

國立交通大學

電子物理學系

碩士論文

利用共平面電極結構量測向列型液晶的
扭曲彈性係數

Measuring the twist elastic constant of nematic liquid crystal by
in plane electrode structure

研究生：楊政達

指導教授：趙如蘋 教授

中華民國九十四年七月

利用共平面電極結構量測向列型液晶的
扭曲彈性係數

Measuring the twist elastic constant of nematic liquid crystal by
in plane electrode structure

研究生：楊政達

Student: Cheng-Ta Yang

指導教授：趙如蘋 博士

Advisor: Dr. Ru-Pin Chao Pan

國立交通大學

電子物理學系



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 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年七月


利用共平面電極結構量測向列型液晶的 扭曲彈性係數

研究生：楊政達

指導教授：趙如蘋 博士

國立交通大學電子物理學系碩士班

摘 要



本實驗證實了一個可用來量測液晶扭曲彈性係數的方法，液晶的扭曲彈性係數(twist elastic constant K_{22})在許多基礎的研究與應用上，扮演了很重要的角色，例如在表面定向強度的測量。本實驗主要是利用外加高電場來控制液晶光軸(director)的指向，來測量出IPS (In-Plane-Switching)的水平配向液晶樣品，在外加高電場下的臨界電壓值 V_{th} (threshold voltage)，把臨界電壓值 V_{th} 代入描述液晶在外加平面電場下的運動行為公式，進而求出扭曲彈性係數 K_{22} 的值，我們並對此液晶樣品本身作溫度控制，求出液晶在液晶態的溫度範圍中，不同溫度下的 K_{22} 值。本實驗同時量測了5CB和E7兩種不同的液晶，並與文獻值作比較。

Measuring the twist elastic constant of nematic liquid crystal by in plane electrode structure

Student: Cheng-Ta Yang

Advisor: Dr. Ru-Pin Chao Pan

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

ABSTRACT

A method of measuring the twist elastic constant (K_{22}) of a nematic liquid crystal (NLC) has been demonstrated. This constant is an important parameter of NLC for both fundamental research and applications. It is also often required to experimentally deduce other parameters of NLC, such as azimuthal anchoring strength. A simple method without applying magnetic field is on demanding. We measured the K_{22} with a homogeneous cell with laser beam (632.8 nm). An in-plane-switching configuration was used to apply the electric field. The constant can then be obtained by measuring the threshold voltage. The temperature dependence of K_{22} of 5CB and E7 are measured. The results are compared with other literatures.

致 謝

由衷感謝我的指導教授 趙如蘋老師帶我進入液晶物理的研究領域，老師細心的指導，讓我對於科學研究的方法和態度，獲益良多。

感謝實驗室的學長姐，雅峰、昭遠、阿達、信穎、欣穎，由於你們不厭其煩的熱心協助，才讓我的實驗能夠順利進行。

感謝實驗室的同學和學弟妹，家任、卓帆、宇泰、佳瑩、國騰，有了你們，讓我們的實驗室多了許多歡笑和樂趣。

感謝我的父母，從小到大對我的付出，讓我在精神生活和物質生活上都不曾匱乏，也能專心的完成我的碩士班學業。

感謝一直在背後支持我、鼓勵我的女友意雯，願意相信我，陪在我身邊，最後感謝所有幫助過我的人，將這份喜悅與你們分享!

目 錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	ii
致謝	.....	iii
目錄	.....	iv
圖表目錄	.....	vi
第一章	緒論	1
第二章	實驗原理	3
2-1	共平面電極結構(In-plane switching)	3
2-1-1	IPS 液晶樣品外加電場的行為模式	3
2-1-2	IPS 的光電特性	6
2-2	空樣品厚度(cell gap)量測原理	7
2-3	預傾角的量測原理	8
2-4	鍍金原理	12
第三章	實驗方法與樣品製作介紹	14
3-1	介電常數量測法	14
3-1-1	量測原理	14
3-1-2	液晶樣品製作	15
3-2	電極間距的量測	19
3-3	扭曲彈性係數量測系統介紹	20
3-3-1	量測系統介紹	20
3-3-2	溫控裝置介紹	21
3-3-3	臨界電壓值的判定	21

第四章	實驗條件的測試	22
4-1	偏移角(offset angle)	22
4-2	升壓與降壓圖形的重合	22
4-3	三種不同量測方法的測試	22
4-4	相同厚度不同電極間距的樣品量測	23
4-5	溫度穩定等待時間的測試	24
第五章	實驗結果與分析	26
5-1	介電常數量測結果	26
5-1-1	5CB 介電常數量測結果	26
5-1-2	E7 介電常數量測結果	27
5-1-3	清亮點量測	27
5-2	扭曲彈性係數量測結果	28
5-2-1	5CB 扭曲彈性係數量測結果	28
5-2-2	E7 扭曲彈性係數量測結果	28
第六章	結論與未來展望	29
附錄(一)	擬合扭曲彈性係數的相關參數	30
附錄(二)	理論模擬	31
參考文獻		32

圖 表 目 錄

圖 2-1	液晶的三種形變	33
圖 2-2	IPS 樣品 side view 示意圖	34
圖 2-3	IPS 樣品 top view 示意圖	34
圖 2-4	IPS 樣品在外加電壓(on state)的示意圖	34
圖 2-5	IPS 樣品在外加電壓時各層之間 Azimuthal angle 的模擬 圖形	35
圖 2-6	雷射光入射空樣品光程差示意圖	35
圖 2-7	厚度量測系統示意圖(樣品繞 x 軸旋轉以改變入射角)	35
圖 2-8	空樣品之穿透光強度與入射角之關係圖	36
圖 2-9	預傾角與玻璃基版的關係	36
圖 2-10	考慮預傾角的光程差路徑圖	36
圖 2-11	穿透光強度對樣品旋轉角度的變化關係圖	37
圖 2-12	用來鍍金的離子覆膜機	37
圖 2-13	IPS 液晶樣品	37
圖 3-1	液晶平行板電容器示意圖	38
圖 3-2	5CB 水平配向液晶樣品的穿透光強度與外加電壓關係圖	38
圖 3-3	製作完成的水平、垂直配向液晶樣品	39
圖 3-4	IPS 液晶樣品電極間距在偏光顯微鏡下的照片	39
圖 3-5	交流電壓放大器的輸入與輸出電壓值	39

圖 3-6	K_{22} 量測裝置示意圖	40
圖 3-7	Oven 裝置示意圖	40
圖 3-8	Oven 裝置內部溫度達到穩定示意圖	41
圖 3-9	利用雙插法求得 IPS 樣品的臨界電壓值	41
圖 4-1	IPS 樣品之偏移角 θ_0 (上視圖)	42
圖 4-2	IPS 液晶樣品升壓降壓的量測圖形	42
圖 4-3	IPS 液晶樣品在不加電壓時穿透光強度與入射角之關係	43
圖 4-4	IPS 液晶樣品在斜向入射的測試結果	43
圖 4-5	不同電極間距的 IPS 液晶樣品	44
圖 4-6	不同電極間距的臨界電壓量測值	44
圖 4-7	電極間距照片 ($l=670\pm 10\mu\text{m}$)	45
圖 4-8(a)	沒貼不透光膠帶的臨界電壓量測圖	45
圖 4-8(b)	有貼不透光膠帶的臨界電壓量測圖	45
圖 4-9	在 30°C 下不同等待時間的臨界電壓量測圖	46
圖 4-10	同一個量測點連續量測臨界電壓圖	46
圖 4-11	雷射光不透過液晶樣品穿透光強度與時間關係圖	47
圖 4-12	雷射光有透過液晶樣品穿透光強度與時間關係圖	47
圖 5-1	Merck 5CB 介電常數對溫度的關係圖	48
圖 5-2	Merck 5CB 介電常數對 T_c-T 的關係圖	48

圖 5-3	5CB (Merck 大立高分子 文獻值)三者介電常數關係圖	49
圖 5-4	Merck E7 介電常數對溫度的關係圖	49
圖 5-5	Merck E7 介電常數對 T_c -T的關係圖	50
圖 5-6	同一個樣品上不同點間的溫度與穿透光強度關係圖	50
圖 5-7	Merck 5CB K_{22} 值對 T_c -T的關係圖	51
圖 5-8	大立高分子 5CB K_{22} 值對 T_c -T的關係圖	51
圖 5-9	5CB(Merck 大立高分子 文獻值)三者 K_{22} 關係圖	52
圖 5-10	Merck E7 K_{22} 值對 T_c -T的關係圖	52
附錄圖 A	5CB 介電常數對溫度的變化關係圖	53
附錄圖 B	5CB K_{11} K_{22} K_{33} 對溫度的變化關係圖	53
附錄圖 C	理論模擬外加電壓與穿透光強度關係圖	54
表 4-1	相同厚度不同電極間距的量測結果	55
表 5-1	Merck 5CB 的介電常數量測結果	56
表 5-2	大立高分子 5CB 的介電常數量測結果	57
表 5-3	Merck E7 的介電常數量測結果	58
表 5-4	Merck 5CB的扭曲彈性係數(K_{22})量測結果	59
表 5-5	大立高分子 5CB的扭曲彈性係數(K_{22})量測結果	60
表 5-6	Merck E7 的扭曲彈性係數(K_{22})量測結果	61

第一章 緒論

自從液晶 (Liquid Crystals) 在西元 1888 年被一位奧地利的植物學家發現至今，已經有一百多年的歷史，在這段期間，由於液晶所具有雙折射性(birefringence)的光學性質，以及利用外加電場、磁場的作用，可以有效控制液晶分子指向(director)，進而達到液晶配向的效果。所謂的配向，就是使液晶分子從隨機性的方向排列轉變成有方向性的排列，而良好的液晶配向，在液晶平面顯示器中，更是一門重要的研究課題。目前已知的配向方法有：摩刷(rubbing)配向、離子束傾斜轟擊法、以線偏極紫外光 (UV light) 去照射有感光基配向劑的光配向等。



液晶態是一種介於固態和液態之間的中間態，而大多具有液晶態的分子，有特定的形狀，如棒狀分子、圓盤狀分子等。在這個中間態的溫度範圍中，液晶具有許多物理參數的異方性，例如介電常數、折射係數等。在本篇論文中，我們將量測出 5CB 與 E7 兩種液晶在液晶態溫度範圍中的介電常數值，並利用所測得的介電常數值 $\epsilon_{//}$ 和 ϵ_{\perp} ，得到 $\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$ ，進而求出液晶的扭曲彈性係數 K_{22} 的值。由於液晶分子組成的化學結構不同， $\Delta\epsilon$ 可以是正值或負值，分別表示正型液晶與負型液晶，對於 $\Delta\epsilon > 0$ 的正型液晶分子而言，在外加電場時，液晶分子本身會趨向於平行外加電場的方向排列；對於 $\Delta\epsilon < 0$ 的負型液

晶分子而言，在外加電場時，液晶分子本身會趨向於垂直外加電場的方向排列，才會達到最低能量之穩定態。

表面定向強度(surface anchoring strength)為衡量液晶配向程度的重要參數，而在表面定向強度的測量當中，液晶的扭曲彈性係數 K_{22} ，更是不可缺少的重要物理參數。量測 K_{22} 的方法有許多種，可以利用外加磁場[12]或Gruher[13]的方法，但是外加磁場的方法需使用到產生磁場的裝置，而Gruher的方法需要量測出 K_{11} 和 K_{33} 的值，而 K_{11} 和 K_{33} 在量測上的誤差，也會影響到 K_{22} 的準確值。因此本實驗中使用了一個簡單而直接的方法，我們測量出IPS(In-Plane-Switching)的水平配向樣品，在外加高電場下的臨界電壓值 V_{th} (threshold voltage)，把臨界電壓值 V_{th} 代入描述液晶在外加平面電場下的運動行為公式，便可進而求出扭曲彈性係數 K_{22} 的值。所謂的IPS樣品，指的是產生外加電壓的兩個電極(electrodes)皆在同一個水平面上。IPS的水平配向樣品在平面顯示器上的應用範圍也很廣泛，主要是因為水平電場驅動的液晶模式，會使得IPS LCD比傳統的TN型LCD有較大的廣視角。

第二章 實驗原理

2-1 共平面電極結構(In-plane switching)

2-1-1 IPS 液晶樣品外加電場的行為模式

液晶的形變有三種，分別為斜展(splay)、扭曲(twist)、彎曲(bend)，根據液晶的彈性體理論，三種形變的自由能密度各有其相對應的數學型式分別為 $\frac{1}{2}K_{11}(\nabla \cdot \vec{n})^2$ 、 $\frac{1}{2}K_{22}(\vec{n} \cdot \nabla \times \vec{n})^2$ 、 $\frac{1}{2}K_{33}(\vec{n} \times \nabla \times \vec{n})^2$ ，其中 K_{11} 為斜展彈性係數， K_{22} 為扭曲彈性係數， K_{33} 為彎曲彈性係數，其形變描述的示意圖如圖 2-1 所示。對長形的棒狀液晶分子而言，在相同溫度下， K_{22} 的值通常是三者之中最小的，但是 K_{11} 與 K_{33} 則不一定，視液晶材料而定。



Fredericksz transition 的定義[1]

由於液晶的彈性係數(K_{11} K_{22} K_{33})都很小，液晶分子的排列容易受電場、磁場及應力的影響而改變，為了達到平衡態，液晶分子會趨向於能量密度最低的方向來排列。

根據液晶的彈性體理論和 Fredericksz transition，我們可以推導出液晶在外加電場時的運動行為模式[2]，如圖 2-2 和 2-3 所示。假設一開始液晶是平躺在 x-y 平面上，液晶的 director 方向是沿著 x 軸排列，外加電場 E 的方向是指向紙面的 y 方向，由於液晶樣品的上下玻璃表面皆受到磨刷配向的影響，使得液晶本身會水平的躺在玻璃表面

上，因此當我們給液晶樣品一個共平面的外加電場時，若電極間的距離遠大於液晶盒本身的厚度，使得液晶層內的液晶會受到水平的橫向電場作用，在液晶層內液晶的 director 指向，會有 Azimuthal angle θ 的產生，而 Azimuthal angle θ 的大小會隨著 z 軸而變化。數學推導公式如下所示：

$$\begin{aligned} n_x &= \cos\theta(z) \\ n_y &= \sin\theta(z) \end{aligned} \quad (2-1-1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{n} = 0$$

$$\vec{n} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{n}) = [\cos\theta(z)\hat{i} + \sin\theta(z)\hat{j}] \cdot [-\cos\theta(z)\frac{\partial\theta}{\partial z}\hat{i} - \sin\theta(z)\frac{\partial\theta}{\partial z}\hat{j}] = -\frac{\partial\theta}{\partial z} \quad (2-1-2)$$

$$\vec{n} \times (\nabla \times \vec{n}) = 0$$

所以共平面電極結構下，只有扭曲(twist)的形變能存在

$$\text{根據電磁學理論，單位體積的靜電能密度表示為 } U_e = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} \quad (2-1-3)$$

$$\text{總能量可表示為 } U = U_e + U_d = \frac{1}{2} \vec{D} \cdot \vec{E} + \frac{1}{2} K_{22} \left(\frac{\partial\theta}{\partial z} \right)^2 \quad (2-1-4)$$

$$\text{在電場 } E \text{ 的作用下，電位移 } D \text{ 可表示為 } \vec{D} = \epsilon_{\perp} \vec{E} + \Delta\epsilon (\vec{n} \cdot \vec{E}) \vec{n} \quad (2-1-5)$$

$$\text{可知液晶層的總能量為 } U_t = \int_0^d \left(\frac{1}{2} K_{22} \left(\frac{\partial\theta}{\partial z} \right)^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta\epsilon E^2 \sin^2 \theta \right) dz \quad (2-1-6)$$

$$\text{可由 Euler-Lagrange equation } J = \int_{x_1}^{x_2} f\left(y, \frac{dy}{dx}, x\right) dx \quad (2-1-7)$$

$$\text{當 } J \text{ 為平衡態的最小值時，必滿足右式 } \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial f}{\partial y_x} \right) \quad (2-1-8)$$

由 Euler-Lagrange equation 可得到
$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{d}{dz} \left[\frac{\partial U}{\partial \left[\frac{d\theta}{dz} \right]} \right] \quad (2-1-9)$$

代入(2-1-6)式 可得
$$K_{22} \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \sin \theta \cos \theta = 0 \quad (2-1-10)$$

若角度的變化很小時，可把上式簡化為
$$K_{22} \frac{d^2 \theta}{dz^2} + \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E^2 \theta = 0 \quad (2-1-11)$$

加上邊界條件為
$$\theta(0) = \theta(d) = 0 \quad (2-1-12)$$

可以解出(2-1-11)式的微分方程

欲使 θ 有解，需滿足
$$\left(\frac{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon}{K_{22}} \right)^{1/2} E d = m \pi \quad (2-1-13)$$

$m=0$ 指沒有加電場的情形， $m=1$ 指剛要產生形變的情況，即

臨界情況，可知

臨界電場為
$$E_{th} = \frac{\pi}{d} \sqrt{\frac{K_{22}}{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon}} \quad (2-1-14)$$

臨界電壓為
$$V_{th} = E_{th} \cdot l = \frac{\pi l}{d} \sqrt{\frac{K_{22}}{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon}} \quad (2-1-15)$$

此為水平配向的 IPS 液晶樣品，在外加共平面電場下臨界電壓值(threshold voltage)的公式推導，其中 l 為電極間距， d 為樣品厚度， $\Delta \varepsilon$ 為介電常數的異方性(dielectric anisotropy)。

2-1-2 IPS 的光電特性[3]

IPS 液晶盒的基本觀念可參考圖 2-4 所示，上下玻璃基板的配向方向差 180 度，使液晶分子做水平方向排列，因為電極只有作在下板。當外加電場時，由於本實驗中，所使用的電極間距 l (約 2~3mm) 遠大於液晶樣品的厚度 d (約 30~40 μm)，因此液晶樣品內的每一層液晶，皆會受到相同大小的水平電場作用，而在上下玻璃基板表面由於磨刷配向的關係，會受到表面定向強度的作用，使得最上下層的液晶不會有扭轉的現象發生，而中間層的液晶，受到表面磨刷配向影響的強度最弱，會有最大的扭曲角度 θ (Azimuthal angle)。當電壓加到臨界電壓時，液晶會有小角度的 θ 開始扭曲，而當電壓越加越大時， θ 也會越來越大，直到 θ 等於 90 度為止，如圖 2-5 所示為 Keda 等人所模擬之角度分布圖[6]。



2-2 空樣品厚度(cell gap)量測原理[4]

我們在製作液晶樣品時，常使用一些已知大小厚度的間隙物 (Mylar)，不過因為製作的過程，往往會使得真正的樣品厚度與間隙物有所誤差，因此必須量測實際的樣品厚度。而在許多的液晶樣品參數測量之中，如表面定向強度(anchoring strength)、液晶外加電壓的臨界電壓值(threshold voltage)，樣品的厚度也是不可缺少的重要物理參數。

測量原理

如圖 2-6 所示，我們利用 He-Ne 雷射垂直入射空樣品玻璃表面，並利用旋轉平台旋轉空樣品，當雷射光由入射角 θ 進入樣品時，使得通過液晶樣品的兩次反射穿透光與直接穿透光互相干涉，當光程差為入射光波長的整數倍時，會產生建設性干涉，此時光強度會有一極大值，其中量測裝置如圖 2-7 所示。

公式推導

$$\left| \frac{2d}{\cos \theta} - 2d \tan \theta \sin \theta \right| = m\lambda$$
$$\text{光程差} \Rightarrow \frac{2d}{\cos \theta} (1 - \sin^2 \theta) = m\lambda$$
$$\Rightarrow 2d \cos \theta = m\lambda$$
$$\theta = \theta_1 \rightarrow 2d \cos \theta_1 = m_1 \lambda$$
$$\theta = \theta_2 \rightarrow 2d \cos \theta_2 = m_2 \lambda$$
$$\Rightarrow 2d (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = \Delta m \lambda$$
$$\Delta m = m_1 - m_2$$
$$\Rightarrow d = \frac{\Delta m \lambda}{2(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)} \quad (2-2-1)$$

我們旋轉液晶樣品，改變入射角 θ ，找出兩波峰之間所對應的角

度 θ_1 與 θ_2 ，並帶入兩波峰之間的數值 Δm ，帶入(2-2-1)式即可求出樣品的厚度 d 值，所得的量測圖形如圖 2-8 所示。

2-3 預傾角的量測原理

液晶分子的光軸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元件的表現。具有小預傾角的液晶元件（如：twisted nematic displays）會有光散射的效應，具有大預傾角的液晶元件具有干涉的色彩和較小的元件電容值，因此預傾角的量測是非常重要的。

預傾角的量測方法有多種，包括最大相位延遲法（crystal rotation method）、電容法（capacitive method）、磁場法（magnetic null method）。本實驗中使用最大相位延遲法（crystal rotation method）[5]，量測裝置系統與圖 2-7 相同，將空樣品灌入向列型液晶，樣品之 Rubbing 方向沿著 y 軸，旋轉液晶元件，改變入射角度 φ ，利用最大相位延遲時之入射角與穿透率曲線的關係，再經過計算即可以得到預傾角 α ，液晶元件中預傾角與玻璃基板的關係如圖 2-9。

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元件中時，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 $n_e(\theta)$ ， θ 為e-ray行進方向與液晶分子光軸所夾的角。

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 為單層液晶的考慮預傾角的光程差路

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 ，則由此兩向量的內積可得

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

又在折射邊界，入射光與則射光需滿足 Snell's Law，則可得：

$$\cos\varphi = n_e \sin\varphi_e = n_o \sin\varphi_o \quad (2-3-3)$$

由於考慮預傾角的存在，因此對於 o-ray 和 e-ray 所看到的折射率為：

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

由圖 2-10，o-ray 由 A→B 的光程為：

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

e-ray 由 A→B 的光程為：

$$OPL_{e\text{-ray}} = n_e(\theta) \frac{dz}{\cos\varphi_e} + (\tan\varphi_o - \tan\varphi_e) dz \sin\varphi \quad (2-3-6)$$

由 (2-3-5)、(2-3-6) 可知 o-ray 與 e-ray 的光程差為：

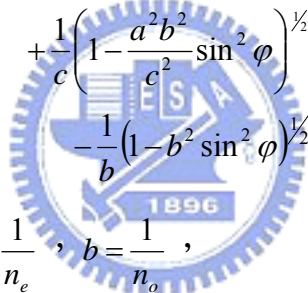
$$\begin{aligned}
& OPL_{o\text{-ray}} - OPL_{e\text{-ray}} \\
& = dz \left[\frac{n_e(\theta)}{\cos \varphi_e} + (\tan \varphi_o - \tan \varphi_e) \sin \varphi - \frac{n_o}{\cos \varphi_o} \right] \quad (2-3-7)
\end{aligned}$$

由 (2-3-2)、(2-3-3)、(2-3-4) 將 $n_e(\theta)$ 以 n_e 、 n_o 、 α 、 φ 代換，則此兩道光的相位差 $\Gamma(\varphi)$ 為：

$$\begin{aligned}
\Gamma(\varphi) &= \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d f dz \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d OPD_{o\text{-ray}} - OPD_{e\text{-ray}} \\
&= \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot f(\alpha, \varphi) \quad (2-3-8)
\end{aligned}$$

其中

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



$$a = \frac{1}{n_e}, \quad b = \frac{1}{n_o},$$

$$c^2 = a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha$$

由穿透光強度的關係式可得到 (2-3-10)

$$I = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\Gamma}{2} \sin^2 (2\Psi) \quad (2-3-10)$$

為量測穿透光強度之變化，將液晶元件置於 Crossed polarizer 下，並使第一片偏振片之偏振方向與第一層液晶分子夾 45° ，則穿透光強度可改寫為：

$$I(\varphi) = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\Gamma(\varphi)}{2} \quad (2-3-11)$$

將所量測到的穿透光強度 $I(\varphi)$ 對 φ 作圖，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：

且當 $\varphi = \varphi_x$ 時：

$$\begin{aligned} & \frac{1}{c^2}(a^2 - b^2)\sin\alpha \cos\alpha \cos\varphi_x \\ & - \frac{a^2b^2}{c^3}\cos\varphi_x \sin\varphi_x \left(1 - \frac{a^2b^2}{c^2}\sin^2\varphi_x\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2-3-12) \\ & + b\cos\varphi_x \sin\varphi_x (1 - b^2\sin^2\varphi_x)^{-\frac{1}{2}} = 0 \end{aligned}$$

將對稱點 φ_x 代入 (2-3-12)，因 n_e 、 n_o 均為已知，解此方程式即可得到預傾角 α 。

我們可由預傾角量測原理和方法，求出液晶樣品的預傾角角度，來確定我們的樣品條件是屬於水平配向，如圖 2-11 所示為所量得的是一個預傾角為 0.77° 的液晶樣品，在入射光角度為正負五十度間所量測到的曲線變化。



2-4 鍍金原理[7]

本實驗中 IPS 液晶樣品的共平面電極，是利用由日本 Eiko 公司所生產的離子覆膜機(Ion Coater，型號：IB-2)來鍍上去的，如圖 2-12 所示，其工作原理乃是利用外加在上下兩片電極的直流高電壓，把位在上層電極金箔中的金屬原子濺鍍出來，並被兩端的電位差加速，達到轟擊靶材與鍍膜的功能。

我們使用離子覆膜機的 COAT 功能，將洗好的玻璃放在覆膜機的正極上，把不需要鍍上金屬薄膜的部分，用膠帶貼起來，一開始先把玻璃放在離子覆膜機的真空腔中，抽氣 15 分鐘以上使其真空腔的真空穩定後，開始鍍膜。真空的穩定度可以按下 Flash 鍵，觀察其離子電流量是否穩定。



剛開始抽氣時，空氣密度太大不易形成電漿態，當抽到適當的真空度時，會產生電漿態，此時離子數目會隨著真空度提升而增加，但當真空繼續提升，產生離子的空氣密度會越來越少，以致於產生的離子數反而也變少，故在定電壓的情形下離子電流量反映了離子數目，也反映了真空度。當真空度達到我們所需要的程度時，便可開始鍍膜，我們設定鍍膜的時間約為 10 分鐘，在此 10 分鐘的過程中，離子電流需維持在 6~8 mA 之間，不可太大以免破表，而離子電流的大小，可由兩電極間的電壓大小來控制，上下兩片電極的高電壓也不能太

小，才有足夠的能量游離出離子束，使離子束去轟擊出金屬原子，把金屬原子鍍在玻璃表面上。鍍好金屬薄膜的 IPS 液晶樣品如圖 2-13 所示。



第三章 實驗方法與樣品製作介紹

3-1 介電常數量測法

3-1-1 量測原理

在本實驗中，液晶本身的介電異向性 $\Delta\varepsilon$ (dielectric anisotropy) 是不可缺少的參數之一，因此我們必須分別量出 $\varepsilon_{//}$ 和 ε_{\perp} 的值，來求出 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp}$ 的值。由於液晶分子組成的化學結構不同， $\Delta\varepsilon$ 可以是正值或負值，分別表示正型液晶與負型液晶，本實驗中所量測的兩種液晶 5CB 和 E7 皆為正型液晶。

如圖 3-1 所示，當我們利用 LCR meter 量測電容時，LCR meter 加給液晶樣品一個小的交流電壓，使得鍍有 ITO 電極的上下兩片玻璃板產生感應的正負電荷，使得此時的液晶樣品，如同一個平行板電容器，我們將分別量測出灌液晶前與灌液晶後的電容值，如 3-1-1 式所示，再利用電容值算出樣品的介電常數(dielectric constant)，如下所示：

$$C = \frac{\varepsilon \times A}{d}$$
$$\frac{C_{lc}}{C_0} = \frac{\varepsilon_{lc}}{\varepsilon_0} \quad (3-1-1)$$

其中 C_{lc} 為灌液晶後樣品的電容值， C_0 為空樣品的電容值， d 為樣品

的厚度， ϵ_0 為空氣的介電常數，一般在空氣中其值為 1。

圖 3-1 所示的液晶樣品，要測定 $\epsilon_{//}$ 時，要使用垂直配向的樣品 (Homeotropic); 要測定 ϵ_{\perp} 時，則使用水平配向的樣品 (Homeogeneous)，而且測定時之外加電壓，不可使液晶分子的配向發生變化，須注意到我們用來量測電容的 LCR meter (CHY-41R) 在量測時所外加的電壓，必需低於水平配向樣品的臨界電壓值，由儀器的使用手冊知，外加 1KHz 頻率的量測下，LCR meter 的輸入方均根電壓 V_{rms} 為 0.5 伏特，而我們也可量測出 5CB 水平配向的臨界方均根電壓 V_{rms} 為 1.02 伏特，如圖 3-2 所示，因此可確認在量測過程中，液晶分子的光軸指向不會受到量測的影響而有變化。



3-1-2 液晶樣品製作

本實驗在量測過程中，需要同時用到水平配向液晶樣品、垂直配向液晶樣品，以下為不同配向方式的液晶樣品製作介紹。

A. 清洗玻璃

1. 本實驗中我們使用表面鍍有 ITO(透明導電薄膜)的鈉玻璃，將所使用的玻璃切割為 3.5cm×2.5cm。
2. 將玻璃放入染色壺內，倒入少許清潔液和去離子水(DI water)超過玻璃，放入超音波震盪器中清洗 3 分鐘後，用去離子水清洗乾淨，並用氮氣槍吹乾，放入另一個乾燥的染色壺內。
3. 加入 TCA(三氯乙烷)，放入超音波震盪器內清洗 5 分鐘，TCA 用於去除油脂，且 TCA 不溶於水，用後需回收到 TCA 廢液瓶內，

不可直接到入水中造成污染。

4. 加入 ACE(丙酮)，放入超音波震盪器內清洗 5 分鐘，ACE 用於去除 TCA，用後需回收到廢液瓶內，不可直接到入水中造成污染。
5. 加入去離子水(DI water)，放入超音波震盪器內清洗 5 分鐘，主要用於清洗 ACE，並使用氮氣槍吹乾，放入烤箱內烤乾，等待冷卻備用。

B. 王水蝕刻

1. 在本實驗中，我們的玻璃是整片都鍍有 ITO 透明導電薄膜，但是我們為了能夠準確的量出電容值，需利用網板印刷的方式，來得到我們要的圖案(pattern)，再利用王水蝕刻掉不需要的部分。
2. 網板印刷的步驟如下：
 - (1) 先完成具有圖案的 gauze printing mask。
 - (2) 將 gauze printing mask 置於整片鍍有 ITO 的玻璃之上，把具有抗酸性的油墨塗佈在網板 pattern 上，油墨會透過網板而印刷在 ITO 玻璃上。
 - (3) 等到玻璃上的抗酸性油墨充分乾燥以後，把玻璃放到王水中進行蝕刻。
3. 進行蝕刻前，需穿著實驗衣、護目鏡、濾毒罐及鐵弗龍材質的手套以保護人身安全。
4. 配製王水：硝酸與鹽酸以 1：3 的比例混合調配而成，等待約 15 分鐘的時間讓硝酸與鹽酸充分反應，當王水的色澤為深橘紅色時即可開始進行蝕刻(etching)的動作。
5. 在正式進行蝕刻動作前，必須先測試蝕刻所需要的時間，可以拿幾片切剩的玻璃基板來進行試驗，視當天的溫度與溼度來決定蝕刻的時間長短。

6. 蝕刻的時間長短決定好之後即可進行蝕刻的動作。
7. 蝕刻結束後，將裝有王水的容器放置水槽中，打開水龍頭將容器注滿，被水稀釋的王水會變成透明無色，此時取少許的氫氧化鈉 (NaOH) 丟入容器中與王水進行中和反應，待中和反應完成後即可倒入水槽中處理掉。

(以上步驟所製作 pattern 的 ITO 玻璃由交大電子物理所許家榮學長完成) [11]

C. 配向膜的塗佈

1. 本實驗中所使用的 Polyimide 為 NISSAN 130B 的配向劑，一般的 PI 需保存在低溫的環境，但在使用前必須先回溫至室溫才能使用。
2. 將玻璃放於旋轉塗佈機 (spin coater) 上，分兩階段不同轉速塗佈，第一步為每分鐘 2000 轉 15 秒，第二步為每分鐘 4000 轉 25 秒，塗佈於清洗後的玻璃表面上。注意整個塗佈過程中濕氣不可過高。並放入加熱平台上軟烤，若直接加熱至高溫 170°C 可能會破壞 PI 結構。
3. 放入高溫烤箱中，以 170°C 的溫度烘烤 1 個小時。
4. 硬烤完成後，將玻璃拿出烤箱中，放入培養皿內冷卻備用。

D. 磨刷配向

1. 冷卻後，將玻璃拿到 Rubbing 機台上，Rubbing 機台為在滾筒上包上一層絨布，利用接觸式的摩擦，進而達到磨刷配向的效果。Rubbing 完後的玻璃於右上角作記號，作為 Rubbing 配向的方向標示。

E. 垂直配向樣品製作

1. 本實驗中，C 與 D 的步驟為製作一般的水平配向液晶樣品，製作

垂直配向液晶樣品，需使用 DMOAP 溶液。

2. DMOAP 溶液為具有約 50% 的甲醇與其他有機化學分子化合物，它的分子式為 $C_{26}H_{58}ClNO_3Si$ 。
3. 一般的 DMOAP 溶液需保存在低溫的環境，但在使用前必須先回溫至室溫才能使用，把 DMOAP 與 DI water 以 1:99 的體積比例混合，與洗淨的玻璃一同放入染色壺中，放到超音波震盪器中震盪 15 分鐘。
4. 震盪完後，再以 DI water 清洗乾淨，並以氮氣槍吹乾，放入 $100^{\circ}C$ 的烤箱之中烘烤 1 小時。

製作完成的液晶樣品如圖 3-3 所示，我們之所以會在特定區域面積蝕刻出我們所要的電極面積，主要是因為玻璃四周在夾成液晶樣品時會封 AB 膠，所以在四周不可有電極區域



3-2 電極間距的量測

本實驗中，我們需準確的量測出 IPS 液晶樣品的電極間距，主要的方法是將 IPS 樣品放置於偏光顯微鏡下，利用 5 倍數的放大物鏡觀察，並利用 CCD 及影像擷取卡紀錄下影像，並利用小畫家軟體，計算電極間距之間有多少個像素(pixels)，再利用比例尺換算(1 個 pixel=2.97 μ m)，便可知道實際電極間距的寬度是多少。由於我們實驗中所製作的 IPS 液晶樣品間距約為 2~3mm，在 5 倍數的放大倍率下，所見的視野無法完全涵蓋成為一張圖片，因此我們在計算電極間距時，需把電極間距分為 3 個部分，再把 3 個部分的寬度加起來，便可得知實際的電極寬度。如圖 3-4 所示，兩個電極間的距離總共有 954 個像素，但是電極的邊緣部份會有 6 個像素的誤差，利用比例尺換算，實際的電極間距應為 2840 \pm 10 μ m。

3-3 扭曲彈性係數(K_{22})量測系統介紹

3-3-1 量測系統介紹

扭曲彈性係數(K_{22} twist elastic constant)，是本實驗主要的量測參數，在本實驗中，主要是量出IPS水平配向液晶樣品在外加共平面電極下的臨界電壓值(threshold voltage)，再利用我們所量得的介電常數、樣品厚度和電極間距，代入(2-1-15)式，求出我們所要知道的 K_{22} 值[6]。

在量測的過程中，由於一般的訊號產生器(function generator)所能產生的電壓訊號大小有限，最大只能產生到 10 伏特(V_{pp})左右，而 10 伏特尚不足夠達到臨界電壓值，使液晶產生扭曲的形變效應，因此我們實驗過程中，需外加一台交流電壓放大器(AC Voltage Amplifier)，使得訊號產生器所產生頻率為 1K Hertz的交流電壓，經過交流電壓放大器後，放大其倍率，再把放大後的電壓外加到液晶樣品上。我們可以微調放大器上的旋鈕，選擇出適合我們實驗的放大倍率，並確保在實驗的過程中，我們所得到的輸出電壓值，並不會因為經過電壓放大器的放大後，而有失真的現象。如圖 3-5 所示，在不同的放大倍率下，不同的輸入電壓值和不同的輸出電壓值，仍維持線性放大的效應。

實驗裝置如圖 3-6 所示，IPS 液晶樣品放置於兩片互相垂直的偏振片(cross polarizer)之中，而樣品的液晶長軸固定在與偏振片夾 45°

角的方向上，然後改變液晶樣品的外加電壓來觀察樣品穿透光強度的變化。在實驗過程中，我們使用兩台萬用電表(Multimeter)，其中 Multimeter A 用來紀錄不同外加電壓下穿透光強度的變化，Multimeter B 用來分接經過電壓放大器後的電壓，紀錄其當時的電壓值。所有的量測過程都由 Labview 所撰寫的程式透過電腦 GPIB 介面去控制每一台儀器。

3-3-2 溫控裝置介紹

在進行每一次的量測之前，液晶樣品必須先放入我們所設計好的 oven 裝置，如圖 3-7 所示，等待時間約 30 分鐘左右，待樣品內部溫度達到穩定後才開始進行量測，如圖 3-8 所示。我們所設計的 oven 裝置，溫度可穩定至小數點後第二位。在進行介電常數和 K_{22} 的溫控時，皆使用相同的 oven 裝置來量測，而溫度控制器(Temp Controller)則是用來控制 oven 裝置內的加熱棒(Heater)，來達到我們想要的溫度。

3-3-3 臨界電壓值的判定


圖 3-9 為 IPS 液晶樣品的穿透光強度對樣品外加電壓的變化曲線，接著我們利用雙插法來求得樣品開始產生扭曲變化的臨界電壓值，我們選取固定範圍的區域來作線性擬合，其中擬合線 A 是擬合 0~40 伏特間的數值，擬合線 B 是擬合 65~90 伏特間的數值，之後找出這兩條擬合直線的交點即為我們所要求的臨界電壓值。

第四章 實驗條件的測試

4-1 偏移角(offset angle)

實驗所使用的液晶 5CB 和 E7 都是屬於向列型液晶分子，向列型液晶為棒狀分子，液晶的長軸方向即為光軸指向，以 \hat{n} 來表示。對於棒狀分子而言，是沒有頭尾之分的，因此當我們在設計 IPS 樣品時，讓我們的rubbing方向與電極方向有個角度為 θ_0 的偏移角(offset angle $\theta_0=2^\circ$)，如圖 4-1 所示，使得樣品內的所有液晶分子在受到電場作用時，都能往相同的方向旋轉。

4-2 升壓與降壓圖形的重合



我們在量測 K_{22} 時，所量得的圖形為隨著電壓加大，穿透光強度的變化情形，現在我們量測當電壓加到某一定值時，開始降低電壓，並偵測穿透光強度值，看看液晶在升壓與降壓時，是否會有不同的光強度變化曲線，實驗結果如圖 4-2 所示，升壓與降壓的圖形幾乎重合，液晶並不會因為升壓或降壓而有不同的臨界電壓值。也可知道隨著外加電場逐漸的消失，液晶分子的光軸指向，會慢慢恢復至原本的狀態。

4-3 三種不同量測方法的測試

我們在量測過程中，為了能更精確的判斷出液晶在開始扭曲形變時的臨界電壓值，是否會有很明顯的變化，嘗試了三種不同的量測

方式，除了正向入射外，第二種方法為使用斜向入射的方法，找出液晶樣品在斜向角度下，穿透光強度最暗態的角度，量測此液晶樣品最暗態角度下的光穿透強度變化值。第三種方法為找出液晶樣品在斜向角度下，偵測不同角度下的光穿透強度，找出穿透光強度在斜向角度中斜率變化的最大值，如圖 4-3 所示，最暗態角度為 40 度，斜率變化最大值為 30 度。不過所得的量測圖形，如圖 4-4 所示，並沒有什麼太大的差異性，因此我們往後的實驗仍採用正向入射的量測方式。

4-4 相同厚度不同電極間距的樣品量測[8]

我們根據第三章所討論的實驗方法，製作出共平面電極的 IPS 液晶樣品，並且在同一樣品上，製作出兩條不同寬度的電極間距，如圖 4-5 所示，I 區(5358 μm)和 II 區(2475 μm)兩者寬度不同，又因為是同一個樣品，所以理論上樣品厚度差異不會太大。我們也實際量測了這兩區域的樣品厚度，分別為 I 區(32.77 μm)和 II 區(32.18 μm)，由於非常相近，可把樣品厚度 d 視為相同，根據(2-1-15)式可知，I 區將會有比較大的臨界電壓值，而實驗結果如圖 4-6 所示，也符合我們所預期的結果。從實驗所得的結果，去反推出 I 區和 II 區的橫向水平電場和 K_{22} 值，如表 4-1 所示，可知不同的電極寬度具有相同的水平電場，和相同的 K_{22} 值，因此可證實電極寬度的大小，並不會影響實驗量測的準確值。

由於電極寬度越大，所需達到的臨界電壓值也要越大，而我們的交流電壓放大器最大只能產生 250 伏特的電壓，因此電極太寬對我們的實驗也不好，因此需尋求出一個最適當的電極寬度。現在我們製作出一個電極寬度約為 $670\pm 10\mu\text{m}$ 的 IPS 液晶樣品(如圖 4-7 所示)，因為雷射光的光束大小(*beam size*)比我們的電極間距寬，因此會有部分的雷射光束打到電極表面上，而在電極表面上的液晶並非受到水平的橫向電場，因此我們所量出來的圖形如圖 4-8(a)所示，會是一個看不出臨界電壓值變化的圖形。

為了解決這個問題，我們把被雷射光打到的電極部分用不透光的黑色膠帶貼起來，使得雷射光只能通過兩電極之間，所得到之穿透光強度，如圖 4-8(b)所示，仍然看不出臨界電壓之存在，此與理論的臨界電壓約為 20 伏特明顯不合，推測其原因，可能是所產生的電場，並非「完全」的水平電場所致！電極間的距離和樣品厚度的比值不夠大，使得液晶並非完全受到水平電場的影響，由以上的實驗可知，電極間的距離也不能太小，否則不能產生完全的水平電場，因此在本實驗中，電極間的距離最佳的條件為 2~3mm。

4-5 溫度穩定等待時間的測試

在我們的實驗中，必須對液晶樣品作溫度控制，但是當我們欲加熱到某一個溫度時，要知道需等待多久的時間，液晶樣品內的液晶才

會達到熱平衡，才開始給液晶樣品外加電壓，量測臨界電壓值，如圖 4-9 所示，分別測試 0.5 小時、2 小時、4 小時下的量測圖形。3 者皆是溫控在同樣溫度下(30°C)，同一個量測點。從圖形中可以發現，三者皆可得到相同的臨界電壓值，溫控等待時間不同，並不會影響實驗量測的準確值。因此我們選擇 0.5 小時來當作以後每個溫度控制下的溫度穩定等待時間。

從圖形 4-9 中，我們也發現了隨著溫控等待時間越久，在未達臨界電壓之前的穿透光強度，會有些微的變化，於是我們對於同一個量測點，做了 3 次連續的量測，如圖 4-10 所示，所得結果與圖 4-9 相同，再次證實了隨著時間越久，穿透光強度有些微變大的趨勢，於是我們作了一個測試，只量雷射光經過 cross polarizer 之後雷射光強度隨時間變化的關係圖，如圖 4-11 所示，從圖形中可看出雷射在剛開機的前 30 分鐘是不穩定的，30 分鐘以後趨於穩定，穿透光強度不隨著時間而有所變化。現在讓雷射光通過樣品，樣品放置於 cross polarizer 之間，不加給任何電壓，觀察時間和穿透光強度的關係，發現到雷射光強度仍會有隨著時間而變大的趨勢，如圖 4-12 所示，可知這樣的現象並非雷射光不穩定所造成。

第五章 實驗結果與分析

5-1 介電常數量測結果

5-1-1 5CB 介電常數量測結果

我們利用第三章所討論的方法，分別製作 5CB 的水平配向、垂直配向樣品，並利用 LCR meter 量測灌液晶前後的電容值，來分別算出垂直介電常數 ϵ_{\perp} 和水平介電常數 ϵ_{\parallel} 的值，並對其作溫控，量測其液晶態範圍，約 25°C~35°C 左右的數值。量測結果如圖 5-1 所示，量測數據如表 5-1 所示，但是每個液晶樣品的 T_c 皆不相同，水平配向樣品的 T_c 為 34.57°C，垂直配向樣品的 T_c 為 34.09°C，於是我們以相同的數據作出介電常數對 $T_c - T$ 的關係圖，如圖 5-2 所示，介電常數的平均值等於 $\bar{\epsilon} = \frac{1}{3}(\epsilon_{\parallel} + 2\epsilon_{\perp})$ ，從圖形中我們可發現隨著溫度升高，水平介電常數會有下降的趨勢，垂直介電常數會有上升的趨勢，而在越接近清亮點 T_c 時，它的變化會越大，而達到 isotropic 態以後，所量得的介電常數值不會再隨著溫度而有所變化，而且此時所量得的介電常數值與液晶態範圍時所量得的介電常數平均值幾乎相同。

以同樣的方法，我們也量測了由大立高分子公司所生產的 5CB，並將其與 Merck 公司所生產的 5CB 和文獻值相比較，如圖 5-3 所示，文獻中之數據點由附錄圖 A 之擬合法得出，我們可以看出以同樣的方法和溫控裝置，不同製造者出產之液晶具有不同之介電常數。

5-1-2 E7 介電常數量測結果

E7 是液晶態溫度範圍比較大的液晶，約 $20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，我們也量測了此範圍下的介電常數值，如圖 5-4 所示，並以相同的數據作出介電常數對 T_c-T 的關係圖，如圖 5-5 所示。

5-1-3 清亮點量測

我們利用上述方法，由液晶的介電常數值不再隨著溫度的增加而有所變化，來判定出液晶的清亮點 T_c 值。以 5CB 水平配向樣品為例， T_c 為 34.57°C 。將相同樣品置放於 cross polarizer 之間，雷射光穿過樣品到達光偵測器，手動調整溫控裝置的溫度設定，並量得光偵測器的光強度與溫度變化的關係圖，並量測樣品上不同位置的兩個點 A、B，如圖 5-6 所示，發現同一個樣品內的兩不同點，會在不同的溫度下達到 isotropic 態，A 點的 T_c 為 33.78°C ，B 點的 T_c 為 34.16°C 。可知利用上述的介電常數量測法所得到的 $T_c=34.57^{\circ}\text{C}$ 是等到整個樣品內的所有液晶全部達到了 isotropic 態，所以溫度會比量測穿透光強度的 A 點與 B 點的溫度來得高。

5-2 扭曲彈性係數量測結果

5-2-1 5CB 扭曲彈性係數量測結果

利用第三章所討論的方法，製作 5CB 的共平面電極 IPS 樣品，分別量測出樣品厚度、電極間距、介電常數、臨界電壓值，代入(2-1-15)式，求出樣品的扭曲彈性係數 K_{22} 值。並將其作溫控，求出 5CB 液晶態範圍內的數值，作出 K_{22} 值對 $T_c - T$ 的關係圖，量測數據如表 5-4 所示，量測結果如圖 5-7 所示，圖中 K_{22} 值的誤差線(error bar)來自於對臨界電壓值判讀的誤差，我們所得到的臨界電壓值，為取其不同判讀次數的算術平均數。從圖中可發現， K_{22} 值會隨著溫度的升高而有減小的趨勢。我們也以同樣的量測方法，量測了由大立高子公司所生產的 5CB，如圖 5-8 所示。我們將所量出的 K_{22} 數值與文獻值相比較，如圖 5-9 所示，文獻值中之數據點由附錄圖 B 之擬合法得出。

5-2-2 E7 扭曲彈性係數量測結果

我們也量測出 E7 在液晶態溫度範圍 $20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 的 K_{22} 值，量測數據如表 5-6 所示，並作出 K_{22} 值對 $T_c - T$ 的關係圖，如圖 5-10 所示，從圖中可發現，E7 的 K_{22} 值也是會隨著溫度的升高而有減小的趨勢。

第六章 結論與未來展望

液晶的光電效應是指液晶分子的光軸指向，可利用外加電場或磁場的方式加以控制，而使得其排列狀態轉換至其他型態，因此造成液晶的許多光學性質發生變化，本實驗即成功的利用此種方式，來求出液晶的扭曲彈性係數(K_{22})值。我們在第四章也作了許多不同的測試，以求出實驗的最佳化條件。

由於液晶的彈性係數是變化很小的值，所以對於兩個很接近的溫度，不易由外加電壓與穿透光強度的關係圖，看出臨界電壓值的明顯差異，但是對於量測整個液晶態的範圍溫度，我們仍可清楚的發現液晶的扭曲彈性係數(K_{22})值，會隨著溫度的升高而減小，這是與文獻相同且合理的。

附 錄 (一)

擬合扭曲彈性係數的相關參數

A. 介電常數 $\Delta\varepsilon$ 的擬合

由於介電常數的值，在相同的溫度下，會隨著不同的頻率而有不同的值，在我們的實驗中，都是量測頻率為 1KHz 下的介電常數值，我們可利用 Table Curve 軟體，擬合文獻值中[9]，5CB 介電常數隨溫度變化的圖(如附錄圖 A 所示)，而得到一個溫度與介電常數的關係示，如下所示：

$$\varepsilon_{//} = 21.552752 - 0.25470269T + 0.0030711174(T)^{(2.5)} - 0.00043973606(T)^3 - (5.4403659 * 10^{-16} * \text{EXP}(T))$$

$$\varepsilon_{\perp} = 1.747894 + 0.1463658 * T + 3.340661 * 10^{-16} * \text{EXP}(T) + 603.88055 / (T)^2 - 8.8350339 * 10^8 * \text{EXP}(T)$$

將兩者相減即可得到 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp}$

B. 扭曲彈性係數 K_{22} 之擬合

參考文獻值[10]得知 5CB 液晶的扭曲彈性係數 K_{22} 對溫度的關係，我們利用 Table Curve 軟體對 K_{22} 與溫度 T_k 的關係模擬一曲線， T_k 為溫度 T 與 T_c 之差，如附錄圖B所示，擬合曲線公式如下：

$$K_{22} = 0.11656 + 0.04088T_k - 0.00541T_k^2 + 4.48551E-4T_k^3 - 1.44655E-5T_k^4 - 7.96961E-16T_k^5$$

附 錄 (二)

理論模擬

以下為根據我們的實驗裝置和樣品，利用 Mathcad 軟體所作的光學模擬，主要工作由實驗室湯宗達學長完成，模擬結果如附錄圖 C 所示，當我們的外加電壓超過臨界電壓值，穿透光強度會隨著外加電壓而有所變化。

$$n := 200 \quad n_e := 1.7 \quad n_o := 1.5 \quad d := 23 \quad \lambda := 0.6328$$

$$\Delta z := \frac{d}{n} \quad \Delta z = 0.115 \quad \Delta n := n_e - n_o$$

$$R(\theta) := \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad M := \begin{pmatrix} e^{i \cdot 2 \cdot \frac{\pi \cdot \Delta n \cdot \Delta z}{\lambda}} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \left[\left(\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta n \cdot d}{\lambda}\right) \right]^2 = 0.56$$

$$\psi := 0, \frac{\pi}{200} .. \frac{\pi}{2}$$

$$E(\psi) := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot R\left(\frac{-\pi}{4}\right) \cdot \prod_{m=1}^n \left(R\left(-\psi \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{n}\right)\right) \cdot M \cdot R\left(\psi \cdot \sin\left(\frac{m\pi}{n}\right)\right) \right) \cdot R\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$(|E(\psi)|)^2 = \psi =$$

0.5	
0.5	0.01
0.56	0.03
0.56	0.04
0.56	0.06
0.56	0.07
0.56	0.09
0.56	0.1
0.56	0.12
0.56	0.14
0.56	0.15
0.56	0.17
0.56	0.18
0.56	0.20
0.56	0.2
0.56	0.23

$$V_{th}(\psi) := \sqrt{\frac{\left(\left(0.92711412 + 1.8704531 \cdot \psi^2 - 0.27794387 \cdot \psi^4 \right) \right)}{\left(\left(1 + 0.41912258 \cdot \psi^2 - 0.33936728 \cdot \psi^4 \right) \right)}}$$

參 考 文 獻

- [1] P.G.de Gennes, J.Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, second edition, Oxford Science Publications, (1995).
- [2] Peter J. Collings, Michal Hird, *Introduction to Liquid Crystals Chemistry and Physics*, Taylor & Francis Ltd, (1997)
- [3] Masahito Oh-e, Katsumi Kondo, Electro-optical characteristics and switching behavior of the in-plane switching mode, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.67, pp.3895-3897, (2001).
- [4] K H Yang, *J.Appl.Phys*, Vol.64, pp.4780-4782, (1988).
- [5]G.Baur, V. WittwerJ, D. W. Berreman, *Phys. Lett.* Vol.56A, pp.142-144, (1976).
- [6] K. Keda, H. Okada, H. Onnagawa, Twist elastic constants of liquid crystals using in-plane electrode structure, *J. Appl. Phys*, Vol.86, pp.5413-5416, (1999).
- [7]吳信穎, 離子轟擊聚亞醯胺薄膜的液晶配向特性之研究, 國立交通大學電子物理系碩士班畢業論文, (2003).
- [8] Masahito Oh-e, Katsumi Kondo, The in-plane switching of homogeneously aligned nematic liquid crystals, *LIQUID CRYSTALS*, Vol. 22, pp.379-390, (1997).
- [9] B. R. Ratna, R. Shashidhar, *Pramana*, Vol 6, pp278-283, (1976)
- [10] B. Bunning, T.E. Faler and P.L. Sherrell, *J. Physique.* 42, pp.1175-1182, (1981).
- [11]許家榮, 在平行導電玻璃夾層中流體介電質之放電圖形研究, 國立交通大學電子物理系博士班畢業論文, (2000).
- [12] Zili Li, Dielectric method to determine the twist elastic constant in a homogeneous nematic cell, *J. Appl. Phys*, Vol.75, pp.1225-1227,(1994)
- [13] H. Gruler, T. J. Scheffer, G. Meier, *Z. Naturforsch. A*, Vol 27a, pp966, (1972)

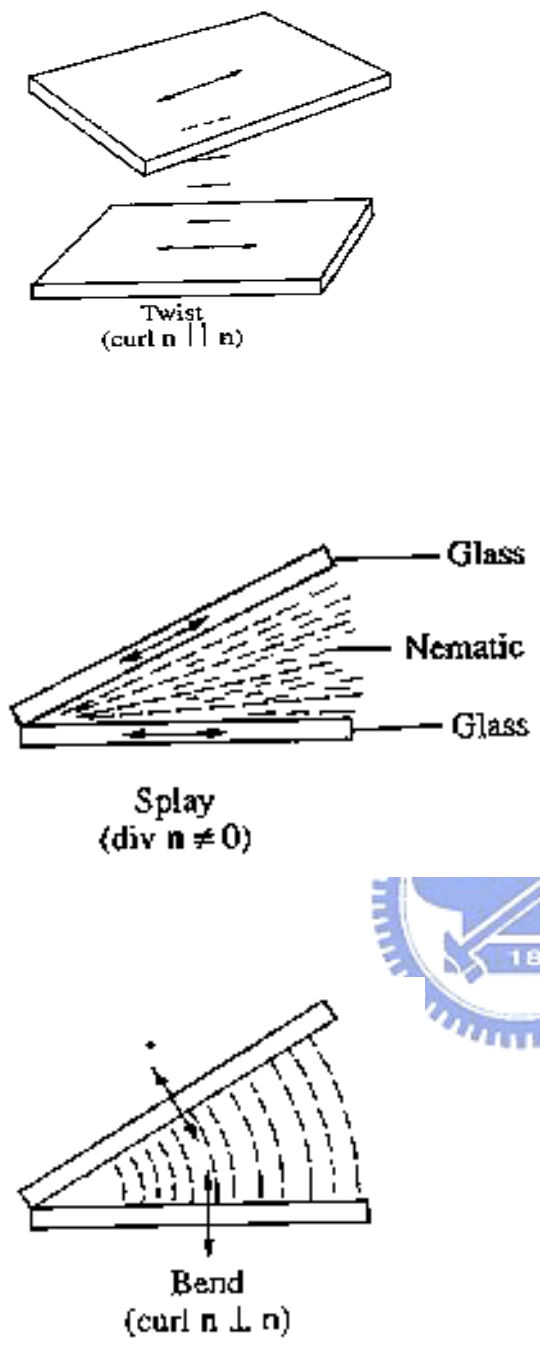


圖 2-1 液晶的三種形變

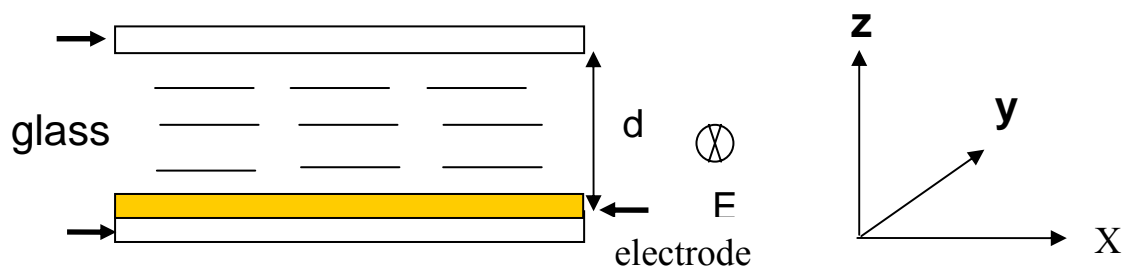


圖 2-2 IPS 樣品 Side view 示意圖

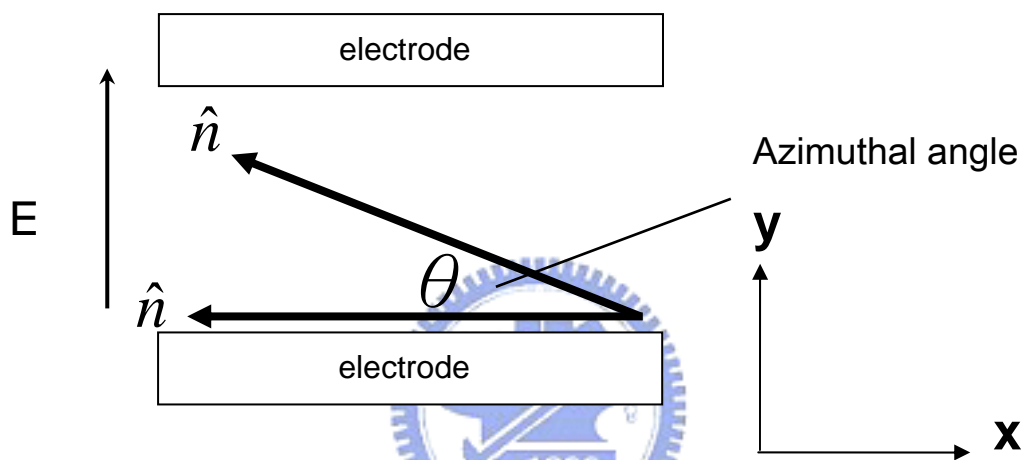
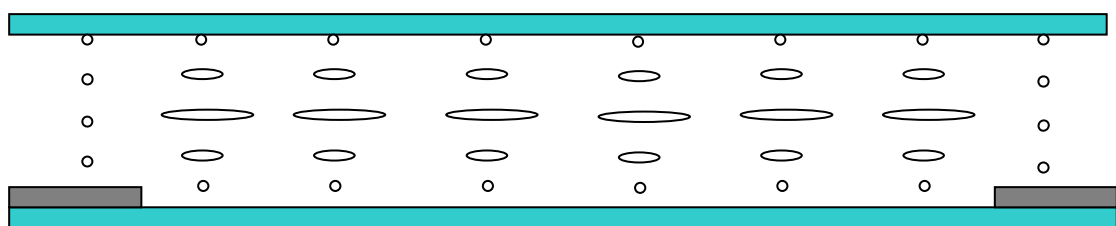


圖 2-3 IPS 樣品 Top view 示意圖

(\hat{n} 為液晶的 director 指向， θ 為液晶受到電場時的 azimuthal angle)



On state

圖 2-4 IPS 樣品在外加電壓時(on state)的示意圖

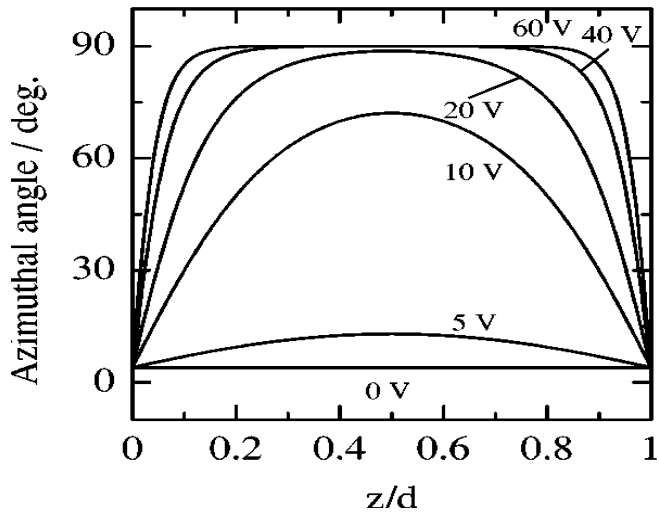


圖 2-5 IPS 樣品在外加電壓時各層之間 Azimuthal angle 的模擬圖形

(此為在偏移角為 4° 之結果)

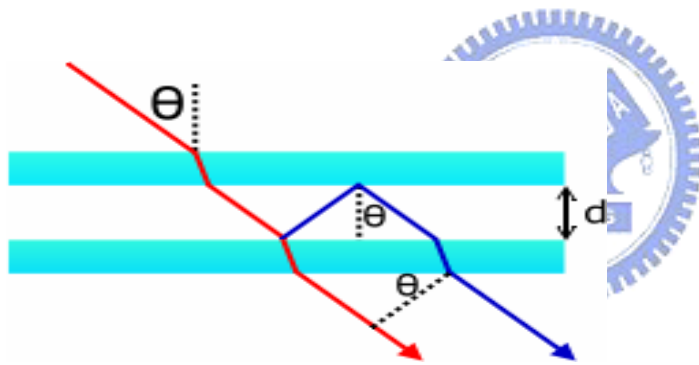


圖 2-6 雷射光入射空樣品光程差示意圖

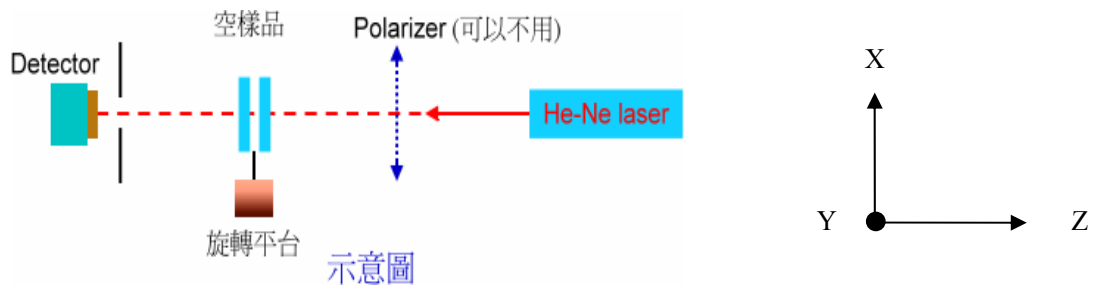


圖 2-7 厚度量測系統示意圖(樣品繞 X 軸旋轉以改變入射角)

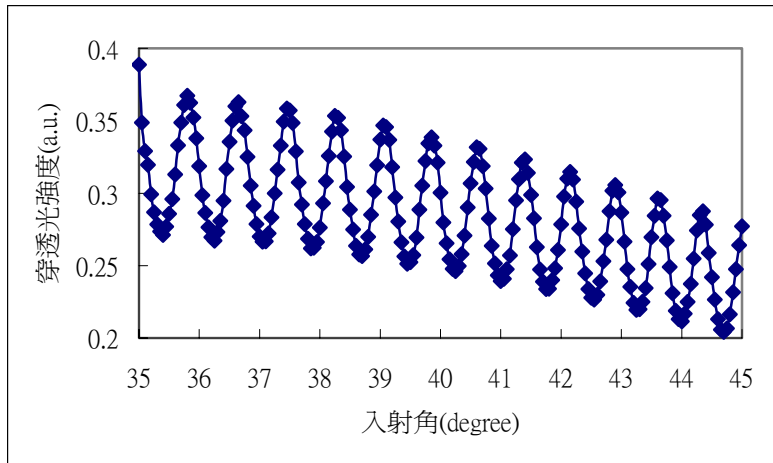


圖 2-8 空樣品之穿透光強度與入射角之關係圖

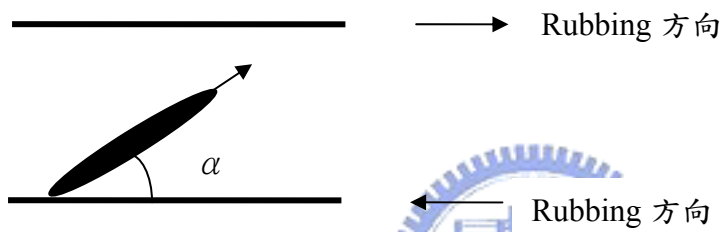


圖 2-9 預傾角與玻璃基板的關係

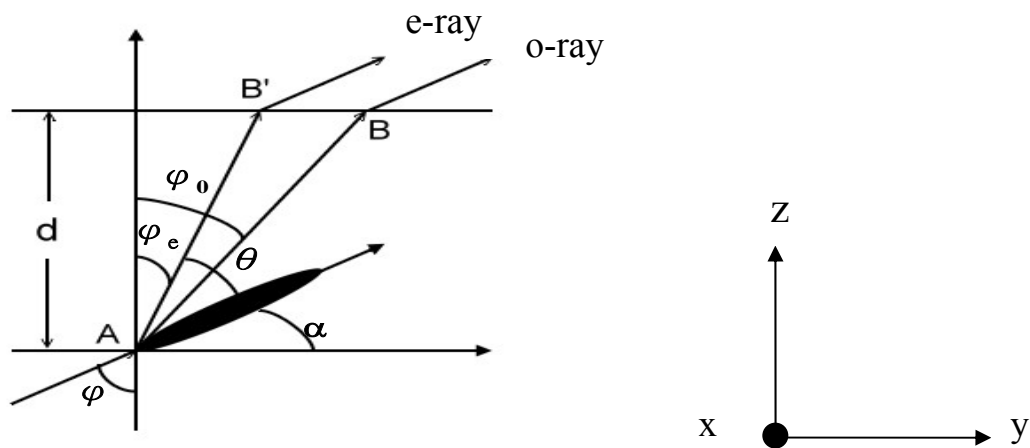


圖 2-10 考慮預傾角的光程差路徑圖

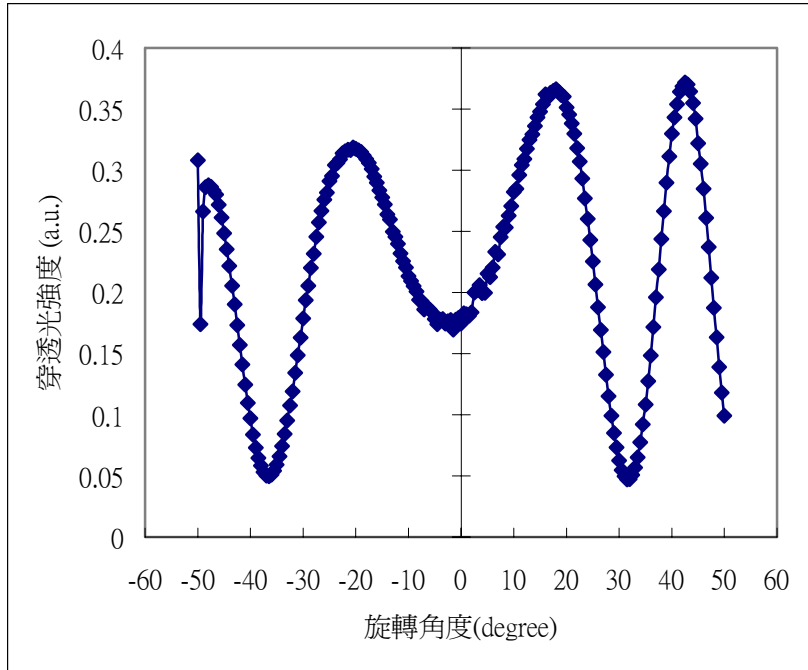


圖 2-11 穿透光強度對樣品旋轉角度的變化關係圖



圖 2-12 用來鍍金的離子覆膜機

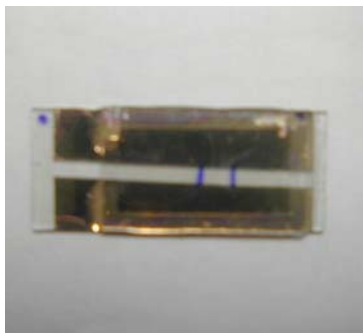


圖 2-13 IPS 液晶樣品

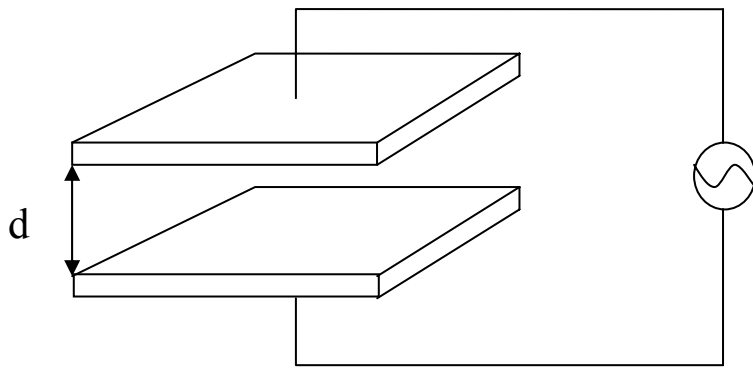


圖3-1 液晶平行板電容器示意圖

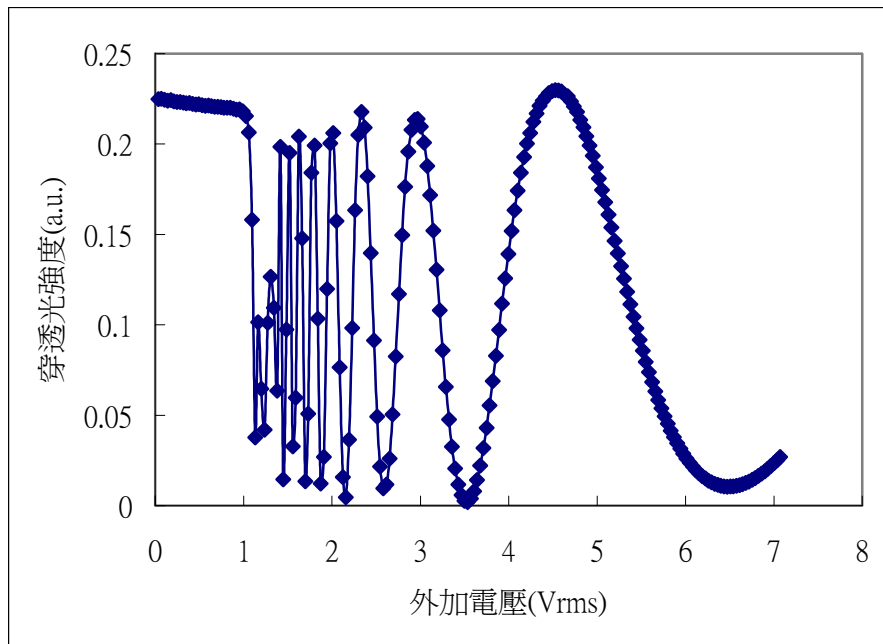


圖3-2 5CB 水平配向液晶樣品的穿透光強度與外加電壓關係圖

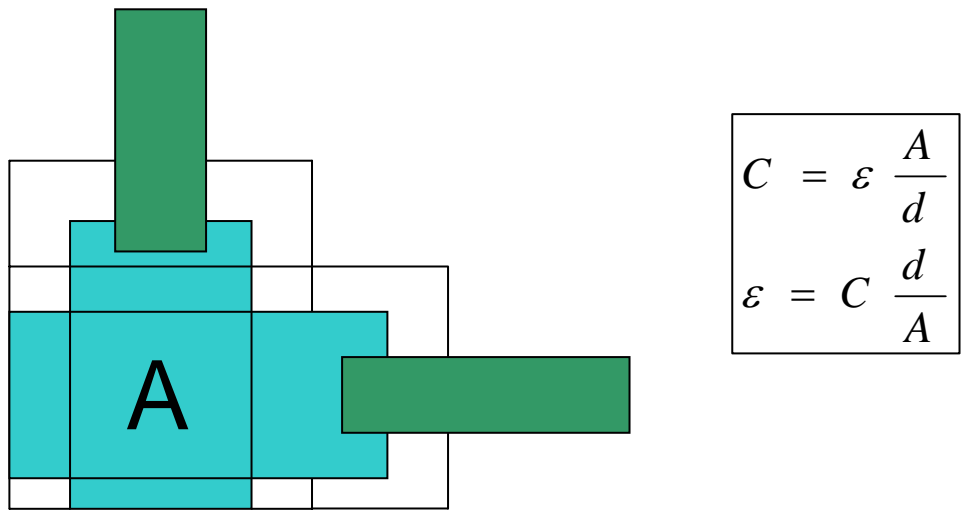


圖3-3 製作完成的水平、垂直配向液晶樣品

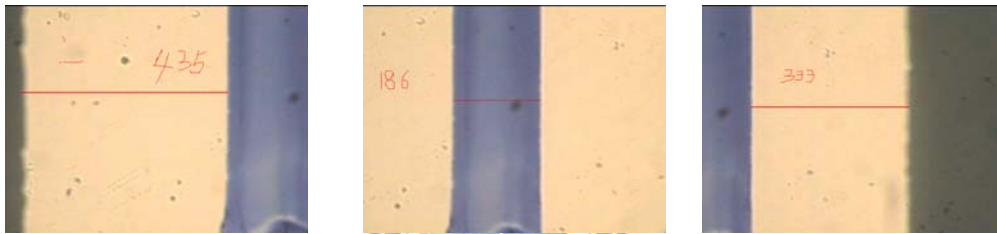


圖3-4 IPS樣品電極間距在偏光顯微鏡下的照片

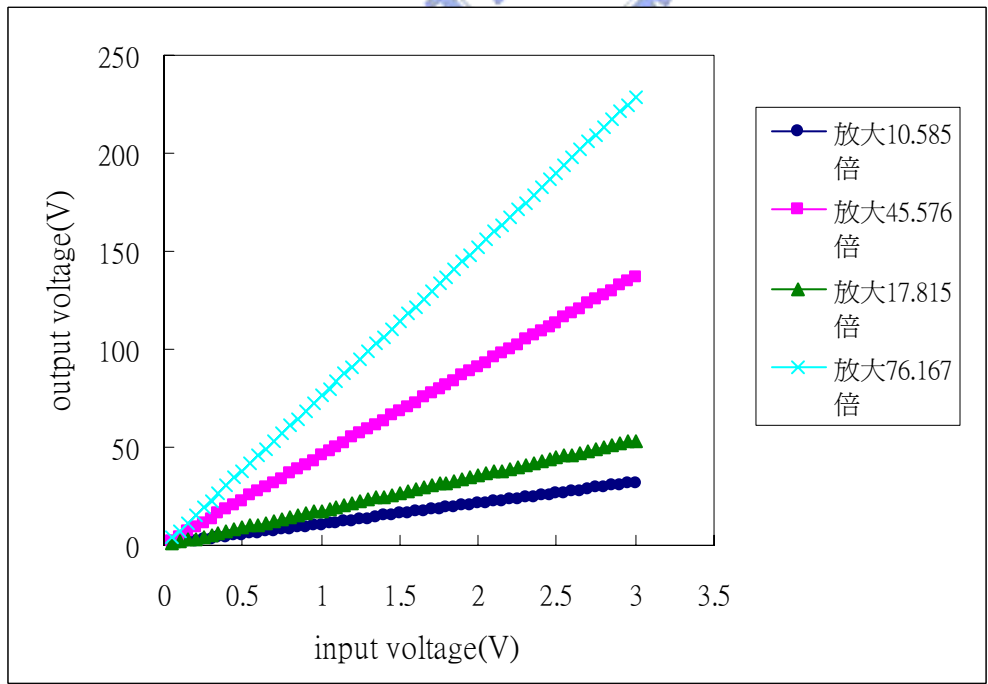


圖3-5 交流電壓放大器的輸入與輸出電壓值

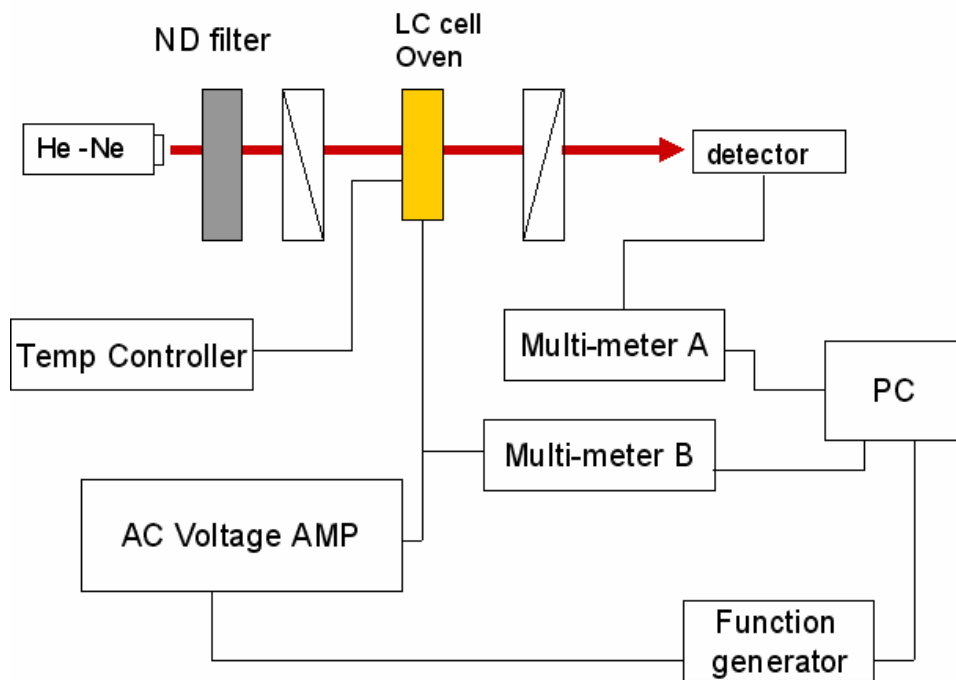


圖3-6 K_{22} 量測裝置示意圖

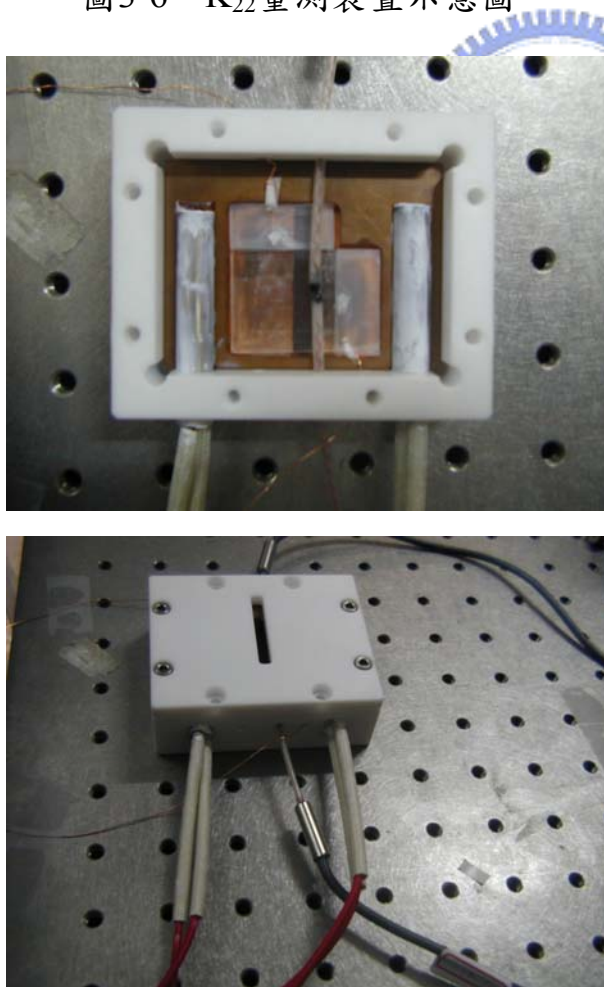


圖3-7 Oven裝置示意圖

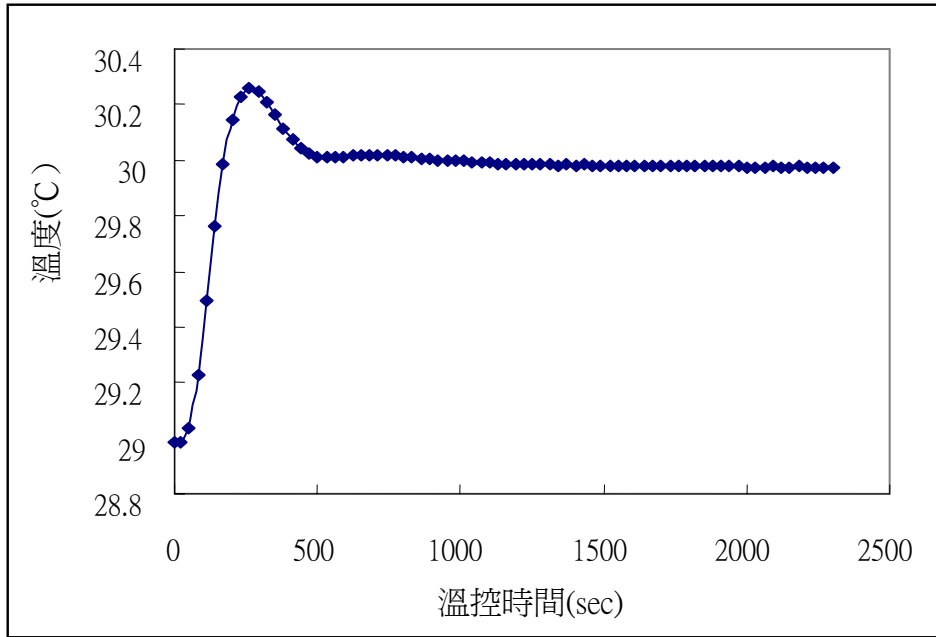


圖3-8 Oven裝置內部溫度達到穩定示意圖

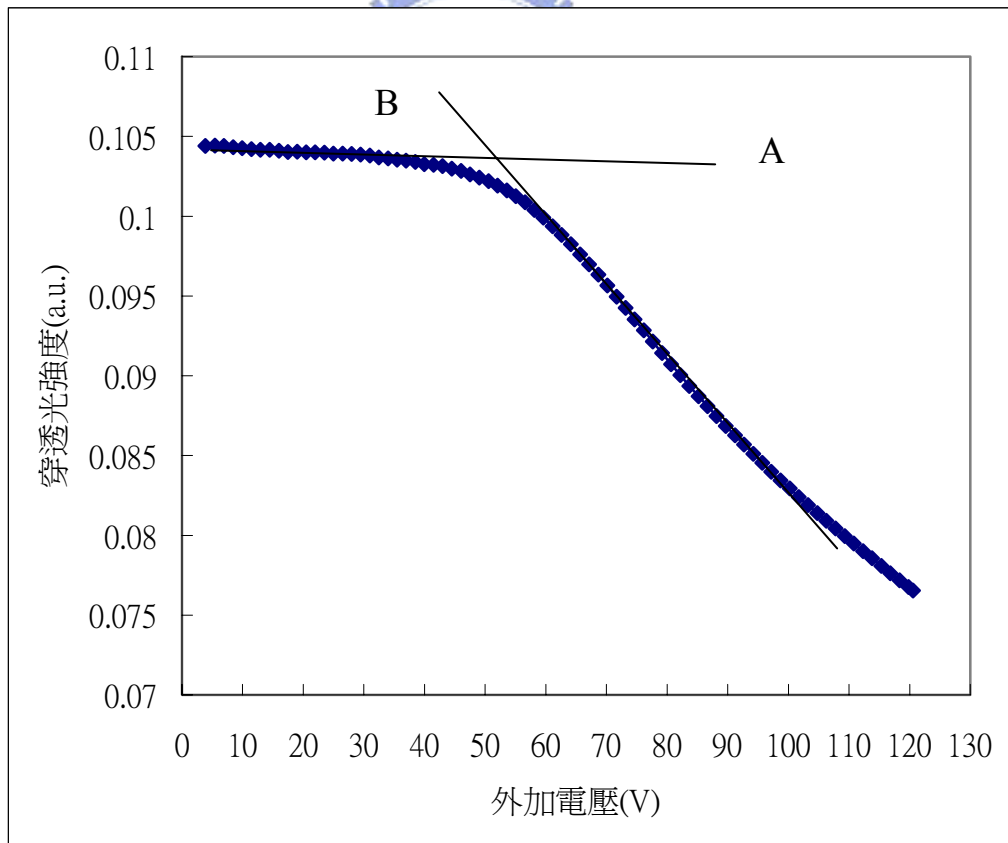


圖3-9 利用雙插法求得IPS樣品的臨界電壓值

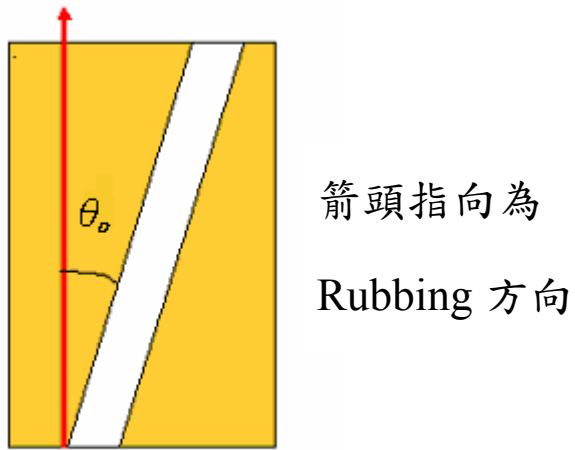


圖 4-1 IPS 樣品之偏移角 θ_0 (上視圖)

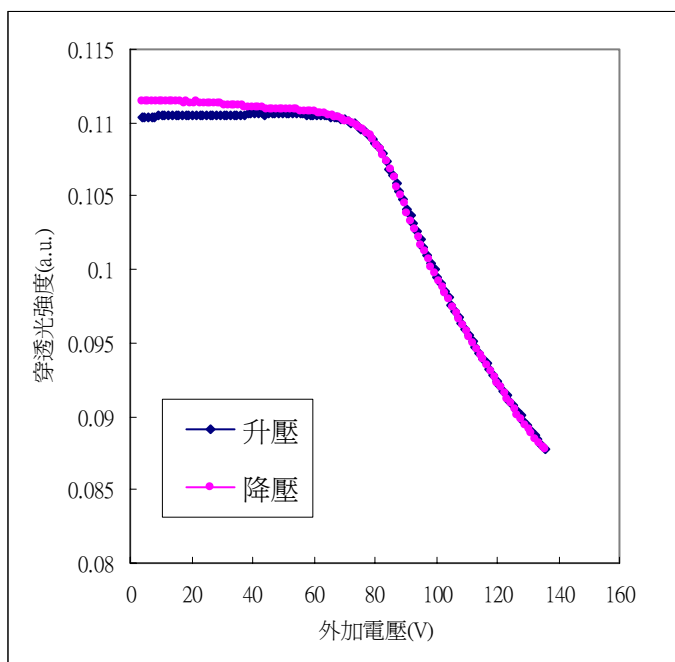
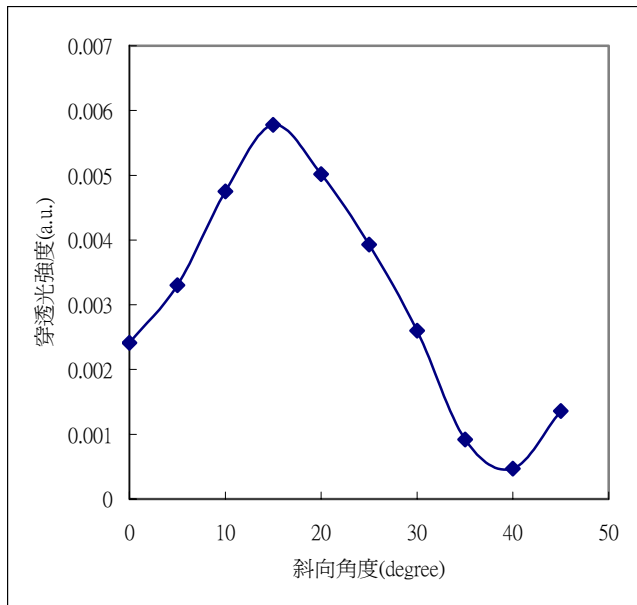


圖 4-2 IPS 液晶樣品升壓降壓的量測圖形



1. 最暗態角度為 40 度
2. 斜率變化最大 值為 30 度

圖 4-3 IPS 液晶樣品在不加電壓時穿透光強度與入射角之關係

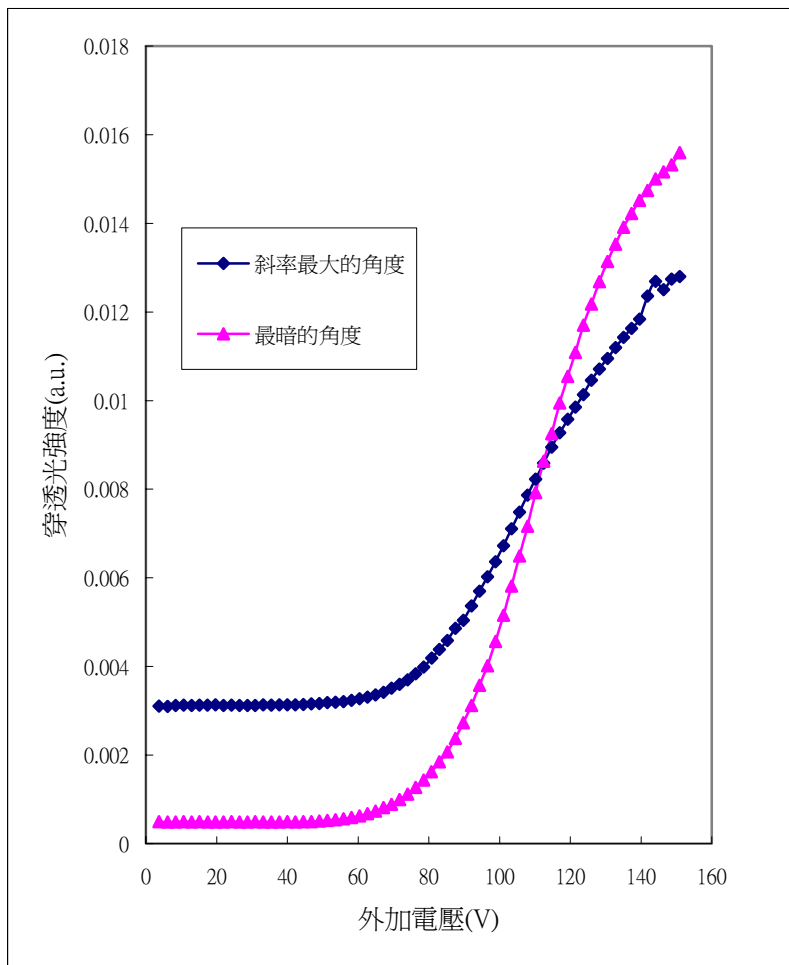


圖 4-4 IPS 液晶樣品在斜向入射的測試結果

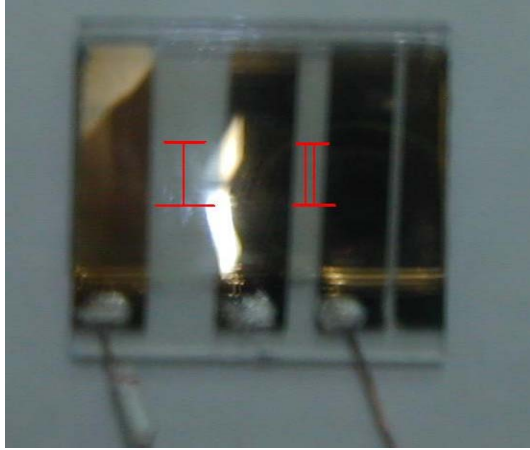


圖 4-5 不同電極間距的 IPS 液晶樣品

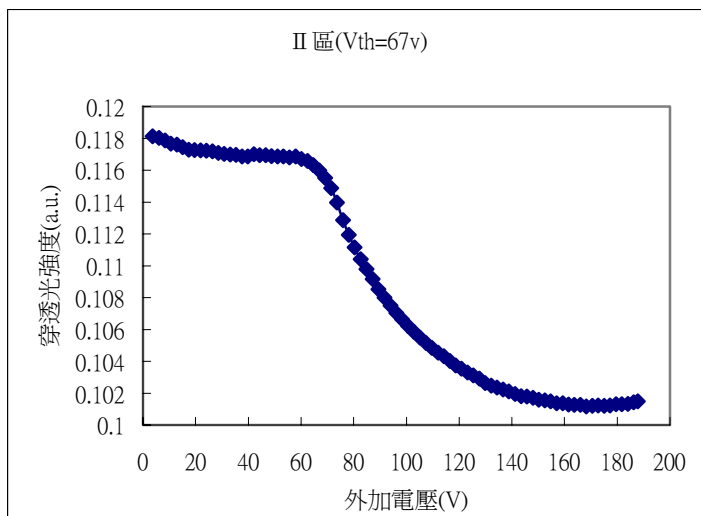
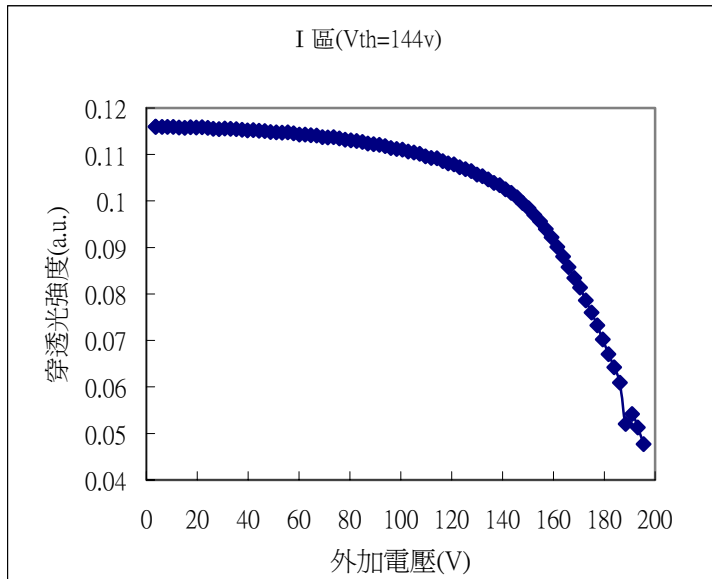


圖 4-6 不同電極間距的臨界電壓量測值

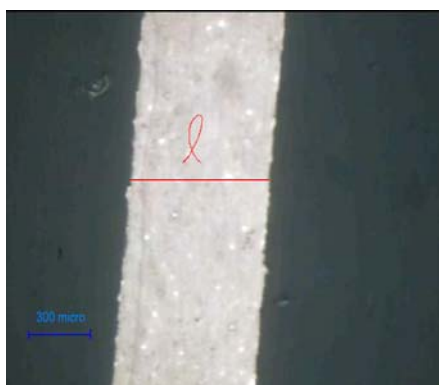


圖 4-7 電極間距照片 ($l=670\pm 10\mu\text{m}$)

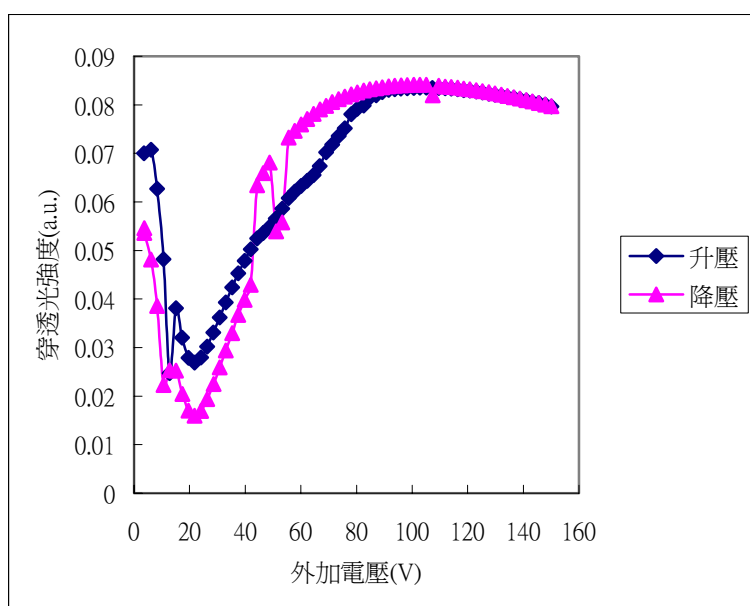


圖 4-8(a) 沒貼不透光膠帶的臨界電壓量測圖

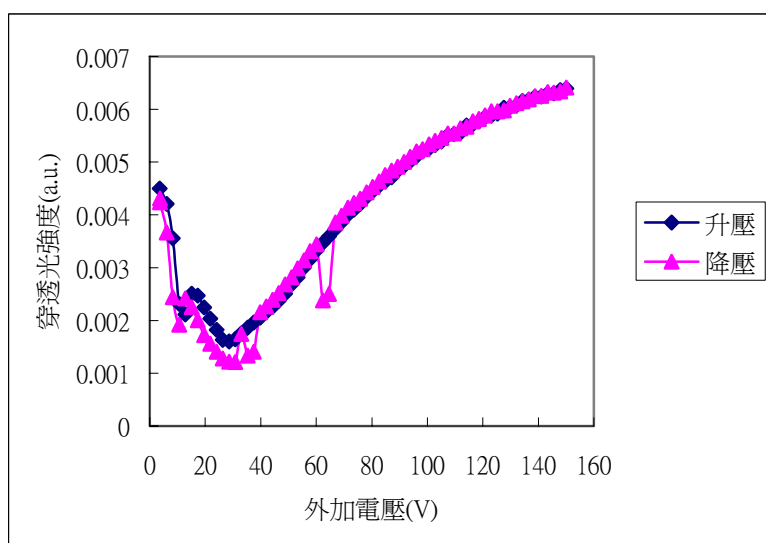


圖 4-8(b) 有貼不透光膠帶的臨界電壓量測圖

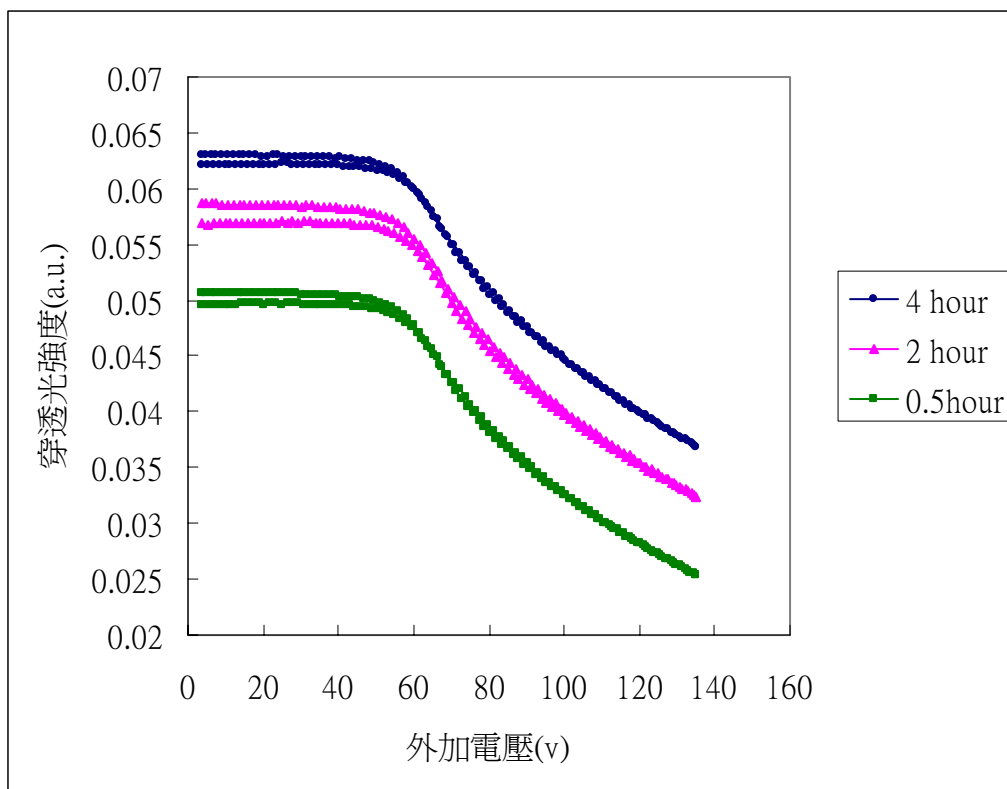


圖 4-9 在 30°C 下不同等待時間的臨界電壓量測圖

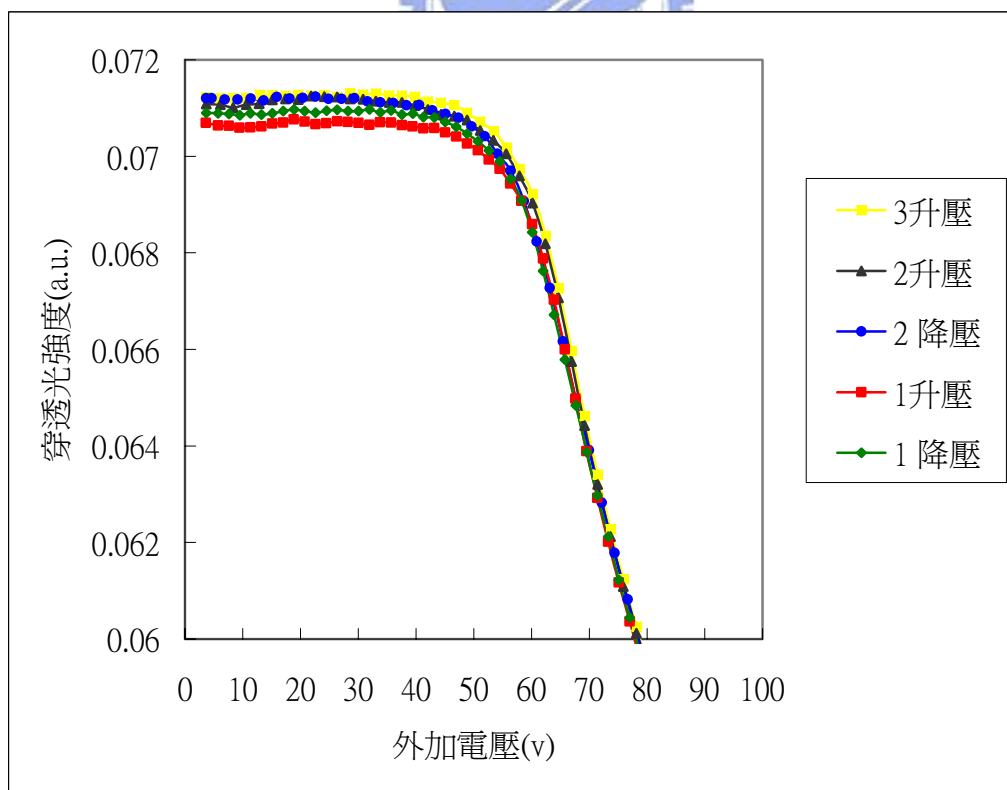


圖 4-10 同一個量測點連續量測臨界電壓圖

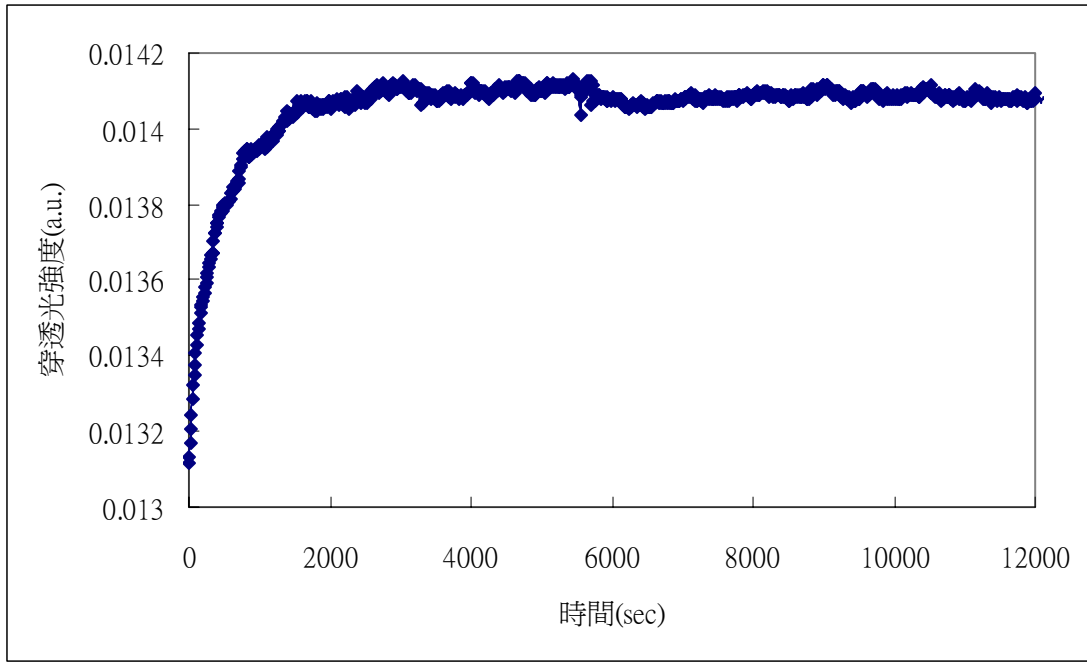


圖 4-11 雷射光不透過液晶樣品穿透光強度與時間關係圖

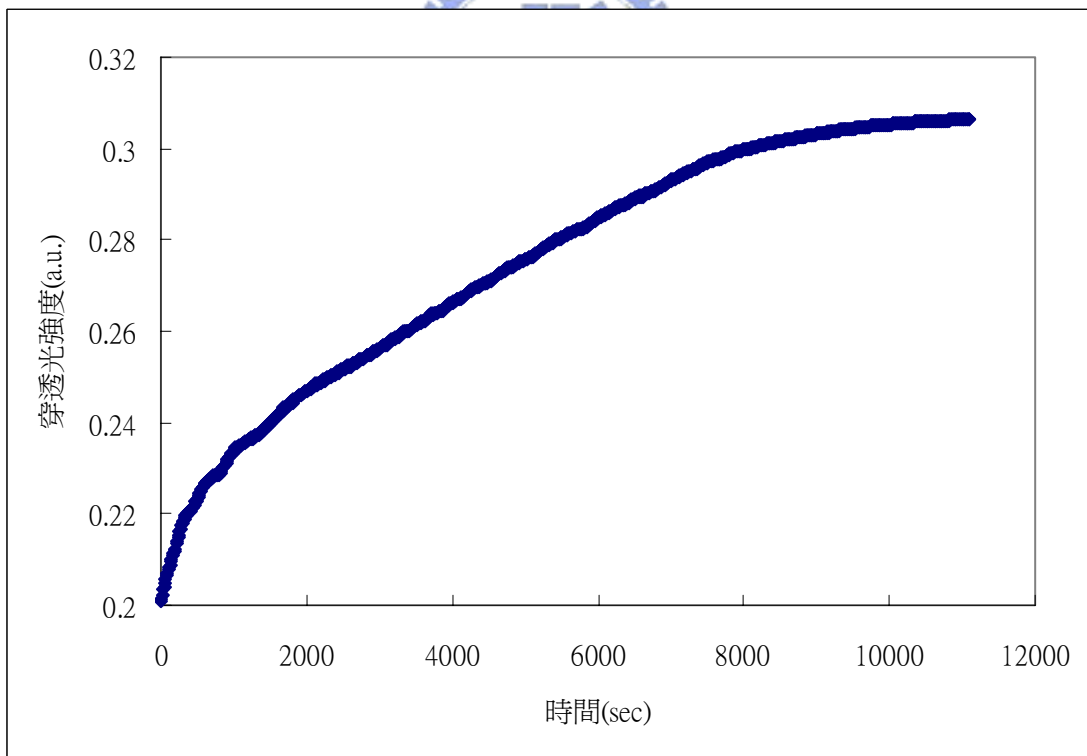


圖 4-12 雷射光有透過液晶樣品穿透光強度與時間關係圖

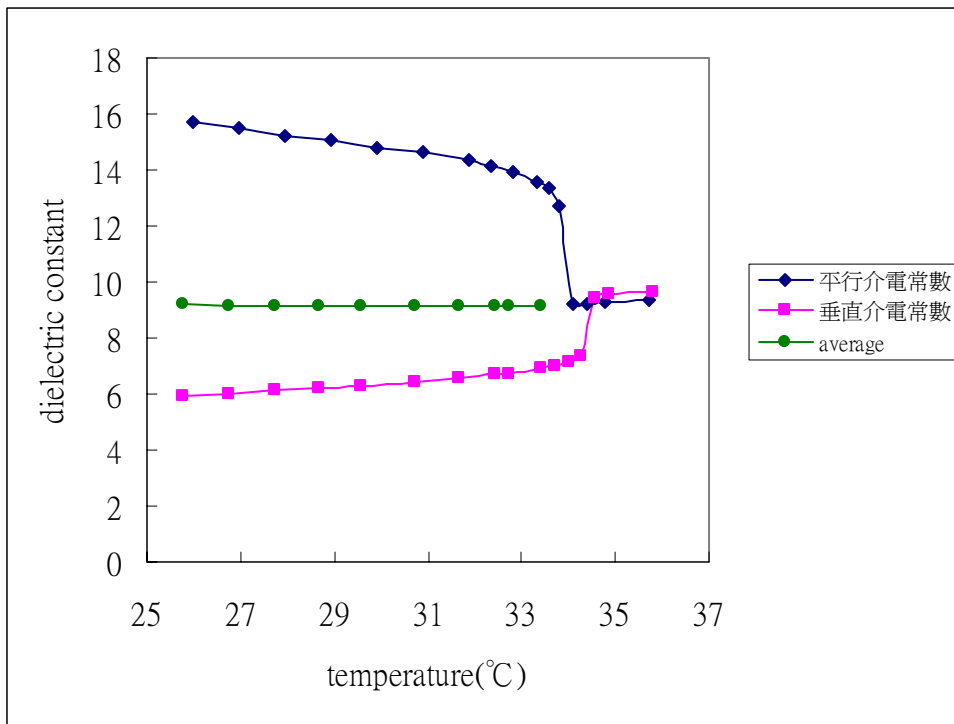


圖 5-1 Merck 5CB 介電常數對溫度的關係圖

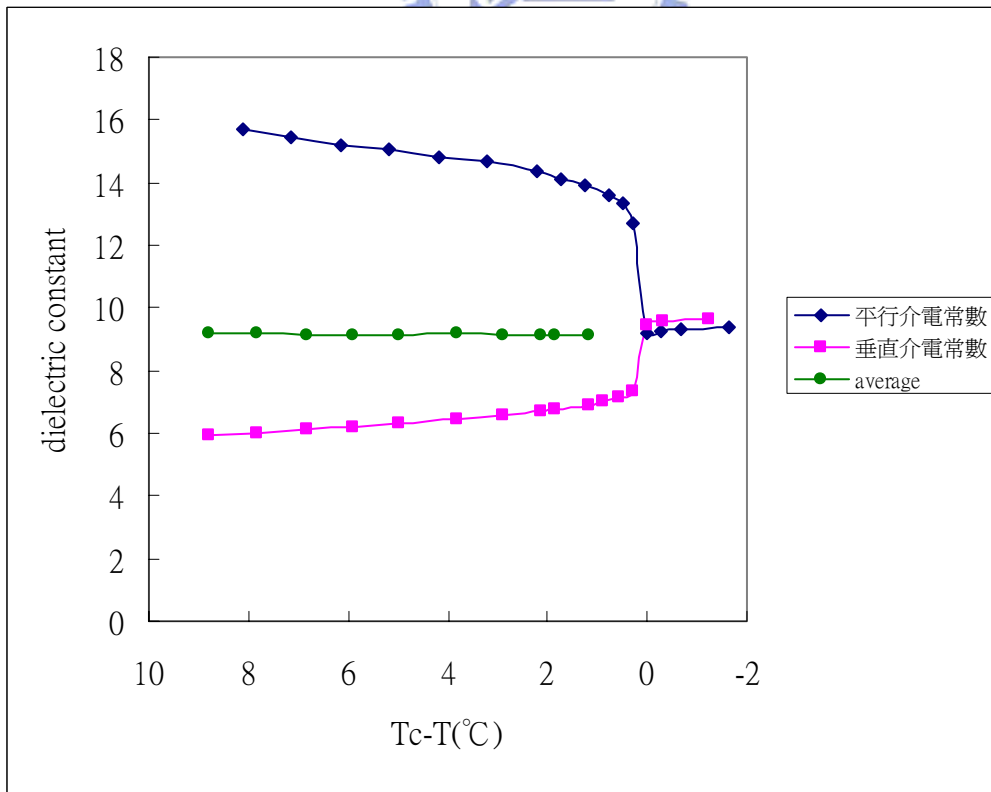


圖 5-2 Merck 5CB 介電常數對 $T_c - T$ 的關係圖

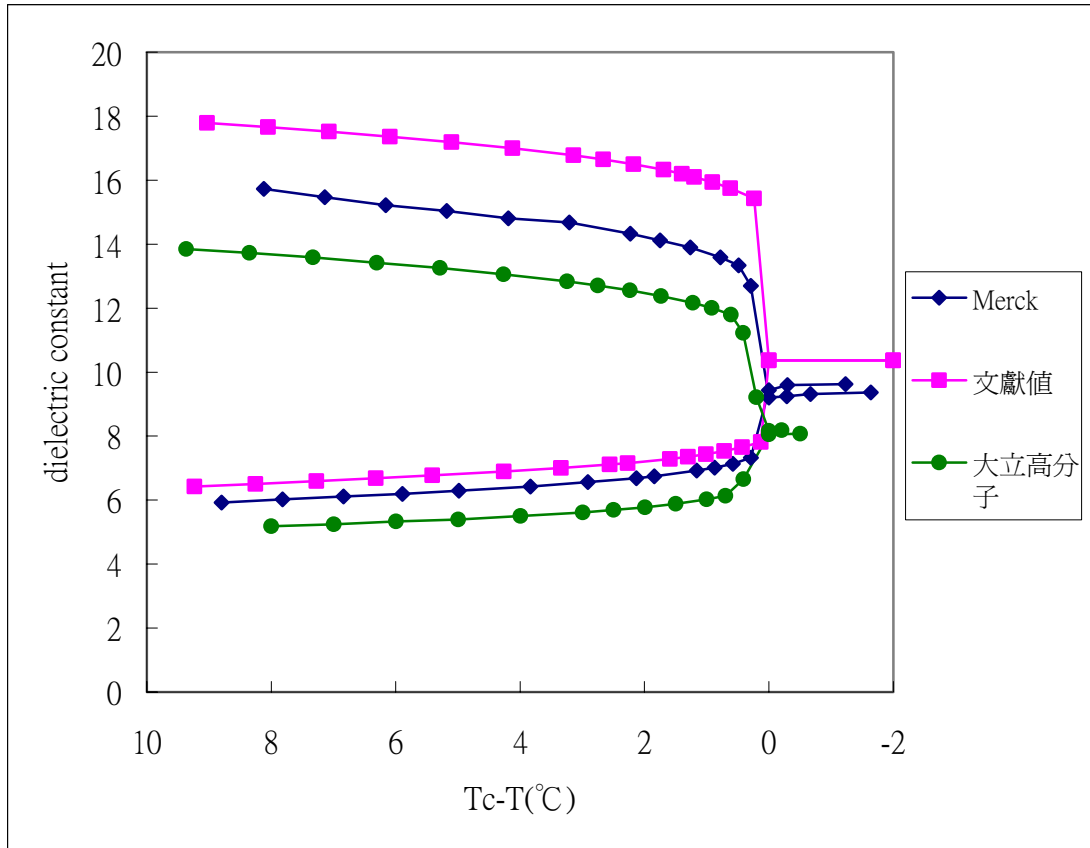


圖 5-3 5CB(Merck 大立高分子 文獻值)三者介電常數關係圖

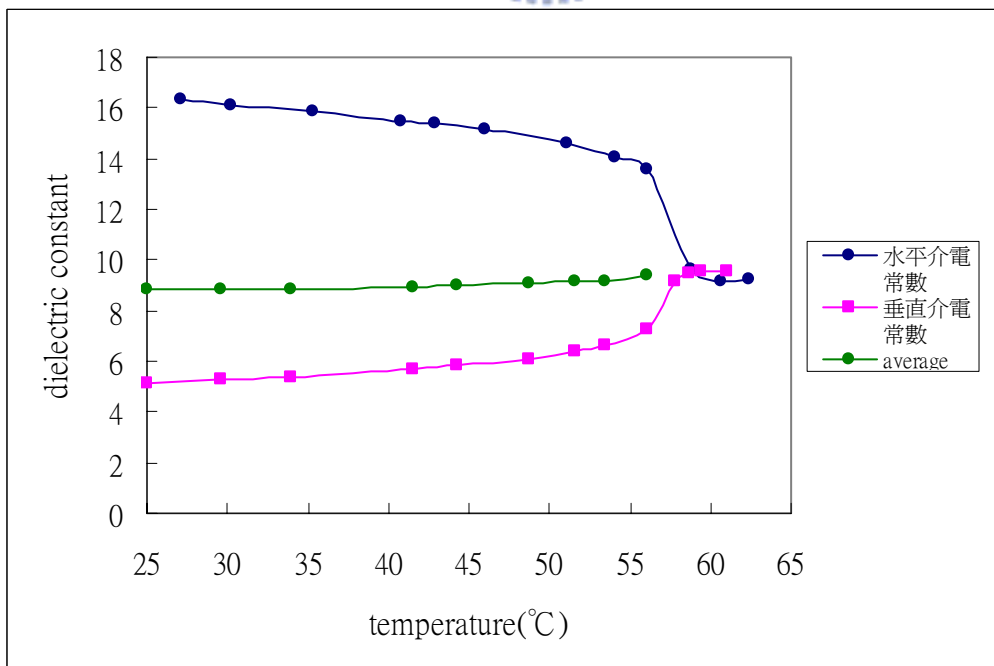


圖 5-4 Merck E7 介電常數對溫度的關係圖

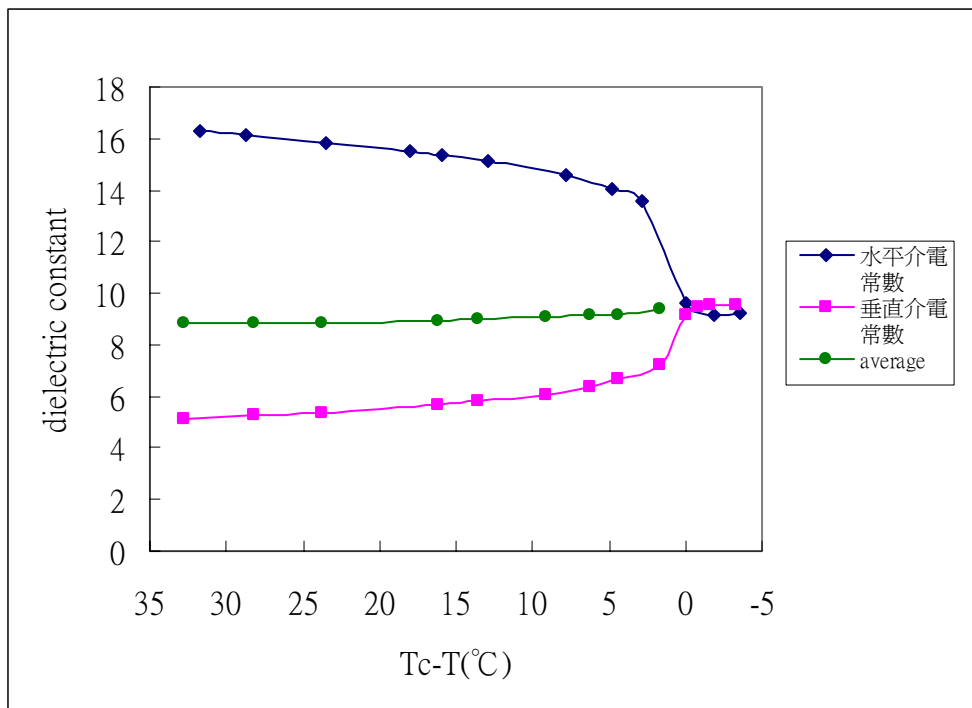


圖 5-5 Merck E7 介電常數對 T_c-T 的關係圖

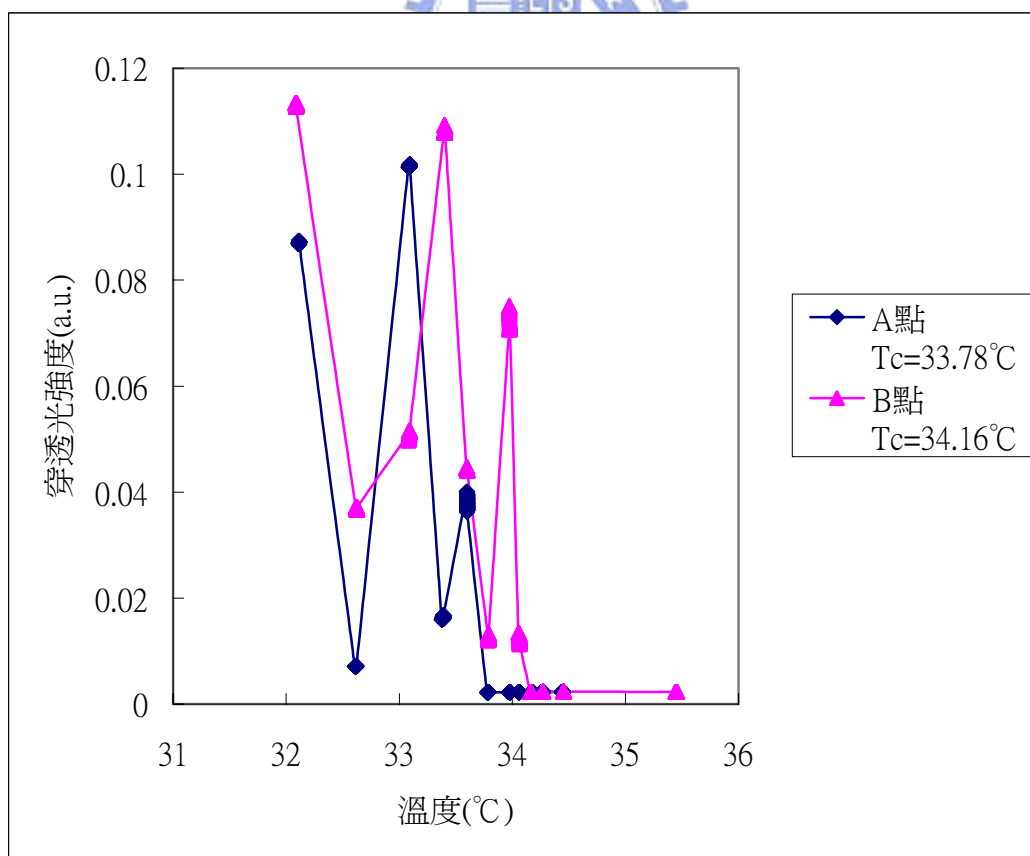


圖 5-6 同一個樣品上不同點間的溫度與穿透光強度關係圖

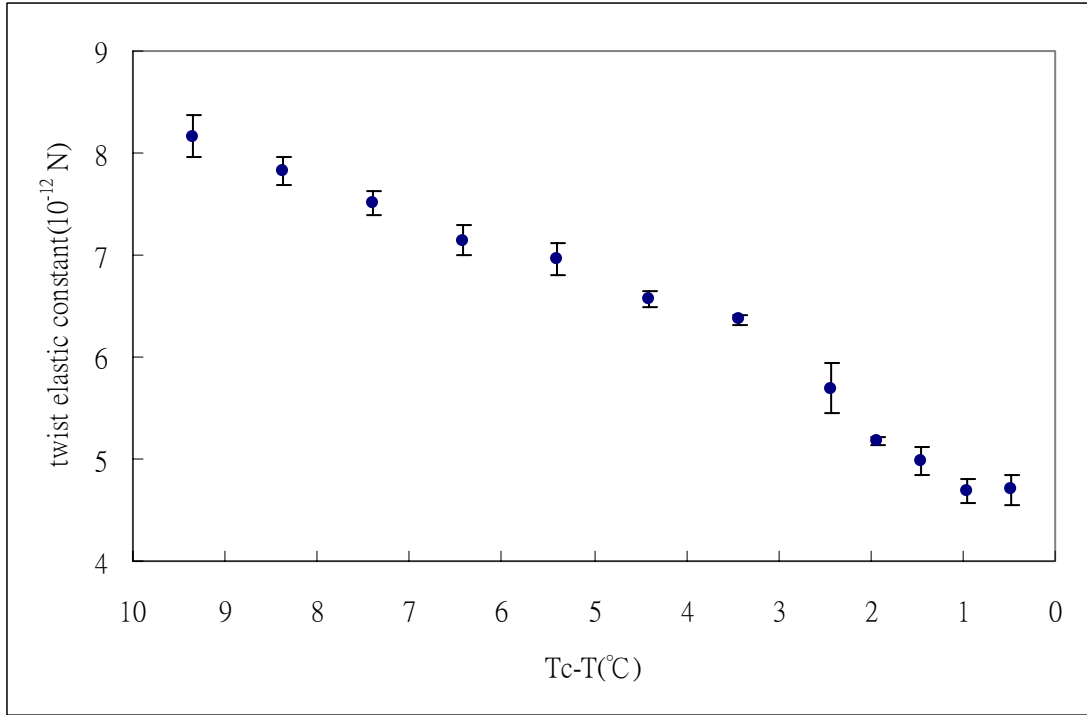


圖 5-7 Merck 5CB K₂₂值對T_c-T的關係圖

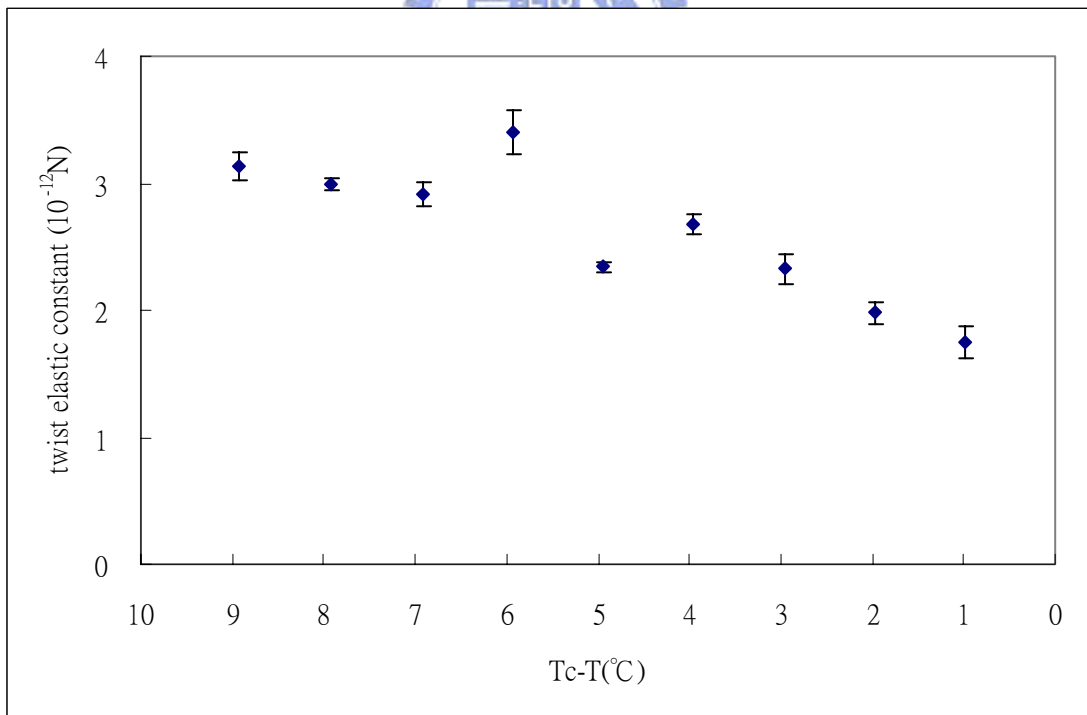


圖 5-8 大立高分子 5CB K₂₂值對T_c-T的關係圖

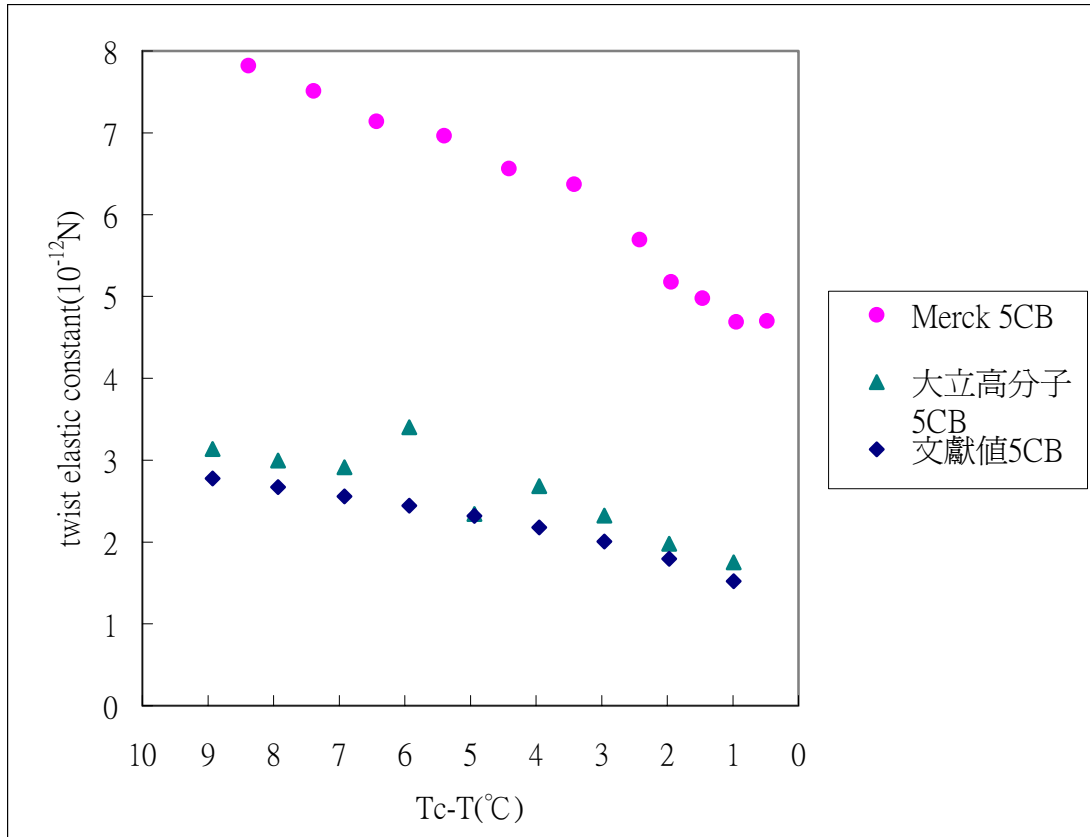


圖 5-9 5CB(Merck 大立高分子 文獻值)三者 K_{22} 關係圖

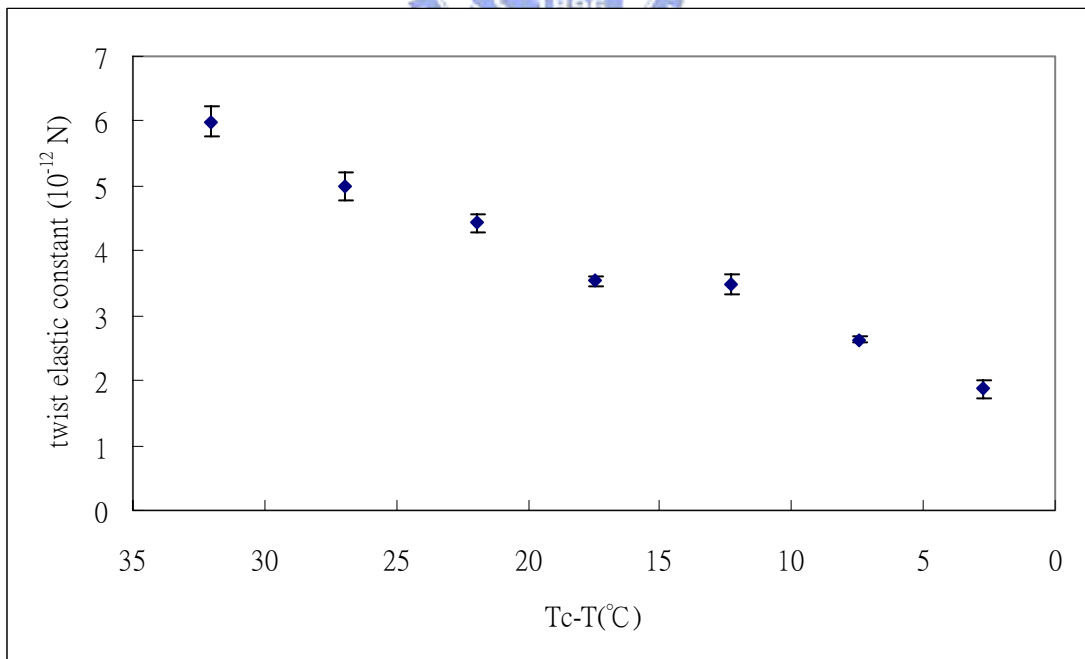
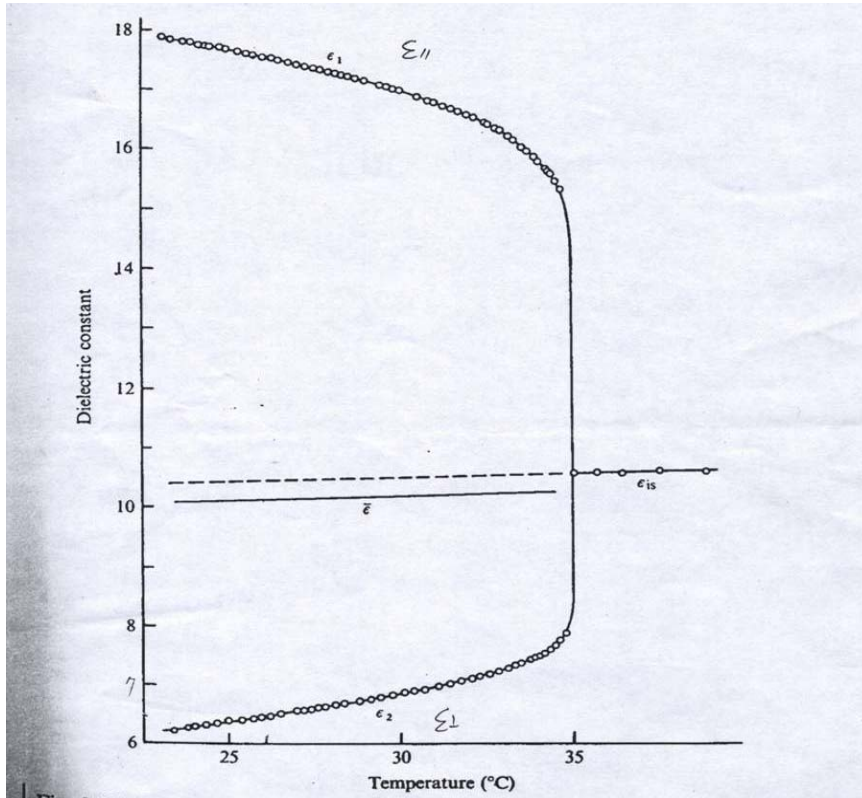
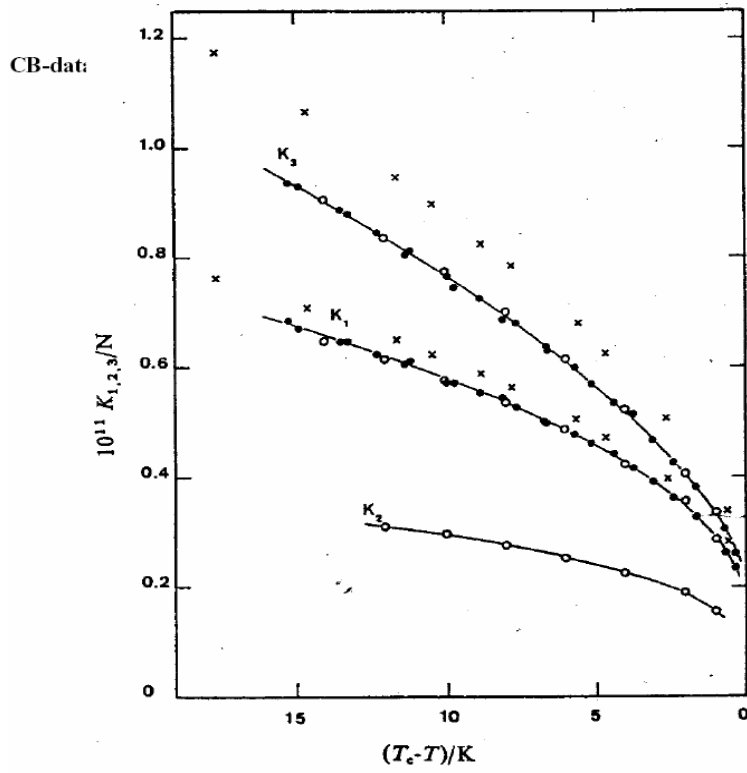


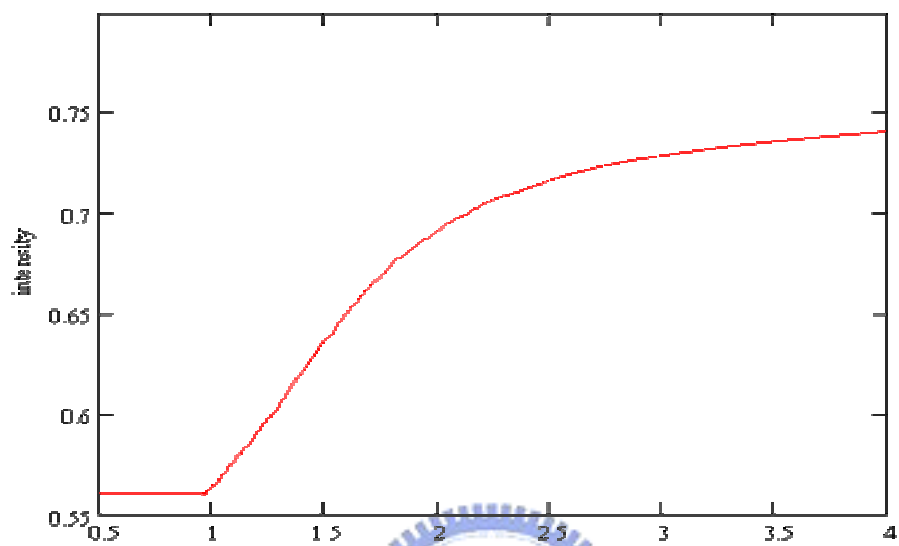
圖 5-10 Merck E7 K_{22} 值對 T_c-T 的關係圖



附錄圖 A 5CB 介電常數對溫度的變化關係圖



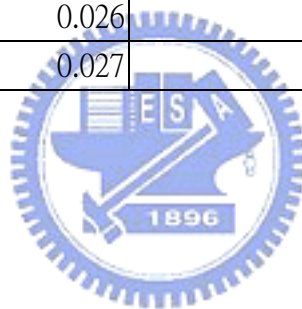
附錄圖 B 5CB K_{11} K_{22} K_{33} 對溫度的變化關係圖



附錄圖 C 理論模擬外加電壓與穿透光強度關係圖

5CB	voltage	cell gap	electrodes distance	electric field	溫度控制在 28.5°C	
區域	Vth(volt)	d(μm)	l(μm)	E(volt/ μm)	dielectric anisotropy	twist elastic constant(N)
I	144	32.77	5358	0.026	8.93	6.2E-12
II	67	32.18	2475	0.027	8.93	6.1E-12

表 4-1 相同厚度不同電極間距的量測結果



溫度(°C)	電容值(pF)	水平介電常數
25.97	496.2	15.73
26.95	488.1	15.47
27.93	480.2	15.22
28.91	474.4	15.04
29.90	467.3	14.81
30.88	463.0	14.68
31.86	452.1	14.33
32.34	445.3	14.11
32.83	438.5	13.90
33.31	428.6	13.59
33.60	420.6	13.33
33.80	400.6	12.70
34.09	290.5	9.21
34.38	291.8	9.25
34.76	293.8	9.31
35.73	295.6	9.37

溫度(°C)	電容值(pF)	垂直介電常數
25.77	360.5	5.93
26.75	366.2	6.02
27.73	371.5	6.11
28.68	376.8	6.20
29.59	382.6	6.29
30.74	390.7	6.42
31.66	399.3	6.57
32.44	406.2	6.68
32.73	410.1	6.74
33.41	420.8	6.92
33.70	426.6	7.01
33.99	434.1	7.14
34.28	445.5	7.33
34.57	573.6	9.43
34.87	583.2	9.59
35.80	585.1	9.62

表 5-1 Merck 5CB 的介電常數量測結果

溫度(°C)	電容值(pF)	水平介電常數
26.07	501.3	13.85
27.09	497.0	13.73
28.11	491.7	13.58
29.13	485.8	13.42
30.15	479.8	13.25
31.17	472.8	13.06
32.19	464.5	12.83
32.69	459.9	12.70
33.20	454.5	12.56
33.71	448.1	12.38
34.22	440.3	12.16
34.52	434.5	12.00
34.83	427.1	11.80
35.03	406.2	11.22
35.24	333.4	9.21
35.44	295.5	8.16
35.64	296.3	8.19

溫度(°C)	電容值(pF)	垂直介電常數
27.04	166.8	5.18
28.04	168.9	5.25
29.04	171.6	5.33
30.05	173.8	5.40
31.05	177.1	5.50
32.04	180.7	5.61
32.54	183.2	5.69
33.04	186.0	5.78
33.54	189.5	5.89
34.04	193.8	6.02
34.34	197.5	6.13
34.63	214.3	6.66
35.04	259.4	8.06
35.54	259.9	8.07

表 5-2 大立高分子 5CB 的介電常數量測結果

溫度 (°C)	電容值(pF)	水平介電常數
27.06	561.0	16.31
30.18	555.0	16.13
35.36	545.2	15.85
40.81	533.0	15.49
42.88	528.4	15.36
45.94	521.5	15.16
51.08	502.7	14.61
54.11	484.3	14.08
56.03	467.3	13.58
58.85	331.5	9.64
60.71	315.3	9.17
62.42	318.7	9.26

溫度 (°C)	電容值(pF)	垂直介電常數
24.96	152.7	5.13
29.60	156.3	5.25
34.00	160.0	5.38
41.57	168.6	5.67
44.22	173.3	5.82
48.67	181.0	6.08
51.55	190.4	6.40
53.40	197.6	6.64
56.07	215.5	7.24
57.80	273.1	9.18
58.63	281.9	9.47
59.45	283.5	9.53
61.08	284.8	9.57

表 5-3 Merck E7 的介電常數量測結果

Merck 5CB	offset angle 2 度		cell gap	electrode distance	Tc=34.39°C	
temperature(°C)	Tc-T(°C)	Vth(volt)	d(μm)	l(μm)	dielectric anisotropy	twist elastic constant(N)
25.03	9.36	78.5	34.12	2840	10.23	8.2E-12
26.01	8.38	78.4	34.12	2840	9.82	7.8E-12
27.00	7.39	78.3	34.12	2840	9.47	7.5E-12
27.96	6.43	77.6	34.12	2840	9.16	7.1E-12
28.99	5.40	78.0	34.12	2840	8.85	7.0E-12
29.98	4.41	77.1	34.12	2840	8.54	6.6E-12
30.97	3.42	77.6	34.12	2840	8.17	6.4E-12
31.97	2.42	75.5	34.12	2840	7.72	5.7E-12
32.45	1.94	73.2	34.12	2840	7.47	5.2E-12
32.93	1.46	73.2	34.12	2840	7.18	5.0E-12
33.44	0.95	73.0	34.12	2840	6.79	4.7E-12
33.91	0.48	77.4	34.12	2840	6.06	4.7E-12

表 5-4 Merck 5CB的扭曲彈性係數 K_{22} 量測結果

大立高分子 5CB	offset angle 2 度		cell gap	electrode distance	Tc=34.96°C	
temperature(°C)	Tc-T(°C)	Vth(volt)	d(μm)	l(μm)	dielectric anisotropy	twist elastic constant(N)
26.03	8.93	49.3	29.13	2236	8.48	3.1E-12
27.03	7.93	48.5	29.13	2236	8.37	3.0E-12
28.04	6.92	48.2	29.13	2236	8.24	2.9E-12
29.03	5.93	52.6	29.13	2236	8.09	3.4E-12
30.02	4.94	44.1	29.13	2236	7.91	2.3E-12
31.01	3.95	47.9	29.13	2236	7.68	2.7E-12
32.00	2.96	45.6	29.13	2236	7.36	2.3E-12
32.99	1.97	43.5	29.13	2236	6.86	2.0E-12
33.97	0.99	44.3	29.13	2236	5.86	1.8E-12

表 5-5 大立高分子 5CB的扭曲彈性係數 K_{22} 量測結果

Merck E7	offset angle 2 度		cell gap	electrode distance	Tc=57.09°C	
temperature(°C)	Tc-T(°C)	Vth(volt)	d(μm)	l(μm)	dielectric anisotropy	twist elastic constant(N)
25.05	32.04	55.1	29.89	2143	11.34	6.0E-12
30.10	26.99	51.4	29.89	2143	10.87	5.0E-12
35.12	21.97	49.4	29.89	2143	10.43	4.4E-12
39.60	17.49	45.1	29.89	2143	9.96	3.5E-12
44.82	12.27	46.2	29.89	2143	9.37	3.5E-12
49.65	7.44	42.1	29.89	2143	8.53	2.6E-12
54.35	2.74	39.4	29.89	2143	6.92	1.9E-12

表 5-6 Merck E7 的扭曲彈性係數 K_{22} 量測結果