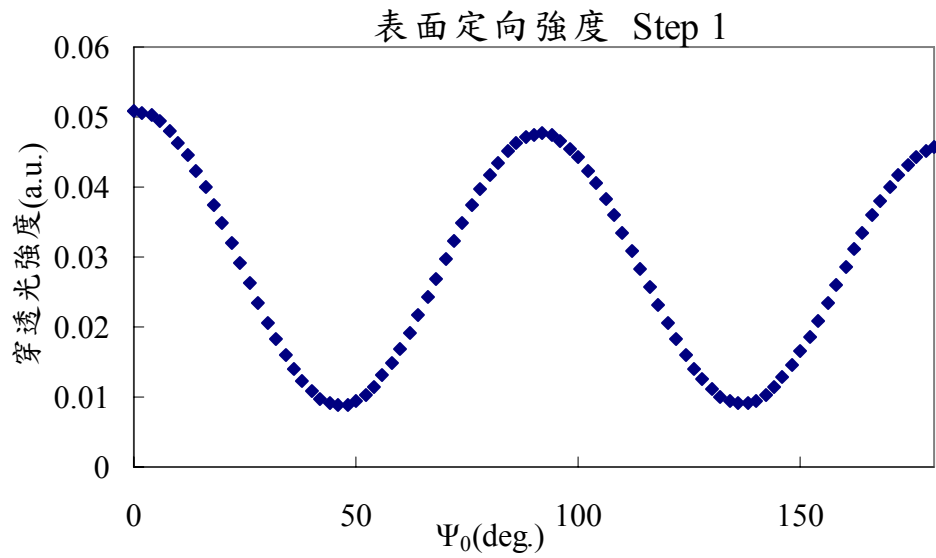


圖 2-15 穿透光強度 I 與樣品旋轉角度 Ψ_0 關係圖

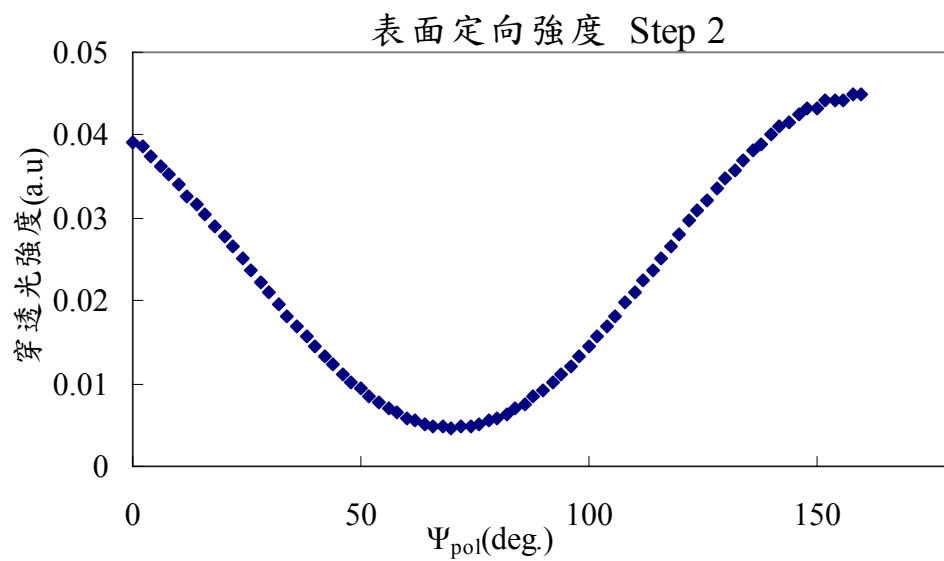


圖 2-16 穿透光強度 I 與檢偏器旋轉角度 Ψ_{pol} 關係圖

以 1:2 的角度變化同時旋轉液晶樣品與檢偏器之穿透光強度

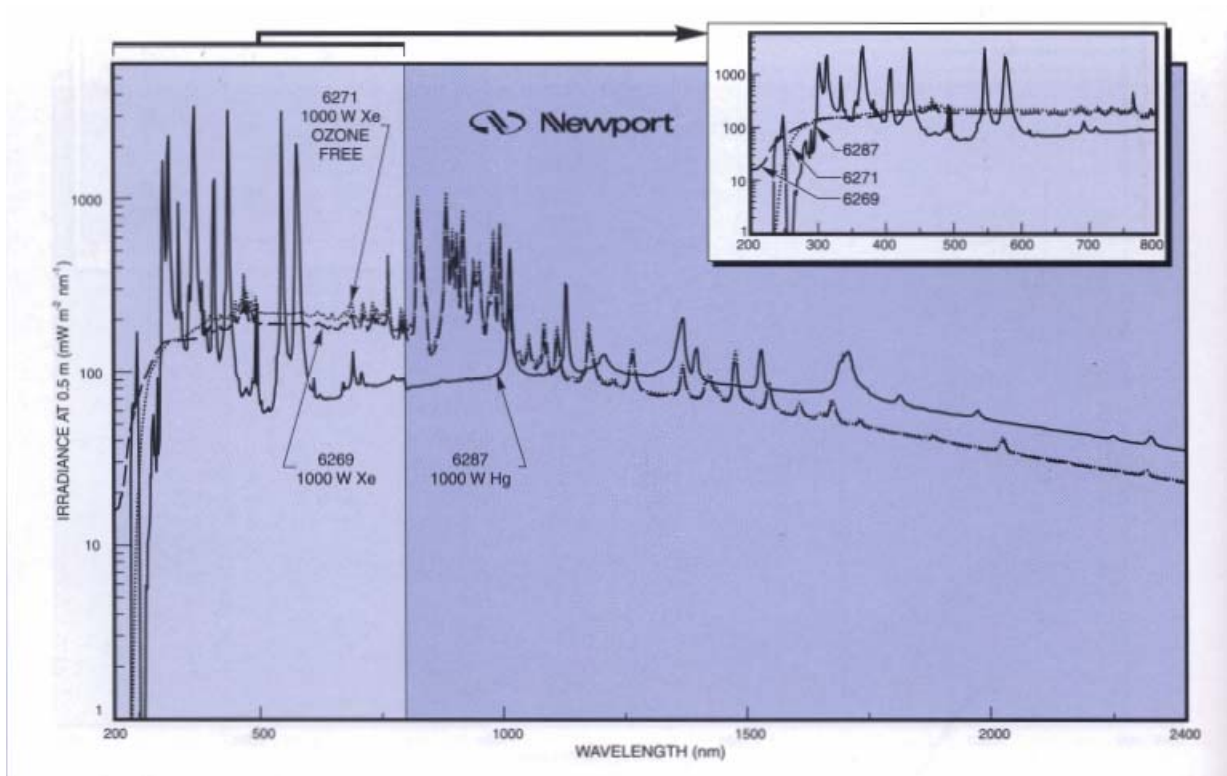


圖 3-1 氙燈光譜圖

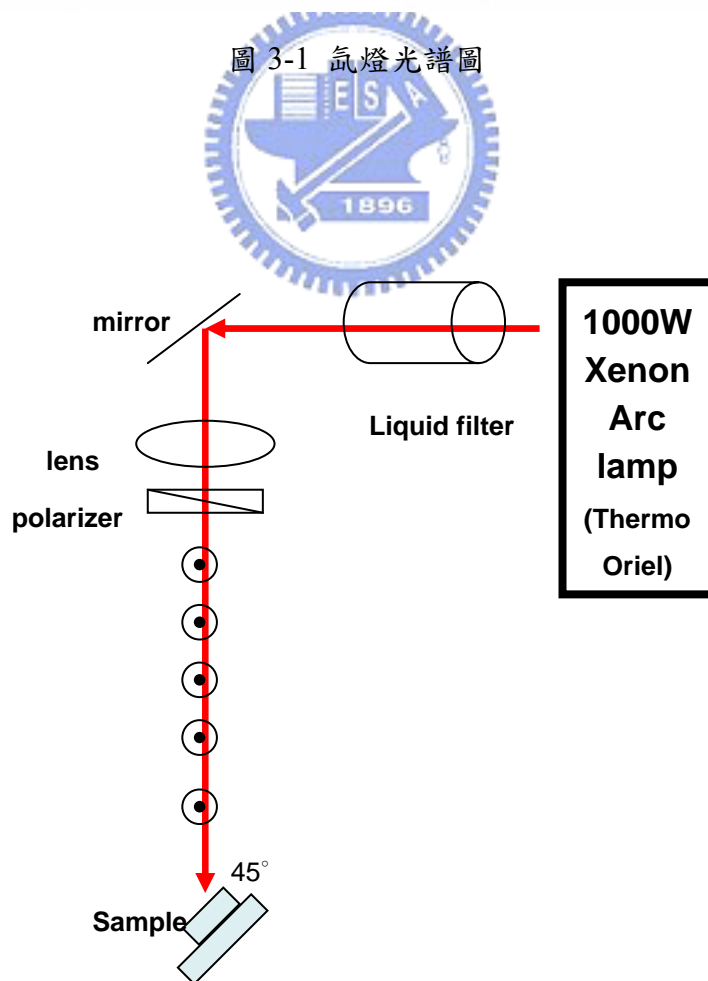


圖 3-2 照光系統示意圖

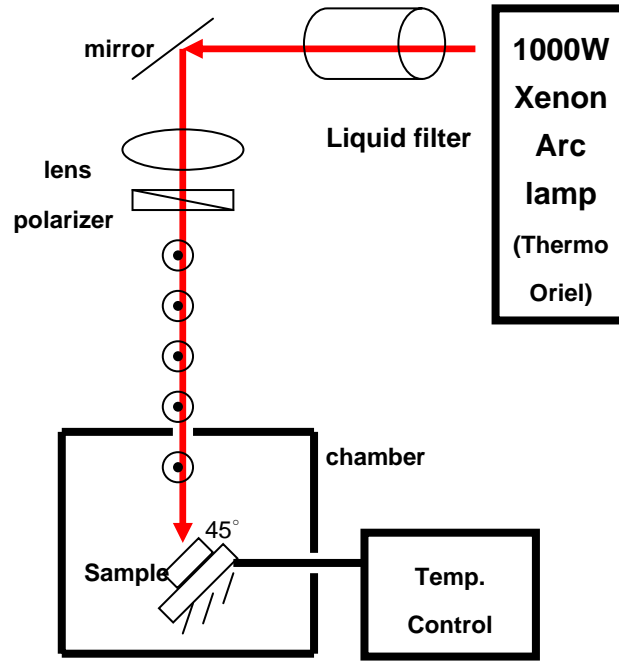


圖 3-3 溫控照光系統示意圖

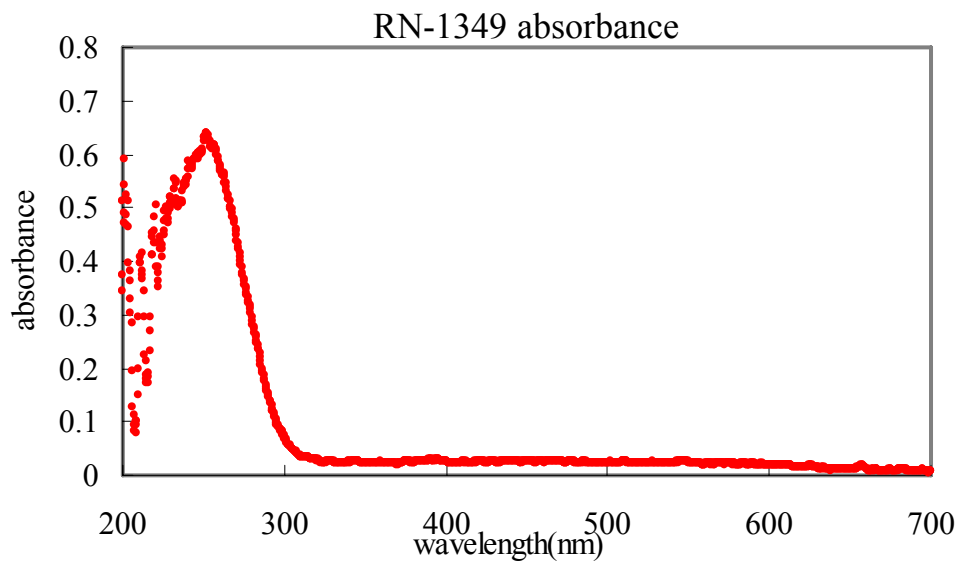
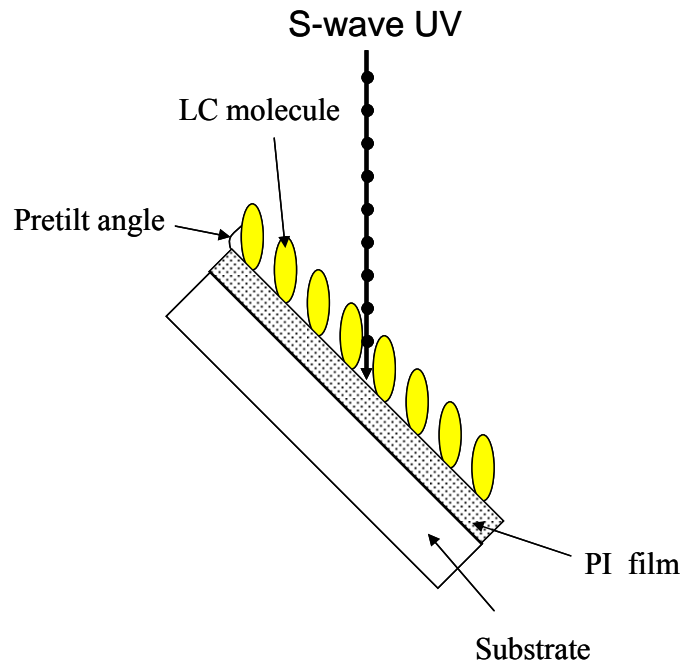
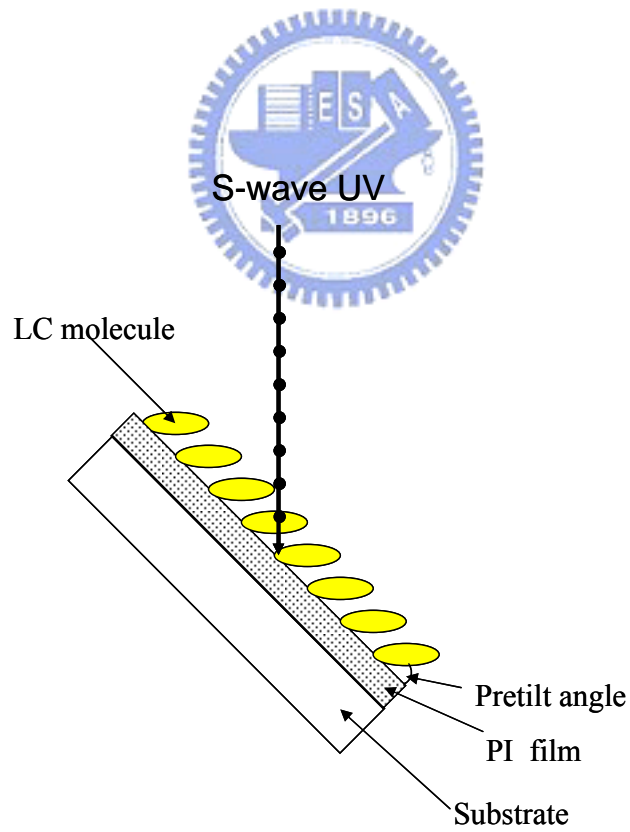


圖 3-4 光配向劑 RN-1349 吸收譜線圖



(a)



(b)

圖 3-5 預傾角簡併示意圖

經過照光步驟 Step 1 處理後，液晶分子可能的傾斜方向

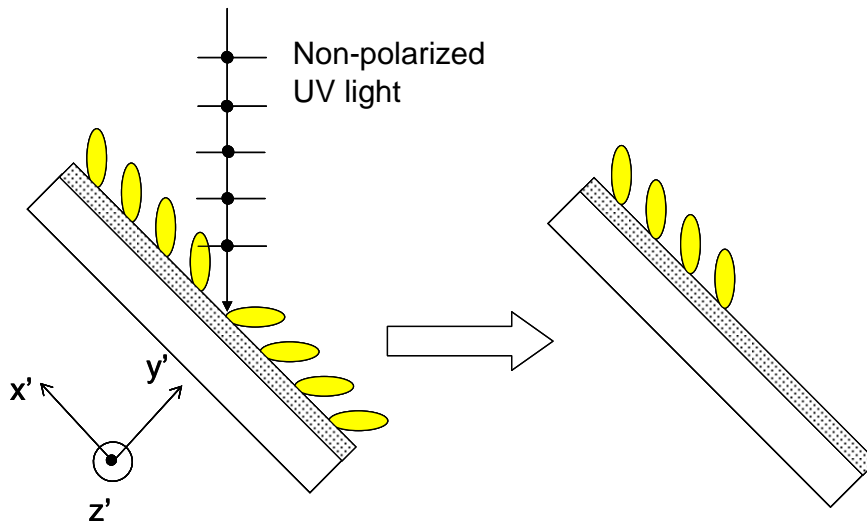


圖 3-6 消除預傾角簡併示意圖

斜向入射的紫外光可以去除預傾角簡併的現象，圖為紫外光入射方向與液晶分子傾斜方向的關係，與光的偏極化方向較垂直的方向即為液晶的排列方向

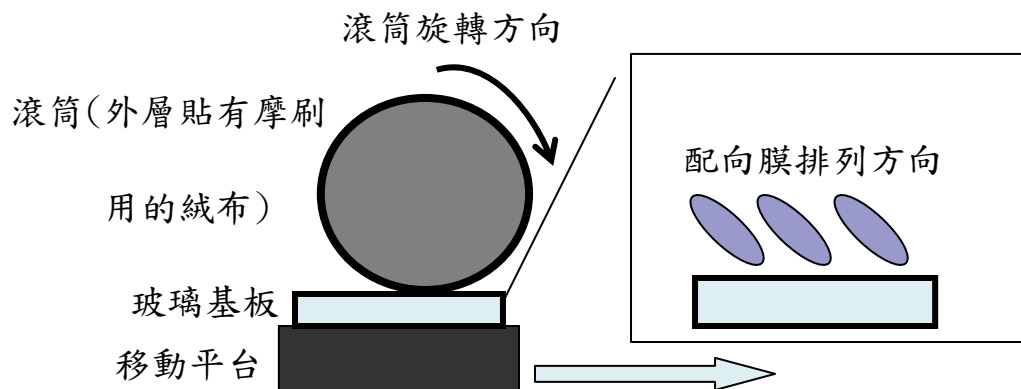


圖 3-7 摩刷機台與摩刷配向示意圖

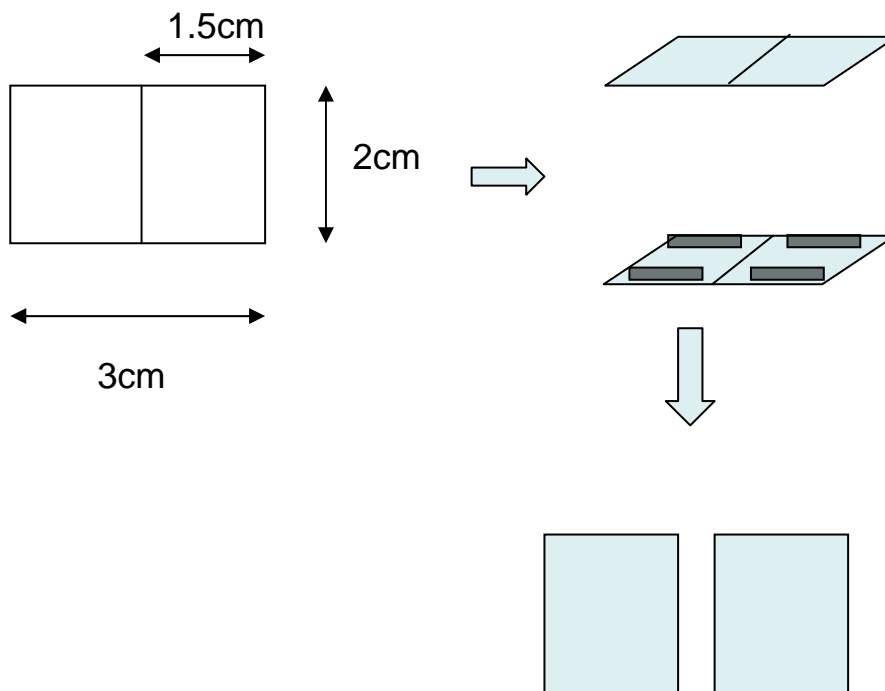


圖 3-8 Double Cell 製作流程圖

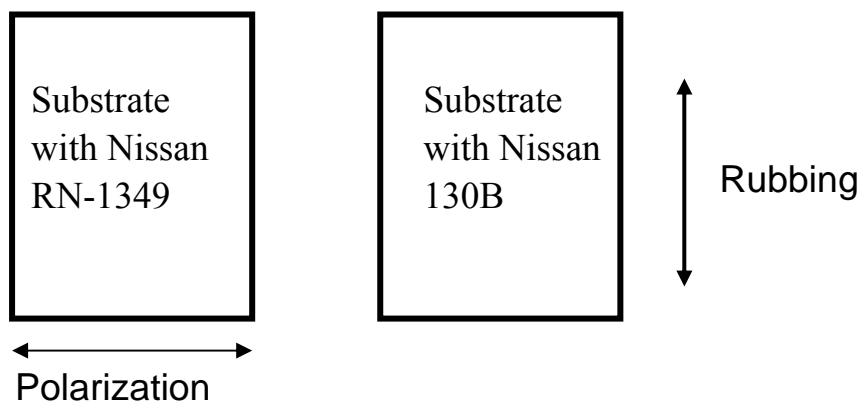


圖 4-1 紫外光線偏振方向與摩刷配向方向示意圖

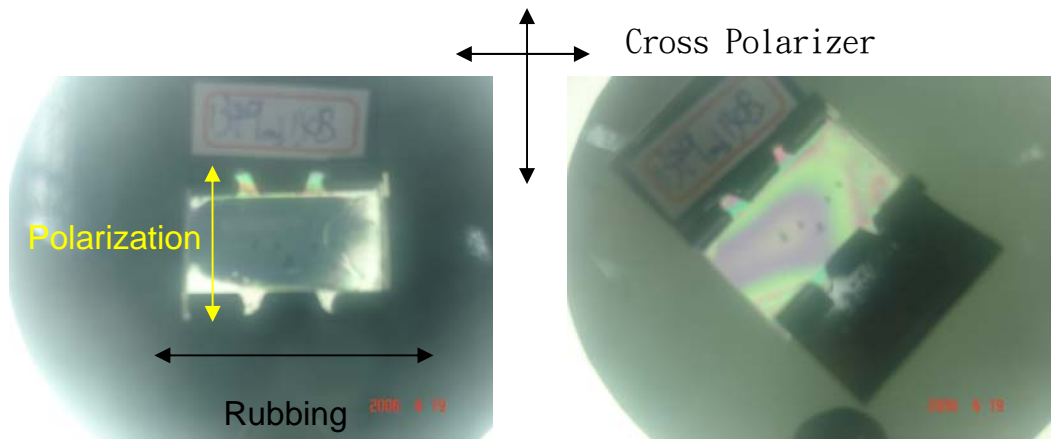


圖 4-2 確定 Nissan RN-1349 光配向方向之照片

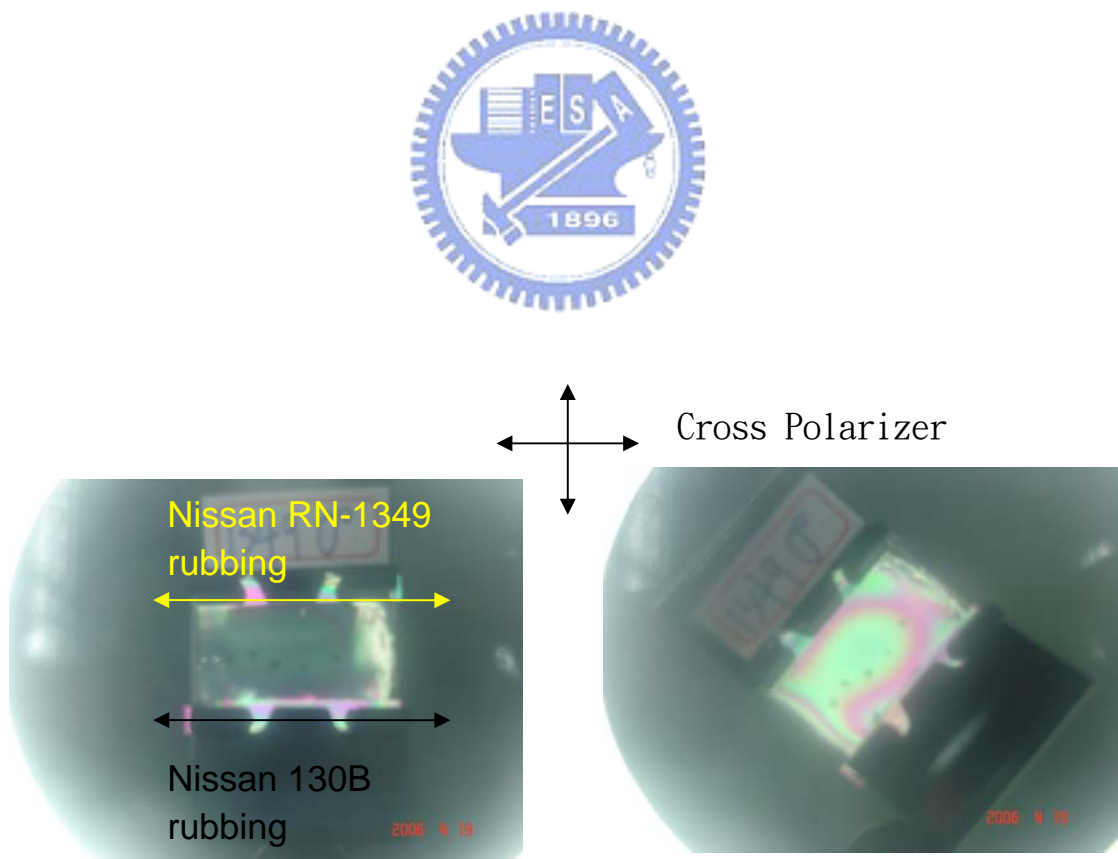


圖 4-3 確定 Nissan RN-1349 摩刷配向方向之照片

表 4-1 溫度與電阻值對照表

Temperature Versus Resistance: -40 to +150°C

Temp. °C	Res. Ohms	Temp. °C	Res. Ohms	Temp. °C	Res. Ohms	Temp. °C	Res. Ohms
-40	75.80K	+10	4484	+ 60	560.5	+110	115.2
39	70.94K	11	4275	61	540.7	111	112.0
38	66.42K	12	4076	62	521.7	112	109.0
37	62.22K	13	3888	63	503.5	113	106.1
36	58.31K	14	3710	64	486.1	114	103.2
35	54.66K	15	3540	65	469.3	115	100.5
34	51.27K	16	3380	66	453.1	116	97.8
33	48.11K	17	3227	67	437.7	117	95.2
32	45.17K	18	3083	68	422.8	118	92.7
31	42.42K	19	2945	69	408.5	119	90.3
-30	39.86K	+20	2815	+ 70	394.8	+120	87.9
29	37.47K	21	2691	71	381.5	121	85.6
28	35.23K	22	2573	72	368.8	122	83.4
27	33.15K	23	2461	73	356.6	123	81.3
26	31.20K	24	2354	74	344.9	124	79.2
25	29.37K	25	2253	75	333.5	125	75.2
24	27.67K	26	2157	76	322.7	126	75.2
23	26.07K	27	2065	77	312.2	127	73.3
22	24.57K	28	1978	78	302.1	128	71.5
21	23.17K	29	1894	79	292.4	129	69.7
-20	21.86K	+30	1815	+ 80	283.1	+130	68.0
19	20.83K	31	1740	81	274.1	131	66.3
18	19.48K	32	1668	82	265.4	132	64.7
17	18.40K	33	1599	83	257.1	133	63.1
16	17.38K	34	1534	84	249.0	134	61.5
15	16.43K	35	1472	85	241.3	135	60.0
14	15.53K	36	1412	86	233.8	136	58.6
13	14.69K	37	1355	87	226.6	137	57.2
12	13.90K	38	1301	88	219.7	138	55.8
11	13.16K	39	1249	89	213.0	139	54.5
-10	12.46K	+40	1200	+ 90	206.5	+140	53.2
9	11.80K	41	1153	91	200.3	141	51.9
8	11.18K	42	1108	92	194.3	142	50.7
7	10.60K	43	1065	93	188.5	143	49.5
6	10.05K	44	1023	94	182.8	144	48.4
5	9534	45	984.1	95	177.4	145	47.3
4	9045	46	946.9	96	172.2	146	46.2
3	8586	47	910.4	97	167.2	147	45.1
2	8152	48	876.0	98	162.3	148	44.1
1	7742	49	843.0	99	157.8	149	43.1
0	7356	+50	811.5	+100	153.1	+150	42.1
+ 1	6991	51	781.3	101	148.7		
2	6646	52	752.4	102	144.4		
3	6320	53	724.7	103	140.3		
4	6012	54	698.1	104	136.4		
5	5721	55	672.7	105	132.5		
6	5448	56	648.3	106	128.8		
7	5185	57	625.0	107	125.3		
8	4939	58	602.6	108	121.8		
9	4705	59	581.1	109	118.4		

表 4-2 不同溫度下照光的樣品之預傾角數值表

溫度(°C)	預傾角(deg.)	標準差
30	0.166	0.135745
40	0.206	0.088015
50	0.178	0.137756
60	0.168	0.128595
70	0.276	0.180074
80	0.305	0.148963



不同溫度照光對預傾角之影響

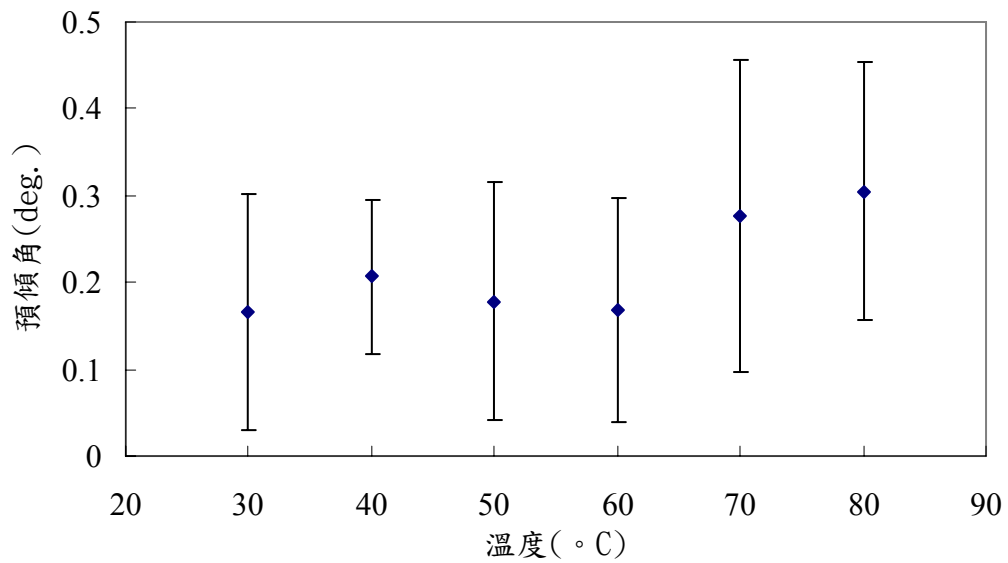


圖 4-4 溫度對預傾角影響之關係圖

表 4-3 不同溫度下照光的樣品之表面定向強度數值表

溫度(°C)	厚度(μm)	表面定向強度(J/m ²)	標準差
30	9.86(L) & 8.04(R)	1.86E-05	6.2E-06
40	13.44(L) & 11.34(R)	1.22E-05	3.8E-06
50	12.88(L) & 9.86(R)	1.68E-05	5E-06
60	8.04(L) & 9.83(R)	1.64E-05	4.3E-06
70	8.62(L) & 10.03(R)	1.85E-05	4.4E-06
80	10.92(L) & 10.72(R)	1.58E-05	8.2E-06



不同溫度照光對表面定向強度之影響

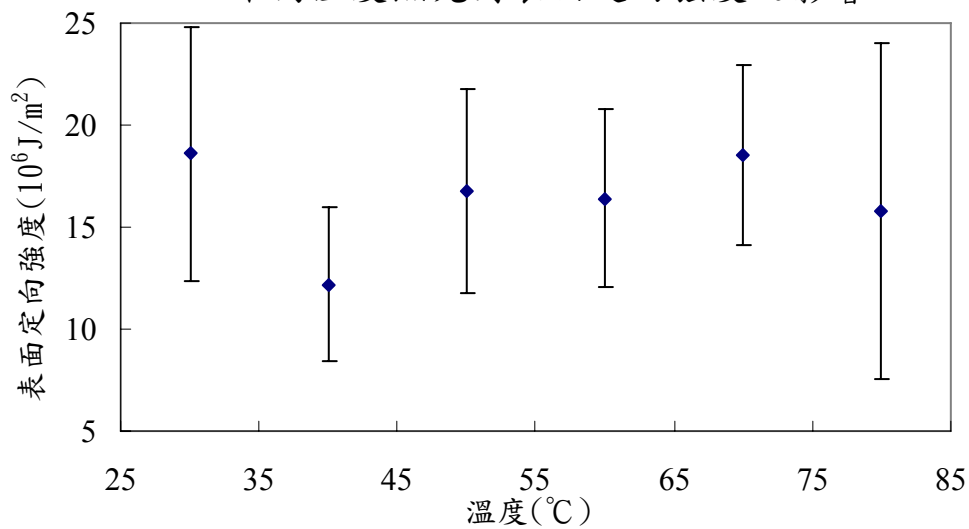


圖 4-5 溫度對表面定向強度影響之關係圖

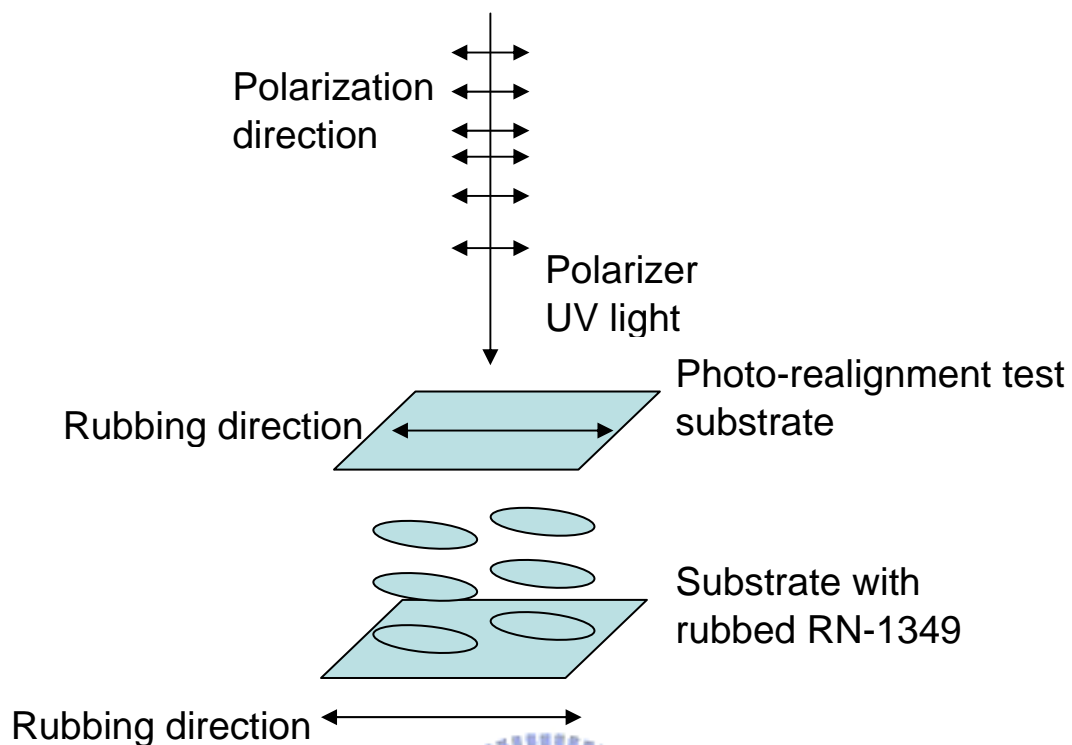


圖 4-6 光致重新配向實驗示意圖



表 4-4 光致重新配向實驗數據表，Hard rubbing， $\theta=90^\circ$ ，有預照， $d=9.4\mu\text{m}$

照光時間(min)	照光能量密度(kJ/cm^2)	Twist angle(deg.)	$A_2(\text{J}/\text{m}^2)$
0*	0	10.30	6.451E-07
40*	0.189	19.52	6.839E-07
80*	0.378	25.18	7.225E-07
120*	0.567	28.06	7.474E-07
160*	0.756	29.35	7.599E-07
200*	0.945	32.44	7.935E-07
240	1.022	37.22	8.574E-07
280	1.192	42.41	9.476E-07
320	1.363	43.41	9.680E-07
360	1.533	43.91	9.787E-07
400	1.704	44.31	9.874E-07
440	1.874	44.21	9.852E-07

表 4-5 光致重新配向實驗數據表，Soft rubbing， $\theta=90^\circ$ ，有預照， $d=10.01\mu\text{m}$

照光時間(min)	照光能量密度(kJ/cm^2)	Twist angle(deg.)	A2(J/m^2)
0*	0	43.03	9.005E-07
40*	0.189	55.72	1.313E-06
80*	0.378	65.21	2.013E-06
90*	0.425	69.07	2.550E-06
100*	0.472	72.44	3.291E-06
120*	0.567	71.85	3.133E-06
160*	0.756	70.95	2.920E-06
200*	0.945	70.95	3.133E-06
240	1.022	71.79	3.117E-06
280	1.192	71.79	3.117E-06
320	1.363	71.85	3.133E-06
360	1.533	72.14	3.210E-06
400	1.704	72.08	3.194E-06
440	1.874	71.94	3.155E-06
480	2.044	71.86	3.135E-06

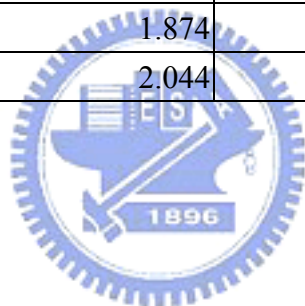


表 4-6 光致重新配向實驗數據表，Hard rubbing， $\theta=90^\circ$ ，沒預照， $d=9.0\mu\text{m}$

照光時間(min)	照光能量密度(kJ/cm^2)	Twist angle(deg.)	A2(J/m^2)
0	0	1.170	
40	0.170	2.731	6.597E-07
80	0.340	3.891	6.608E-07
120	0.511	4.933	6.620E-07
160	0.681	5.485	6.628E-07
200	0.852	5.593	6.630E-07
240	1.022	5.518	6.629E-07
320	1.363	5.898	6.635E-07
360	1.533	5.724	6.632E-07
400	1.704	6.816	6.651E-07
440	1.874	6.870	6.652E-07
480	2.044	6.403	6.643E-07

表 4-7 光致重新配向實驗數據表，Soft rubbing， $\theta=90^\circ$ ，沒預照， $d=9.12\mu\text{m}$

照光時間(min)	照光能量密度(kJ/cm^2)	Twist angle(deg.)	$A_2(\text{J}/\text{m}^2)$
0	0	2.033	
40	0.170	7.938	6.307E-07
80	0.340	10.84	6.386E-07
120	0.511	13.43	6.479E-07
160	0.681	14.89	6.542E-07
200	0.852	15.38	6.564E-07
240	1.022	15.18	6.555E-07
280	1.192	15.91	6.590E-07
320	1.363	16.31	6.610E-07
360	1.533	17.26	6.659E-07
400	1.704	18.13	6.707E-07
440	1.874	18.30	6.717E-07
480	2.044	18.73	6.742E-07



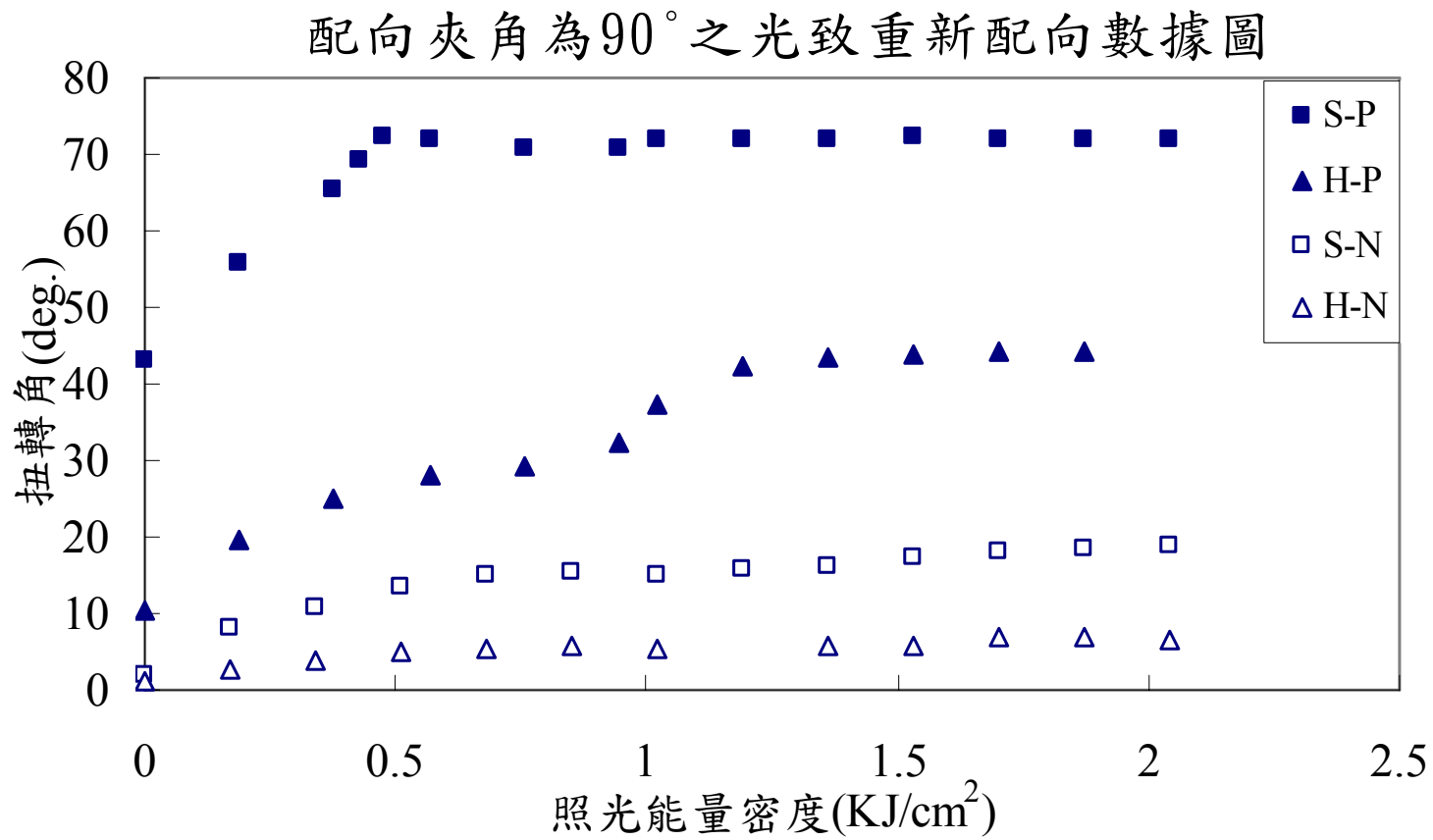


圖 4-7 固定光配向方向與摩刷配向方向為 90° 之扭轉角與照光能量密度關係圖

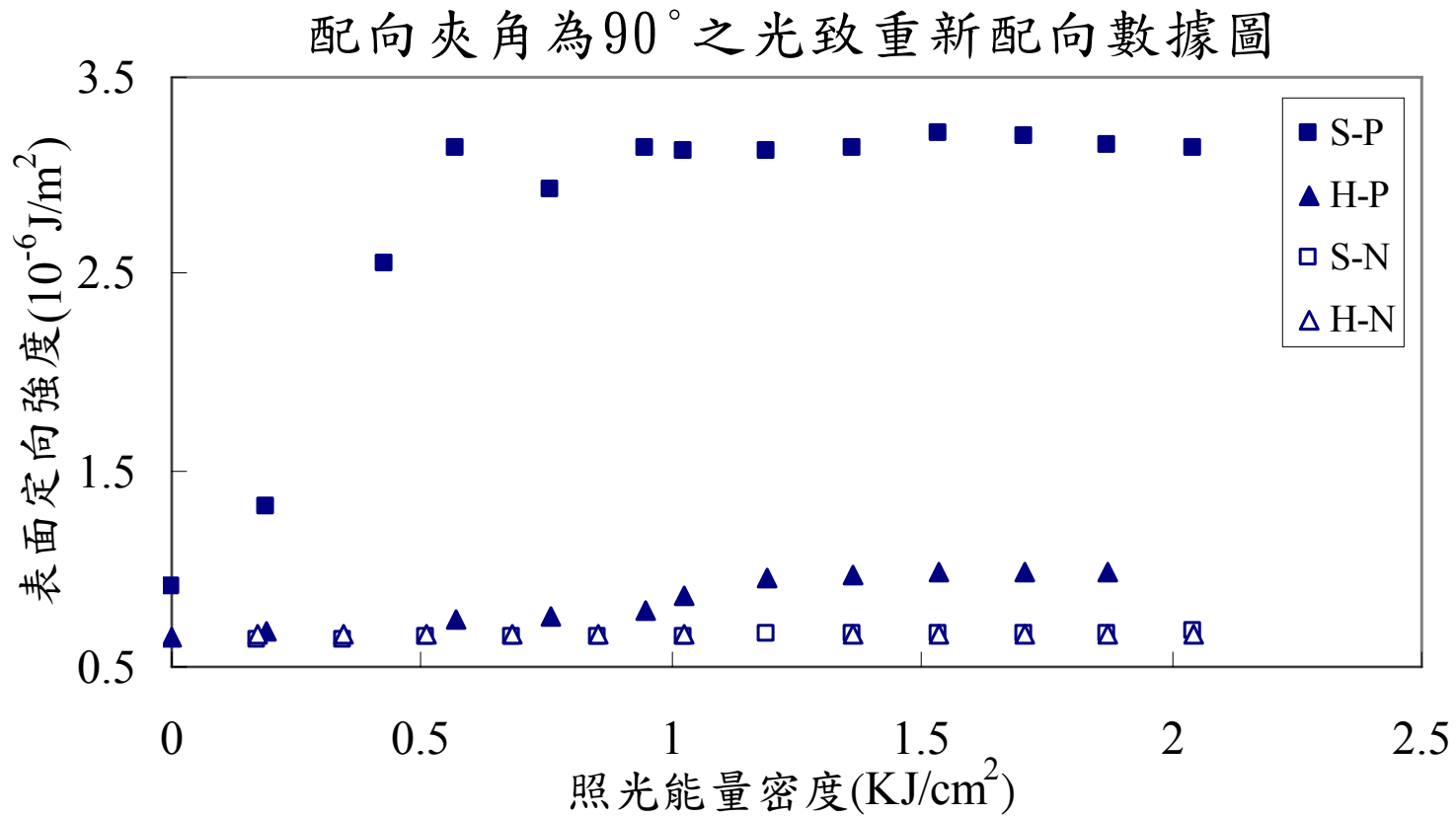


圖 4-8(a) 固定光配向方向與摩擦配向方向為 90° 之表面定向強度與照光能量密度關係圖

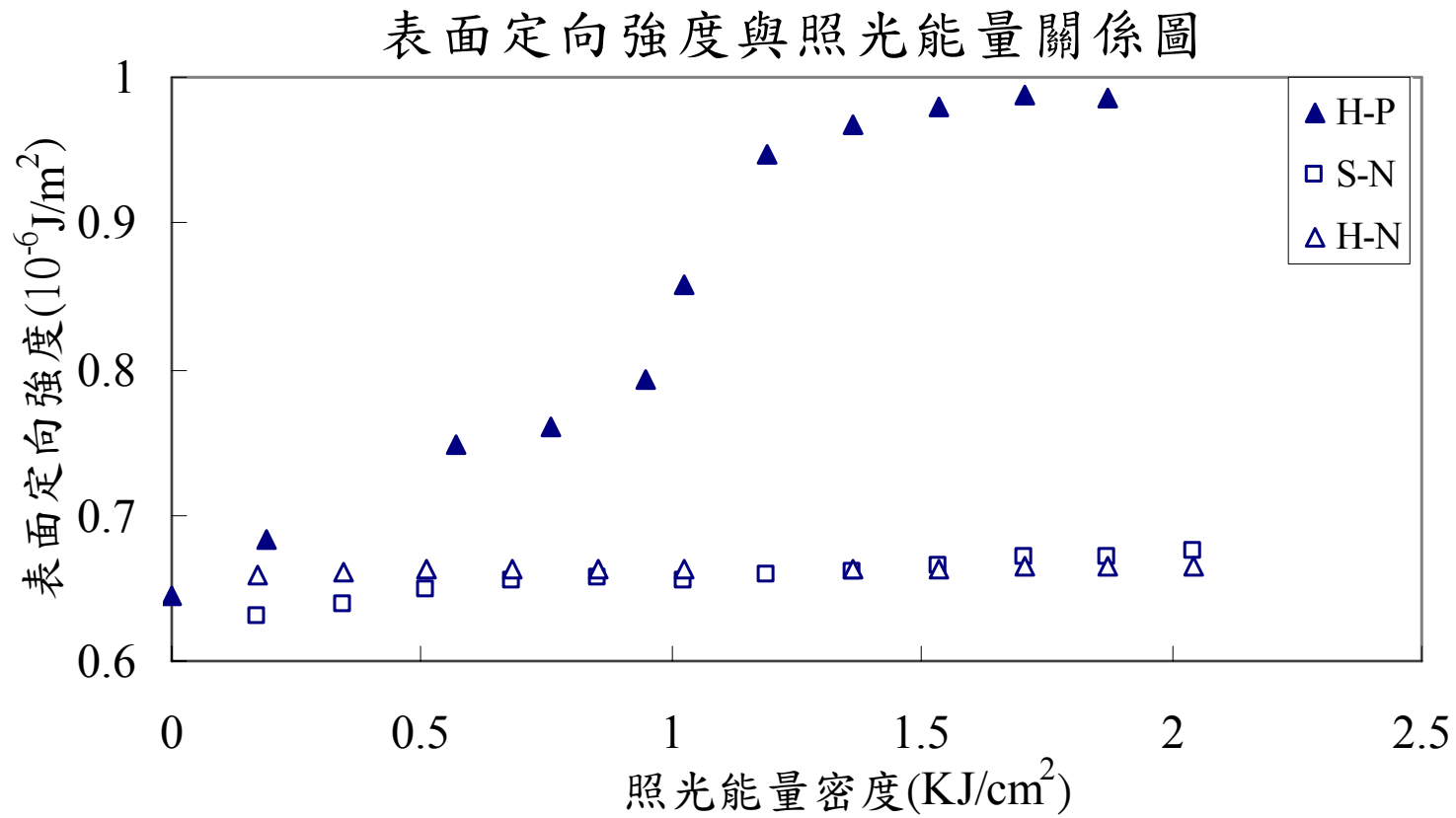


圖 4-8(b) 固定光配向方向與磨刷配向方向為 90°之表面定向強度與照光能量密度關係圖

，本圖為圖 4-8(a)之區域放大圖

表 4-8 光致重新配向實驗數據表，Hard rubbing， $\theta=60^\circ$ ，有預照， $d=11.17\mu\text{m}$

照光時間(min)	照光能量密度(kJ/cm^2)	Twist angle(deg.)	A2(J/m^2)
0*	0	11.84	2.233E-07
40*	0.189	16.59	3.116E-07
80*	0.378	16.69	3.137E-07
160*	0.756	28.51	6.032E-07
200*	0.945	30.91	6.867E-07
240*	1.134	28.51	6.032E-07
280*	1.323	25.53	5.149E-07
320*	1.512	28.43	6.005E-07
360*	1.702	26.12	5.311E-07
400*	1.891	26.12	5.311E-07
440*	2.080	29.71	6.433E-07
480*	2.269	28.51	6.032E-07



表 4-9 光致重新配向實驗數據表，Hard rubbing， $\theta=60^\circ$ ，沒預照， $d=12.13\mu\text{m}$

照光時間(min)	照光能量密度(kJ/cm^2)	Twist angle(deg.)	A2(J/m^2)
0*	0	0.716926	
40*	0.18912	3.17501	1.14766E-07
80*	0.37824	4.5624	1.60829E-07
120*	0.56736	7.11394	2.45724E-07
140*	0.66192	6.94631	2.40015E-07
180*	0.85104	7.31882	2.52745E-07
220*	1.04016	7.8031	2.69552E-07
260*	1.22928	7.76585	2.68248E-07
280*	1.32384	8.70652	3.0187E-07
320*	1.51296	9.51686	3.32211E-07
360*	1.70208	8.29671	2.87036E-07
400*	1.8912	8.56681	2.96778E-07
440*	2.08032	9.26537	3.22638E-07
480*	2.26944	9.2188	3.20881E-07

表 4-10 光致重新配向實驗數據表，Soft rubbing， $\theta=60^\circ$ ，有預照， $d=11.11\mu\text{m}$

照光時間(min)	照光能量密度(kJ/cm^2)	Twist angle(deg.)	A2(J/m^2)
0	0	35.32	9.262E-07
10	0.042	44.08	1.793E-06
20	0.085	48.70	2.982E-06
40	0.170	51.65	4.780E-06
80	0.340	51.50	4.640E-06
120	0.511	55.04	1.277E-05
160	0.681	56.17	
200	0.852	58.21	
240	1.022	56.13	
280	1.192	55.60	1.724E-05
320	1.363	55.73	1.876E-05
360	1.533	55.51	1.640E-05
400	1.704	55.61	1.737E-05
440	1.874	55.73	1.876E-05
480	2.044	55.60	1.724E-05



表 4-11 光致重新配向實驗數據表，Soft rubbing， $\theta=60^\circ$ ，沒預照， $d=9.18\mu\text{m}$

照光時間(min)	照光能量密度(kJ/cm^2)	Twist angle(deg.)	A2(J/m^2)
0	0	2.184	
40	0.170	10.06	2.322E-07
80	0.340	12.29	2.812E-07
120	0.511	15.28	3.489E-07
160	0.681	15.59	3.562E-07
200	0.852	16.59	3.800E-07
240	1.022	16.33	3.739E-07
280	1.192	16.81	3.853E-07
320	1.363	18.11	4.176E-07
360	1.533	18.27	4.217E-07
400	1.704	19.52	4.543E-07
440	1.874	19.70	4.590E-07
480	2.044	19.77	4.610E-07

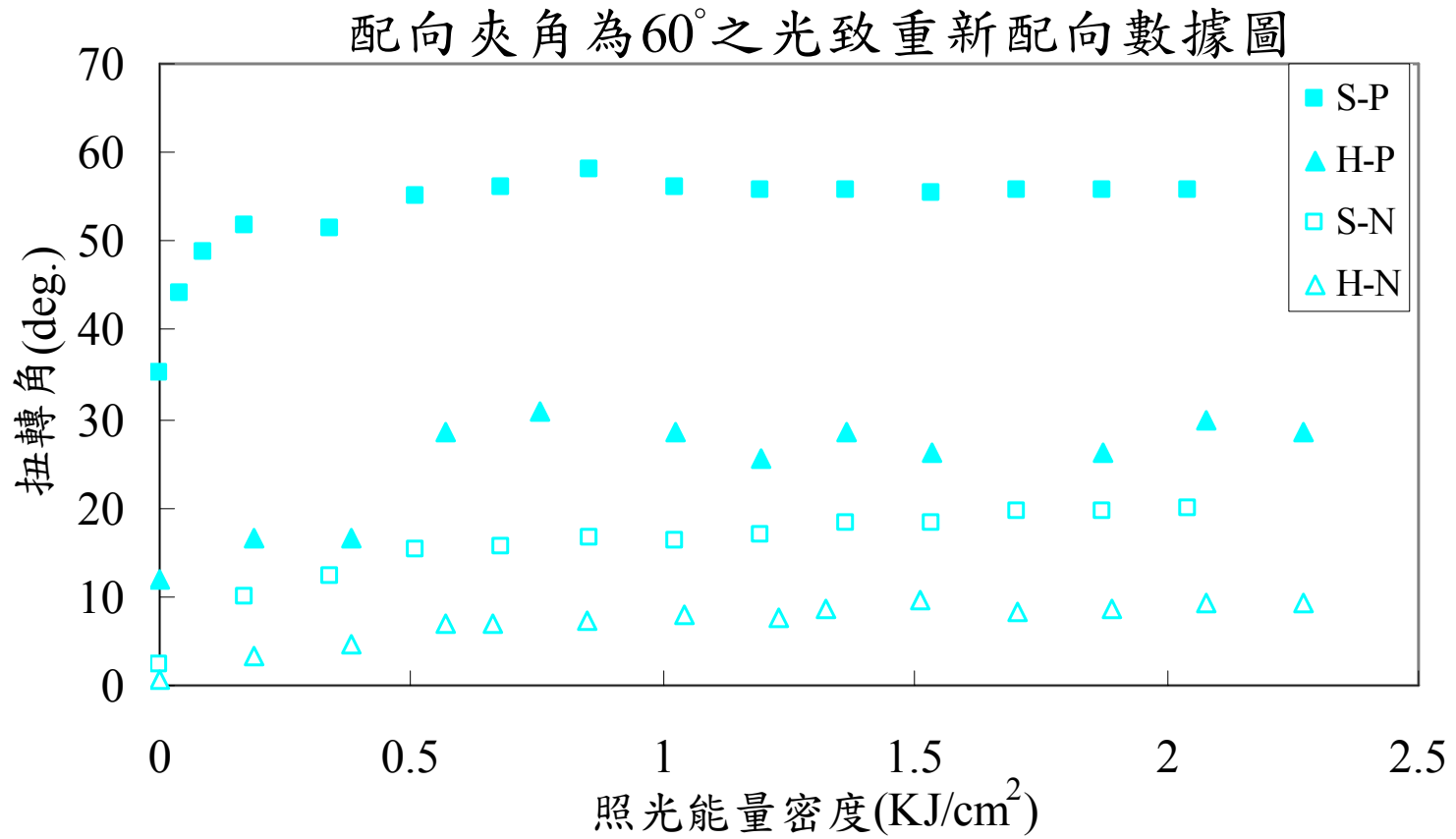


圖 4-9 固定光配向方向與摩刷配向方向為 60° 之扭轉角與照光能量密度關係圖

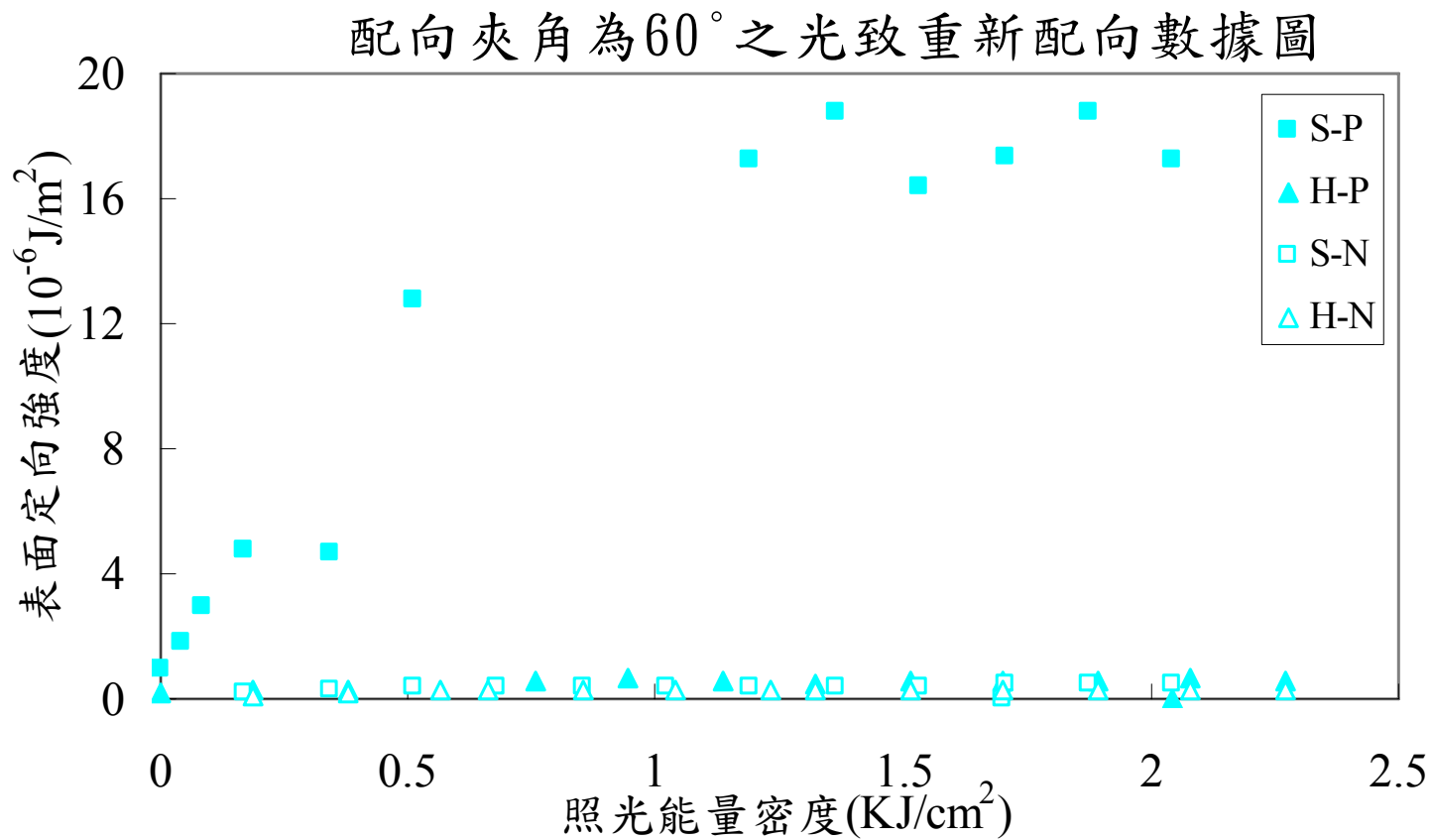


圖 4-10(a) 固定光配向方向與摩刷配向方向為 60° 之表面定向強度與照光能量密度關係圖

配向夾角為 60° 之光致重新配向數據圖

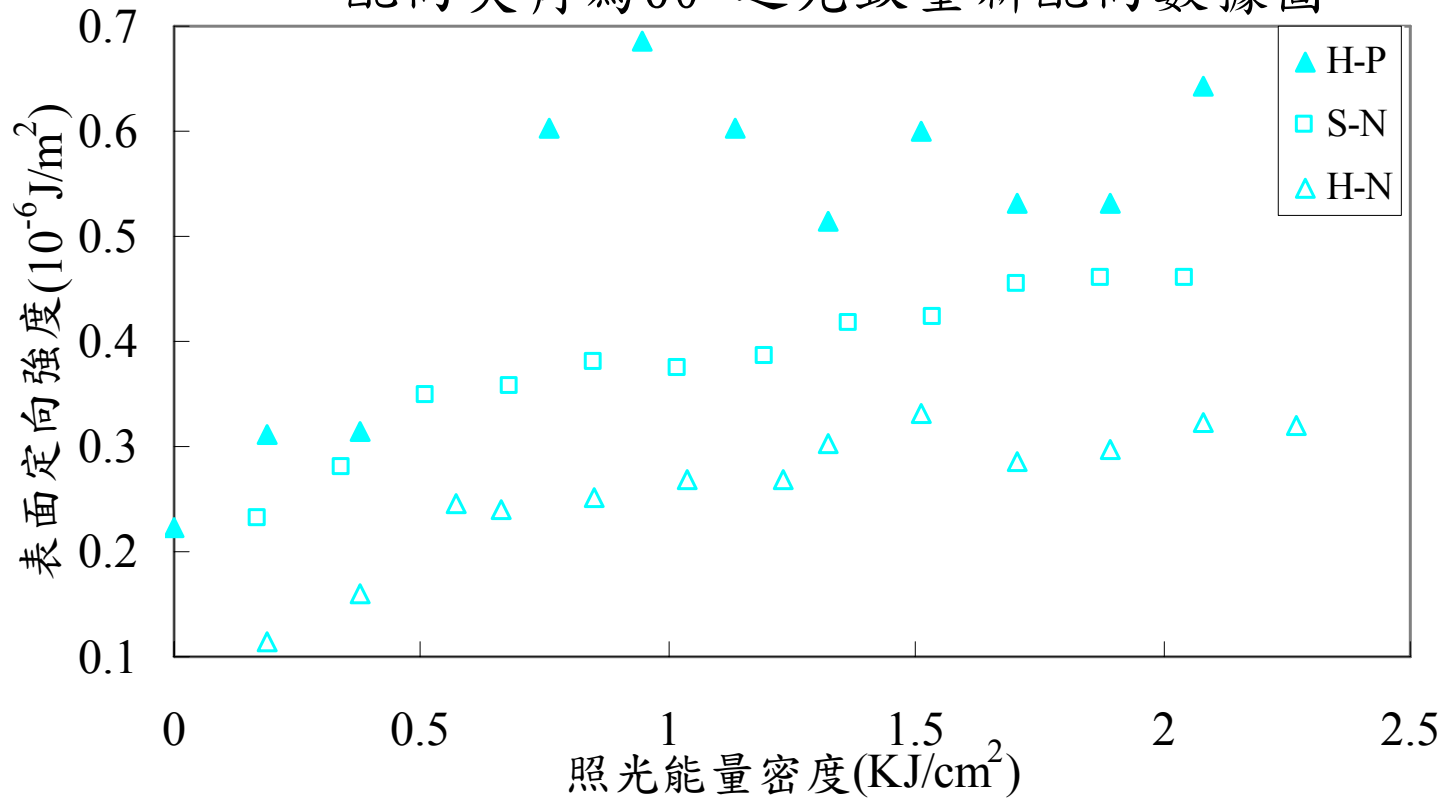


圖 4-10(b) 固定光配向方向與摩刷配向方向為 60° 之表面定向強度與照光能量密度關係圖，本圖為圖 4-10(a) 之區域放大圖

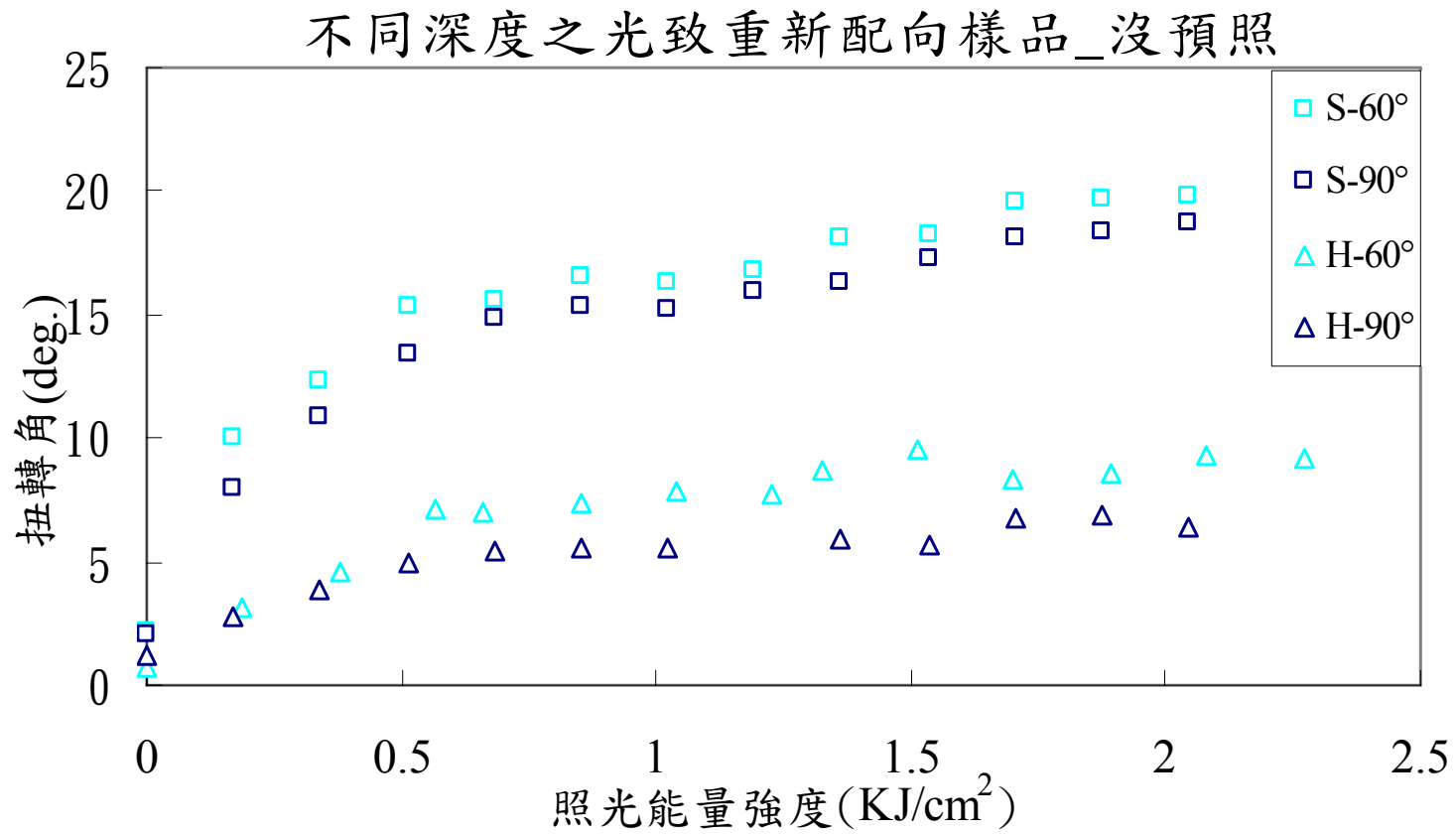


圖 4-11 固定沒有預照之扭轉角與照光能量密度關係圖

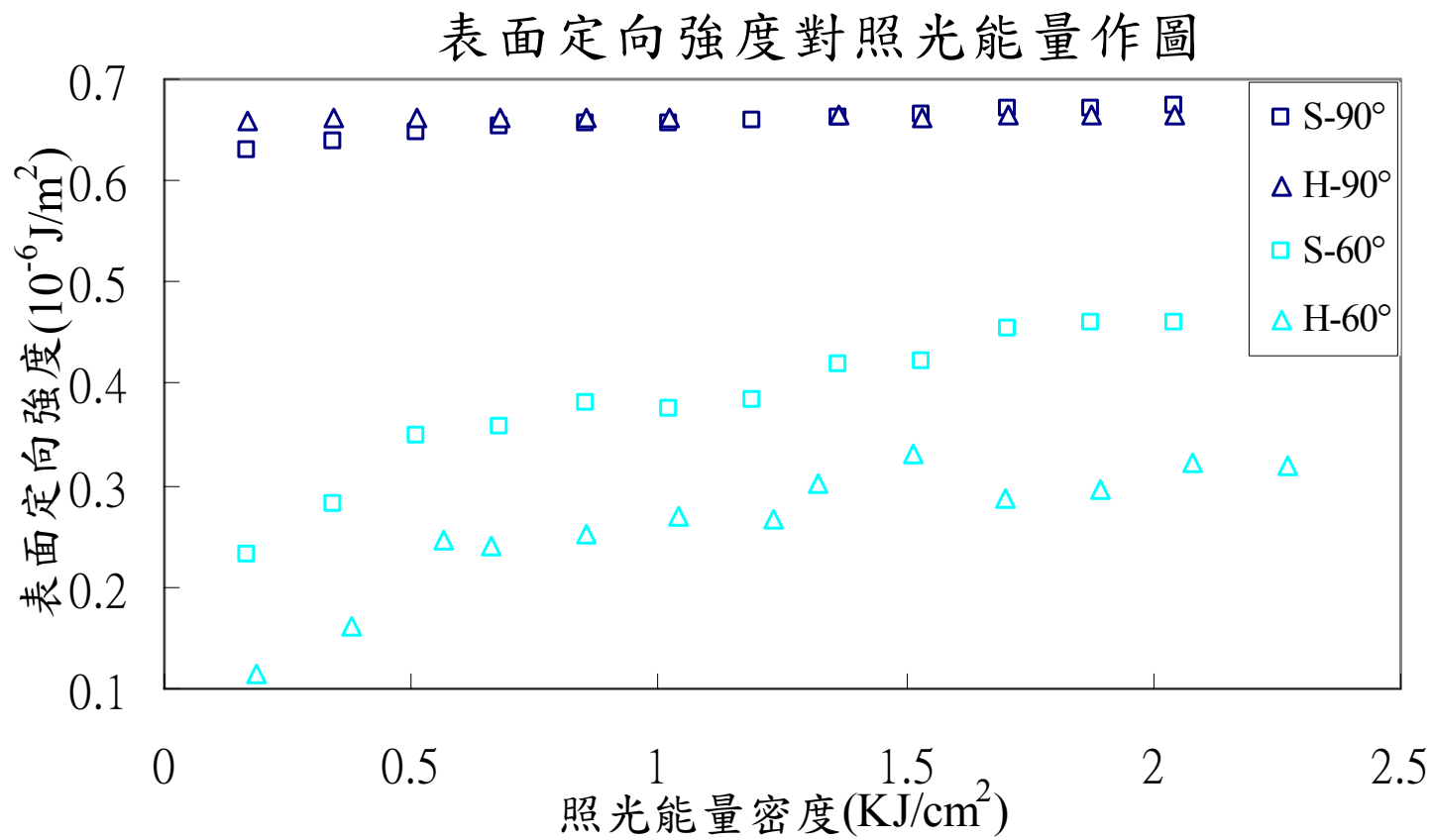


圖 4-12 固定沒有預照之表面定向強度與照光能量密度關係圖

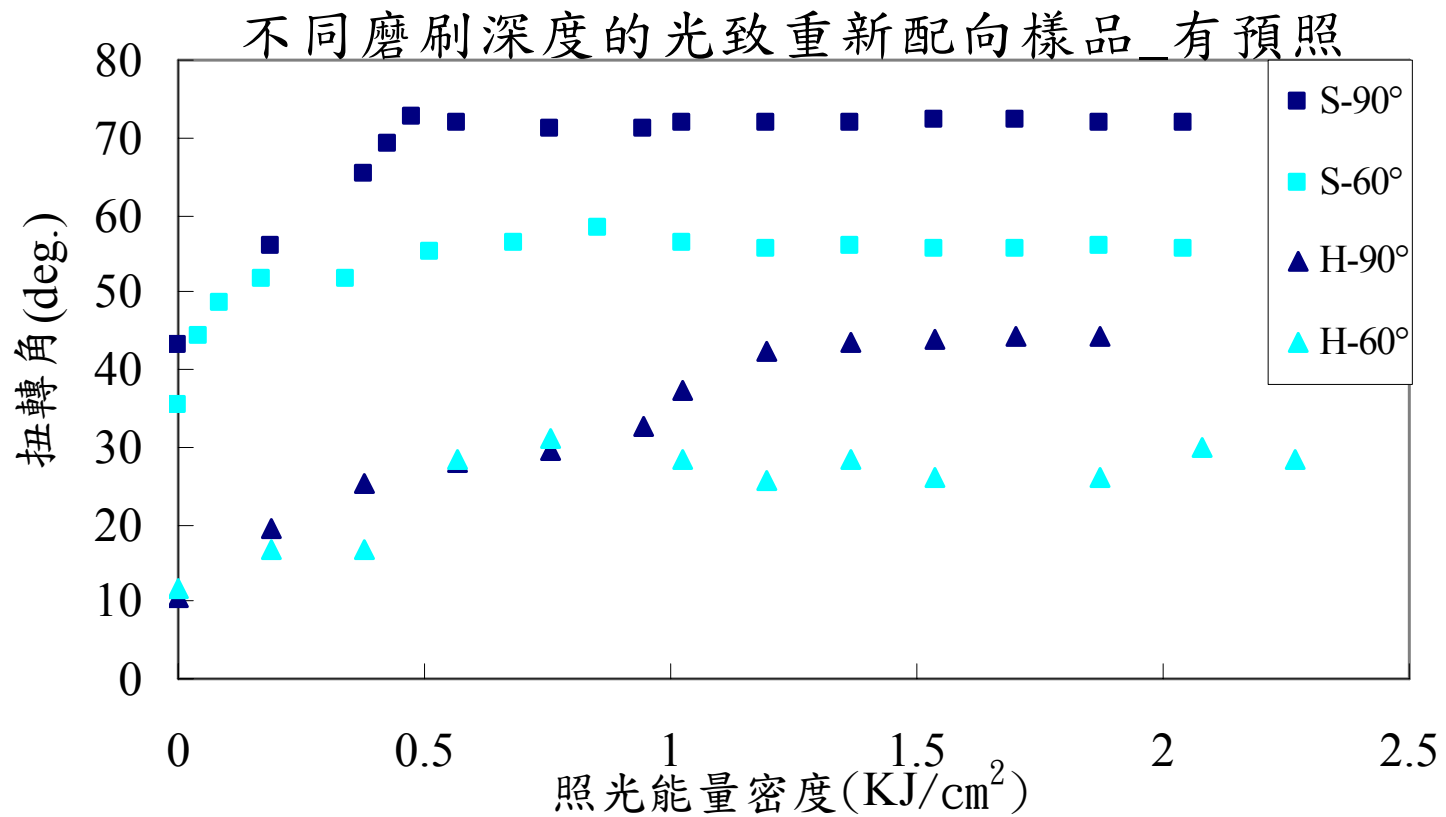


圖 4-13 固定有預照之扭轉角與照光能量密度關係圖

表面定向強度對照光能量作圖

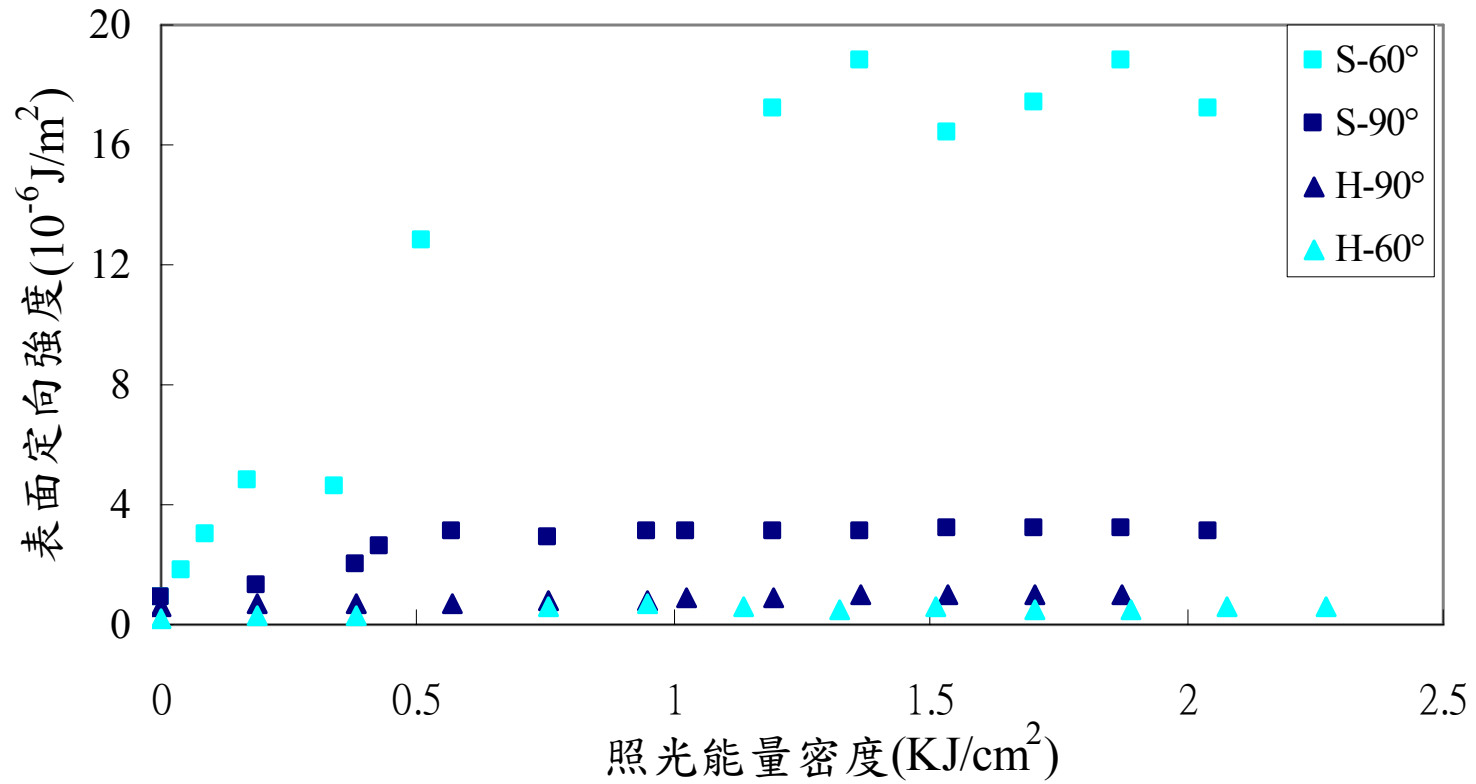


圖 4-14(a) 固定有預照之表面定向強度與照光能量密度關係圖

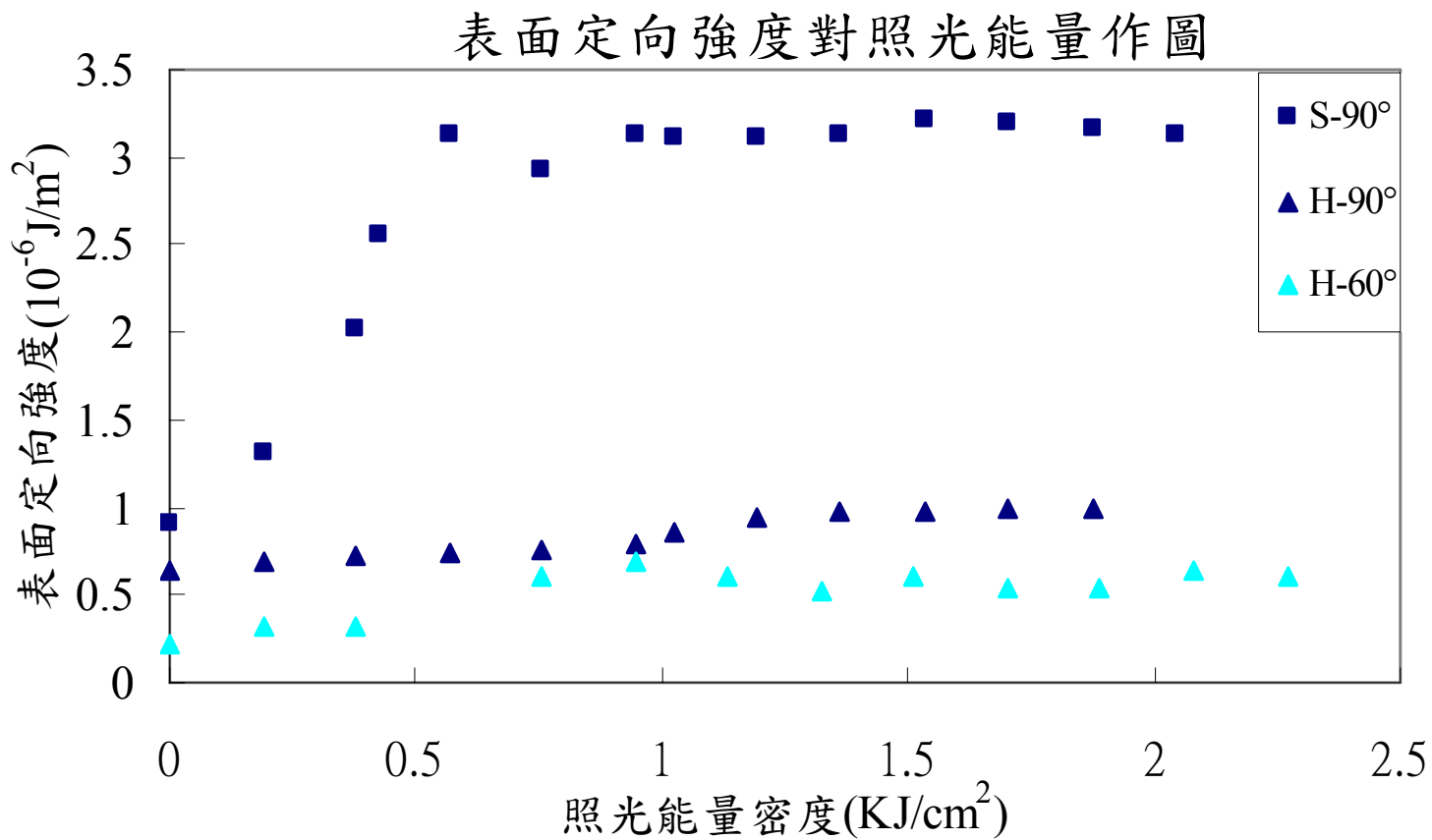


圖 4-14(b) 固定有預照之表面定向強度與照光能量密度關係圖
 ，本圖為圖 4-14(a)之區域放大圖