

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

平行水平配向液晶盒錨定特性探討

**Study on the Anchoring Properties of Parallely
Planar-Aligned Nematic Liquid Crystal Cells**

研究生：謝美琪

指導教授：王淑霞

中華民國九十三年六月

平行水平配向液晶盒錨定特性探討

**Study on the Anchoring Properties of Parallely
Planar-Aligned Nematic Liquid Crystal Cells**

研究生：謝美琪

Student：Mei-Chi Hsieh

指導教授：王淑霞

Advisor：Rrof. Shu-Hsia Chen

國立交通大學光電工程研究所



A Thesis

Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering
College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master

in

Electro-Optical Engineering

June 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

平行水平配向液晶盒錨定特性探討

研究生：謝美琪

指導教授：王淑霞

國立交通大學光電工程研究所



摘要

在學術研究與液晶顯示器的應用上，液晶盒錨定特性的探討有其重要性與需求。我們準備了摩擦配向與光配向的平行水平配向液晶盒分別探討其傾角界面自由能與方位角界面自由能。首先藉著液晶盒相位延遲對電壓的量測與模擬軟體之結果比對，可以決定修正過後的 Rapini Papoular 界面自由能的傾角錨定能係數。另外利用液晶連體彈性形變理論與 Rapini Papoular 界面自由能表示式，經由液晶扭轉角度與厚度的量測，我們得知方位角錨定能係數。並進一步觀察一種光配向液晶盒的熱穩定性。

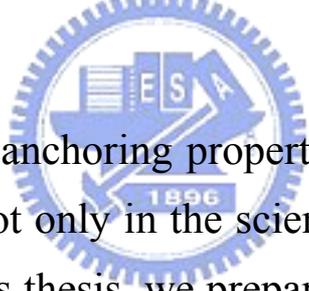
Study on the Anchoring Properties of Parallely Planar-Aligned Nematic Liquid Crystal Cells

Student : Mei-Chi Hsieh

Advisor : Prof. Shu-Hsia Chen

**Institute of Electro-Optical Engineering National
Chiao Tung University**

Abstract



The study on the anchoring properties of the liquid crystal cells is an important issue not only in the scientific research but also in the LCD technology. In this thesis, we prepared several rubbing parallely planar- aligned nematic liquid crystal cells and several photo-aligned ones. The polar anchoring energy coefficient of the modified Rapini-Papoular formula can be determined by comparing the measured phase retardation versus voltage curve to that simulated from the commercial simulator. Based on the continuum theory and the Rapini-Papoular formula of the surface free energy density, we also determined the azimuthal anchoring energy coefficient via the measurements of the twist angle and the cell gap in a specially assembled liquid crystal cell. Furthermore, we investigated the thermal stability of one photo-aligned nematic liquid crystal cell.

誌謝

豐富的兩年研究生生活替我畫下了在交大六年求學歷程最完美的句點。首先特別要感謝我的指導老師王淑霞教授，除了在學術研究上的指導，每當我遇到困難的時候，王淑霞老師總是提供我正面的思考及方向的指引。老師對學生所付出的關心與照顧是最令我無法忘懷的。

非常感謝液晶實驗室的寶芝學姐及芝珊學姐，每次與學姐討論都令我獲益良多，除了謝謝學姐耐心地在研究上給予我指導及解惑，也要謝謝學姐常常陪我聊天，讓我在生活中學習以更多的角度去看待同樣的一件事情。感謝實驗室的學長、大師兄、勇哥、寬哥、雄哥、范姜、怡安、德源、建宏、世郁及舒展，帶領我熟悉液晶實驗室的大家庭，並熱心地給予我專業領域上的幫助。感謝我研究生活中的伙伴阿發及家榮，在一同修課及研究的路上，謝謝你們所給予的協助及為我的實驗生活帶來的歡笑。也感謝這一屆的學弟小伍及小向，接管了我實驗室報名及文書處理等工作，讓我可以專心做研究。

感謝源田，給予我的支持，雖然你不能常在我的身旁加油打氣，但透過電話所傳達的關心及加油聲，讓我更加有信心地面對每次的挑戰。

謝謝我的姐姐慧禎，每當我傷心難過時，妳總是不吝惜的讓我躲進妳溫暖的小窩，聽我訴苦。還有我最可愛的弟弟暉祥，在我帶著疲憊的身軀回家時，你會苦盡腦汁逗我笑，讓我恢復元氣。最後要特別感謝我的父母親謝耀州先生及林鳳菊女士，給予我最甜蜜的家庭、最無後顧之憂的學習環境，謝謝你們細心地照顧，讓我可以順利地取得碩士學位。

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
符號說明.....	ix
第一章 緒言.....	1
第二章 液晶盒製作與預傾角量測.....	4
2.1 液晶盒的製作.....	4
2.2 預傾角的量測.....	8
第三章 傾角界面自由能.....	11
3.1 傾角錨定能理論.....	11
3.2 傾角錨定能係數量測原理.....	15
3.3 傾角錨定能係數量測結果.....	20
3.3.1 實驗結果.....	20
3.3.2 討論.....	22

第四章	方位角界面自由能.....	24
4.1	方位角錨定能理論.....	24
4.2	方位角錨定能係數量測原理.....	26
4.2.1	原理.....	26
4.2.2	討論.....	32
4.2.3	誤差分析.....	36
4.3	液晶節距的量測.....	39
4.3.1	原理.....	39
4.3.2	液晶節距量測結果.....	41
4.4	方位角錨定能係數量測結果.....	42
第五章	熱穩定性.....	45
5.1	烤箱溫度穩定性量測.....	46
5.2	光配向液晶盒的熱穩定性實驗結果.....	47
第六章	結論與展望.....	51
6.1	結論.....	51
6.2	展望.....	53
	參考文獻.....	54
	附錄.....	55
	Matlab 程式：液晶扭轉角度與厚度量測.....	55

表目錄

表 2-1	液晶盒來源資料.....	4
表 2-2	液晶相關參數.....	7
表 2-3	液晶盒預傾角量測結果.....	10
表 3-1	液晶盒 A 與模擬曲線交點相關數據.....	20
表 3-2	液晶盒 B 與模擬曲線交點相關數據.....	20
表 3-3	不同 K_{11} 及 K_{33} 下液晶盒 A 與 B 傾角錨定能係數 W_{θ} 與 ζ 值的量測.....	22
表 4-1	液晶節距量測結果.....	41
表 4-2	液晶盒 A 方位角錨定能係數量測結果.....	42
表 4-3	液晶盒 C 方位角錨定能係數量測結果.....	43
表 5-1	烤箱溫度設定為 50°C 其溫度隨時間的變化.....	46
表 5-2	烤箱溫度設定為 150°C 其溫度隨時間的變化.....	46
表 5-3	退火溫度 100°C 時液晶盒在偏光顯微鏡下的均勻性.....	49
表 5-4	退火溫度 140°C 時液晶盒在偏光顯微鏡下的均勻性.....	50

圖目錄

圖 2-1	紫外光配向裝置圖.....	6
圖 2-2	液晶盒組合示意圖.....	7
圖 2-3	預傾角量測裝置.....	9
圖 2-4	相位延遲與雷射光入射角度關係圖.....	10
圖 3-1	平行水平配向液晶盒指向矢示意圖.....	12
圖 3-2	編號 B 的液晶盒其實驗與 DIMOS 模擬的相位延遲對 電壓的關係圖.....	13
圖 3-3	相位延遲對電壓的量測裝置.....	15
圖 3-4	液晶盒 B 相位延遲與電壓關係的局部放大圖.....	16
圖 3-5	液晶盒 B 調參數後相位延遲與電壓關係的局部放大圖.....	16
圖 3-6	模擬不同傾角錨定能係數 W_θ 的相位延遲與電壓關係圖.....	17
圖 3-7	模擬不同傾角錨定能係數 W_θ 在高電壓下的相位延遲與 電壓關係圖.....	18
圖 3-8	液晶盒 A 傾角界面自由能與偏離角度關係圖.....	21
圖 3-9	液晶盒 B 傾角界面自由能與偏離角度關係圖.....	21
圖 3-10	高電壓下不同 ζ 值相位延遲與電壓的關係圖.....	23
圖 4-1	液晶盒扭轉角度與厚度量測裝置圖.....	27
圖 4-2	偏光片與液晶盒的對應關係圖.....	28

圖 4-3	偏光片與液晶盒對應位置示意圖.....	29
圖 4-4	入射光穿透率與液晶盒位置及偏光片夾角關係圖 ($\sin X \approx 0$).....	33
圖 4-5	入射光穿透率與液晶盒位置及偏光片夾角關係圖 ($\cos X \approx 0$ 且 $\Phi_t \approx 0$).....	34
圖 4-6	W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時不同 W_ϕ 其 p 的容忍度.....	37
圖 4-7	W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時不同 W_ϕ 其 d 的容忍度.....	37
圖 4-8	W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時不同 W_ϕ 其 $\Delta\Phi_t$ 的容忍度.....	38
圖 4-9	W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時不同 W_ϕ 其 $\Delta\phi_e$ 的容忍度.....	38
圖 4-10	wedge cell 示意圖.....	39
圖 4-11	wedge cell 夾角 ρ 量測實驗架構圖.....	39
圖 4-12	雷射光經 wedge cell 反射示意圖.....	40
圖 4-13	液晶盒 A 的 d/p 值與方位角錨定能係數的關係圖.....	43
圖 4-14	液晶盒 C 的 d/p 值與方位角錨定能係數的關係圖.....	44
圖 5-1	烤箱溫度測定位置示意圖.....	46
圖 5-2	預傾角與退火溫度關係圖.....	48
圖 5-3	方位角錨定能係數與退火溫度關係圖.....	48

符號說明

n_o	液晶尋常光折射係數(ordinary refraction index)
n_e	液晶非尋常光折射係數(extraordinary refraction index)
ε	與液晶軸向垂直的介電常數(dielectric constant)
ε	與液晶軸向平行的介電常數(dielectric constant)
\bar{D}	電位移(displacement)
\bar{E}	電場(electric field)
K_{11}	液晶展曲(splay)彈性係數
K_{22}	液晶扭轉(twist)彈性係數
K_{33}	液晶彎曲(bend)彈性係數
d	液晶盒厚度(cell gap)
	雷射光波長
	相位延遲(phase retardation)
α	液晶指向傾角
W	傾角錨定能係數(polar anchoring energy coefficient)
W_ϕ	方位角錨定能係數(azimuthal anchoring energy coefficient)
ζ	RP準則修正項係數
Φ_t	液晶扭轉角度(twist angle)
ϕ_e	上下兩基板 easy direction 的夾角
p	液晶的節距(pitch)
Ψ_{ent}	偏光片(polarizer)穿透軸與入射面液晶指向的夾角
Ψ_{exit}	檢偏片(analyzer)穿透軸與入射面液晶指向的夾角
Ψ_0	入射面液晶指向與偏光片(polarizer)穿透軸的夾角
Ψ_A	檢偏片(analyzer)穿透軸與偏光片(polarizer)穿透軸的夾角
ρ	楔形液晶盒(wedge cell)兩玻璃基板的夾角

第一章 緒言

奧地利植物學家 F.Reinitzer 於 1888 年首次發現液晶，在 1960 年後線狀液晶的光電效應才被發現，使得液晶的研究與應用開始蓬勃發展，即使發展了這麼長一段時間，到了現在液晶盒界面自由能，或稱是錨定能仍舊是一個值得深入研究的課題。

那麼何謂錨定強度？液晶盒的錨定強度是用來表示液晶盒內配向層與液晶分子間相互作用的特性，可以反應液晶分子定向排列的程度，甚至不同強度的錨定特性會影響液晶盒內整體的液晶指向矢排列的行為。在研究液晶的初期，大都假設液晶盒的錨定強度為無窮大，這意謂著所有在表面的液晶分子指向矢都乖乖的排列在 easy axis 的方向上，不論我們施加的外場有多大，都無法拉動其液晶盒表面的分子。然而，在真實的狀況下，並非如此，到了 1969 年，Rapini 和 Papoular 等人最早提出一個簡單的準則用來描述液晶盒表面的錨定特性，以每單位面積的界面自由能表示如下 [1]， θ 為極角。

$$f_s = \frac{1}{2} W \sin^2 \theta \quad (1-1)$$

這種界面自由能的表示法在研究垂直排列液晶盒上很成功，但對於表面為平行排列且有預傾角的液晶盒，便無法區隔傾角及方位角方向上的界面自由能。如今大家常用的表示法是將 RP 公式修改如下式：

$$f_s = \frac{1}{2} W_\theta \sin^2(\alpha - \alpha_E) + \frac{1}{2} W_\phi \sin^2(\phi - \phi_E) \quad (1-2)$$

W_θ 為傾角錨定能係數； α 為表面液晶指向矢的傾角； α_E 為easy direction的傾角； W_ϕ 為方位角錨定能係數； ϕ 為表面液晶指向矢的方位角； ϕ_E 為easy direction的方位角，則 $(\alpha-\alpha_E)$ 為傾角方向液晶指向矢的偏離角度， $(\phi-\phi_E)$ 為方位角方向液晶指向矢的偏離角度。在本論文的探討中，我們將(1-2)式稱之為RP準則。

在小角度偏離的情況下，即 $\sin(\alpha-\alpha_E)\sim(\alpha-\alpha_E)$ 且 $\sin(\phi-\phi_E)\sim(\phi-\phi_E)$ ，此時界面自由能 f_s 正比於偏離角度的平方，常用的RP準則能夠將液晶表面指向矢的行為描述的很好，所以這個準則也被大家接受。但是，在外加磁場或是電場相對的變大時，偏離角度也變大，RP準則無法正確的描述液晶指向矢的排列[2]，所以，在學術上就值得對界面自由能做更深入的研究。而在液晶顯示器產業上的影響也是不容忽視的，1991年，Gibbons等人發現利用線性極化光照射一種感光薄膜可使液晶分子規則排列，它沒有摩擦配向會產生靜電、灰塵污染及刮痕的缺點，也可以製作multi-domain的液晶顯示器以改善視角問題，但是其錨定強度卻比較弱，這種弱錨定能的液晶盒在加上電壓後，表面液晶較容易被電場拉動，使得液晶盒內指向矢的排列與強錨定能的排列有所差異，導致電光特性的改變。因此，更恰當的界面自由能表示法，不僅可以幫助我們做理論上的分析與實驗比對，更可以幫助我們利用軟體設計發展新的液晶盒模態，或是弱錨定的液晶盒元件(如光配向的顯示器、電子書等)。總之，不管是在學術或是液晶顯示器的應用上，界

面自由能的研究是極為重要的。

本論文研究平行水平配向液晶盒其錨定特性，準備了摩擦配向與光配向的液晶盒，來源與製作列於第二章內。我們將傾角錨定能與方位角錨定能分開來討論，首先在第三章中，著重在傾角錨定能表示法的討論，採用現今大家接受的modified Rapini-Papoular formula(加入 $\sin^4(\alpha-\alpha_E)$ 項)[3]，提出利用量測相位延遲與電壓關係的實驗曲線與商用軟體DIMOS模擬結果相互比較，以預測出二次項及四次項傾角錨定能係數的方法。第四章將針對利用量測液晶盒的厚度與扭轉角度，推算方位角錨定能係數的方法做討論與誤差分析，並觀察具相同配向條件但不同節距的液晶盒其錨定能的特性為何。最後在第五章中討論一種光配向液晶盒的熱穩定性。



第二章 液晶盒製作與預傾角量測

2.1 液晶盒製作

本論文中使用的液晶盒一部分是工研院及廠商提供，一部分是實驗室自己製作，液晶盒相關資料如下表 2-1 所示。但所有液晶皆是在實驗室利用毛細現象的方法灌入。

編號	A	B	C	D
配向層	PI-A	PI-B	PI-B	PI-C
來源	廠商	實驗室	實驗室	工研院
配向方法	摩擦配向	光配向	光配向	光配向
框膠厚度 (μm)	8~9	9.9	8	8

表 2-1 液晶盒來源資料

實驗室液晶盒準備

1. 清洗玻璃：

- (1) 使用鑽石刀將導電 ITO 玻璃切割為 25mm×40mm，以氮氣將玻璃表面灰塵及玻璃屑去除，放到染色壺裡。
- (2) 倒入中性玻璃清潔劑並加入去離子水(DI Water)蓋過玻璃，以超音波震盪 20 分鐘清洗乾淨，將清潔劑及去離子水倒掉。
- (3) 倒入 IPA 於染色壺，以超音波震盪 5 分鐘後，將 IPA 廢液倒入廢液回收筒中，換 ACE 超音波震盪 5 分鐘，也將 ACE 倒入廢液回收筒，其中

需注意 IPA 與 ACE 液體高度皆需蓋過玻璃。

- (4) 重覆步驟(3)二次後，去離子水與 IPA 以 2：1 的比例加入染色壺中，以超音波震盪 5 分鐘再將廢液到入廢液回收筒中。
- (5) 以氮氣吹乾玻璃表面後再放回染色壺中。
- (6) 放進烤箱烘烤一小時，溫度為 180°C。

2. 鍍配向膜：

- (1) 本實驗採用旋轉塗佈(spin coating)法，在玻璃上鍍上配向膜。視樣品的

黏滯情形設定旋轉塗佈機於適當的轉速，本實驗所製作的液晶盒編號 B

與 C 的轉速如下：

Step 1：1000 rpm 10 sec、Step 2：3500 rpm 40 sec

- (2) 將鍍好配向膜的玻璃放在加熱板上，用 80°C 的溫度軟烤 15 分鐘以蒸發溶劑。
- (3) 送入烤箱硬烤一小時，溫度為 200°C。

3. 線性極化紫外光(LPUV)配向：

以一連續光譜的汞氙燈為光源，通過一石英偏極片(由 20 片石英片所組成，斜放約為 Brewster 角度 57 度，利用 Brewster 角來達到偏極化紫外光)，將鍍有 PI-B 配向膜的玻璃置於紫外光下適當位置曝光，第一次曝光正射，第二次曝光將樣品轉 90 度後，以入射角度 40 度入射。第一次曝光

主要是在配向，配向方向與紫外光線偏極方向垂直；第二次曝光是用來產生預傾角。其中液晶盒編號 B 的樣品第一次與第二次曝光能量分別約為 10 J 與 5 J，而編號為 C 的樣品只有第一次曝光能量約為 3 J。下圖 2-1 為紫外光配向裝置圖。

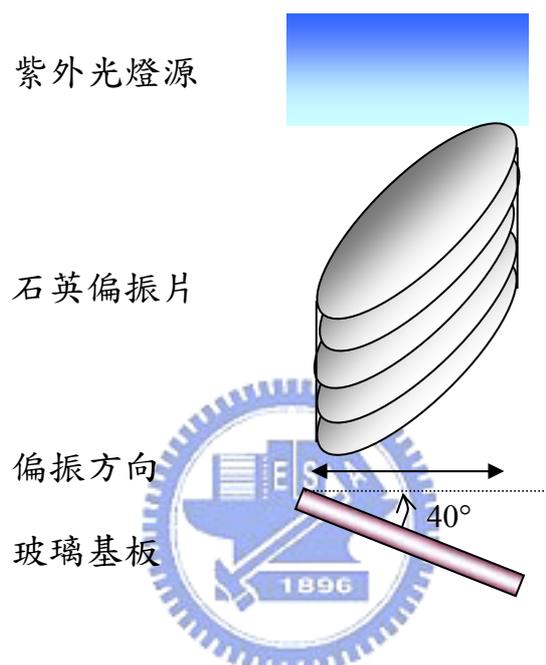


圖 2-1 紫外光配向裝置圖

4. 液晶盒組合：

先以氮氣吹去配向過之玻璃基板表面的髒顆粒，再塗上混有 spacer 的 UV 膠，以反平行配向方式組合液晶盒，由於編號 C 的樣品須在相同的邊界條件下注入具有不同旋性的液晶，為了達到這個目的，我們在液晶盒中多加一道 UV 膠，將其分隔出兩個子液晶盒。編號 B 與編號 C 的液晶盒組合示意圖如下圖 2-2：

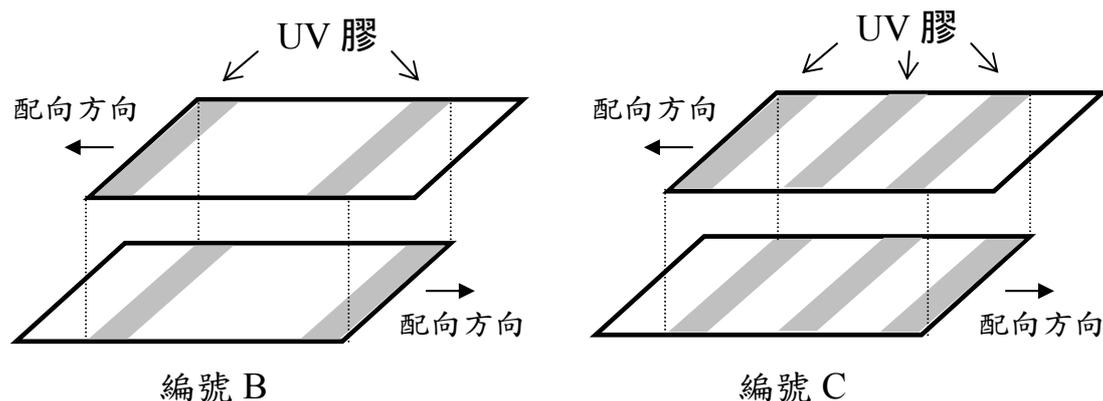


圖 2-2 液晶盒組合示意圖

5. 灌入液晶：

本論文使用 Merck 公司所生產編號為 MJ01744 的液晶，包含未加手徵性分子、加入右旋與左旋等三種不同旋性的液晶，其相關參數列於表 2-2，其中右旋液晶節距為 $32\mu\text{m}$ ，左旋液晶節距為 $-32\mu\text{m}$ 。為了避免因液晶流動而產生的排列，我們將液晶與空液晶盒置於加熱板上，將其加熱至液晶澄清點(clearing point)的溫度，再灌入到液晶盒中，將加熱器關掉，待溫度慢慢降至室溫，以 AB 膠封住灌注孔，即完成實驗所需之液晶盒。

液晶	Clearing Point	n_e	n_o	ϵ	ϵ	K_{11} (pN)	K_{22} (pN)	K_{33} (pN)
MJ01744	80°C	1.5691	1.48	11.3	3.5	10.8	5.5	13.6

表 2-2 液晶相關參數

2.2 預傾角的量測

1. 原理：

採用光學相位極值法(PREM)[4]。考慮水平配向液晶盒，將液晶盒視為單光軸晶體， n_e 為液晶非尋常光折射係數， n_o 為液晶尋常光折射係數，液晶盒預傾角為 α_0 ，雷射光入射液晶盒的入射角為 φ ，且假設液晶盒每一層預傾角皆相同，則入射光的相位延遲可表示為

$$\delta(\varphi) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 \sin \varphi}{n_o^2 \cos^2 \alpha_0 + n_e^2 \sin^2 \alpha_0} + \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \alpha_0 + n_e^2 \sin^2 \alpha_0}} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{n_o^2 \cos^2 \alpha_0 + n_e^2 \sin^2 \alpha_0}} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \varphi} \right] \quad (2-1)$$

當相位極值發生，則 $\frac{\partial \delta(\varphi)}{\partial \varphi} = 0$ 。設此時入射角為 φ_x ，其滿足下式：

$$\frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha_0 \cos \alpha_0 - \frac{n_o}{n_e} \frac{n_e^2 \sin \varphi_x}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \alpha_0 + n_e^2 \sin^2 \alpha_0 - \sin^2 \varphi_x}}}{(n_o^2 \cos^2 \alpha_0 + n_e^2 \sin^2 \alpha_0) \sin \varphi_x} + \frac{1}{\sqrt{n_o^2 - \sin^2 \varphi_x}} = 0 \quad (2-2)$$

(2-2)式與液晶盒厚度並無關係，只要找到最大相位延遲時的入射角角度

φ_x ，代入(2-2)式即可得到預傾角。一般所使用的平行水平配向液晶盒的預傾角皆不大，因此在計算上可以將式(2-2)簡化如下

$$\alpha_0 \stackrel{\alpha_0 \rightarrow 0}{\cong} \sin^{-1} \left(\frac{\sin \varphi_x}{n_e + n_o} \right) \quad (2-3)$$

此外，如(2-2)式所示，預傾角的量測與液晶盒厚度無關，便可將量測到的預傾角代入(2-1)式，再利用液晶盒正射時量測得到的相位延遲計算出液晶

盒的厚度 d 。

2. 實驗裝置：

此量測液晶盒相位延遲的方法採用檢偏片旋轉法[5]，系統架設如下圖 2-3 所示[6]。

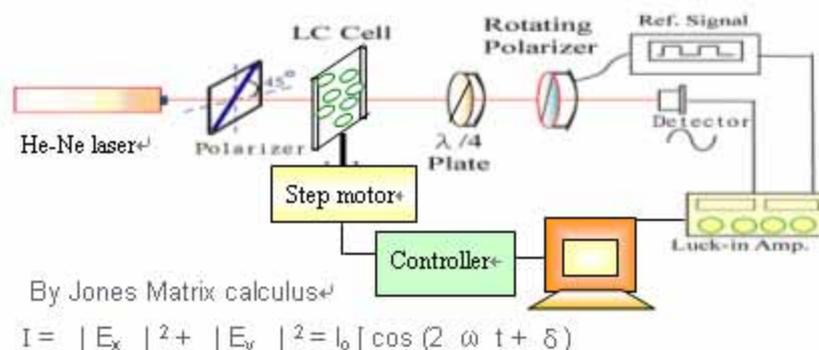


圖 2-3 預傾角量測裝置

首先將平行水平配向液晶盒的液晶分子排列方向置於水平，使正射的入射光電場偏振方向與液晶分子排列方向夾 45 度。如此液晶盒中的 e-ray 與 o-ray 會具有相同的振幅。當線性極化光通過液晶盒後，由於液晶的雙折射效應使得出射光為橢圓極化光，此橢圓極化光再經過慢軸平行或垂直於偏極片極化方向的四分之一波片後，其出射光又再度變成線性極化光。此線極化光與液晶盒的相位延遲有關，在通過旋轉檢偏片後到達光偵測器，經由鎖相放大器可得液晶盒的相位延遲。此處，透過 Jones Matrix Method 計算，我們可以得到到達光偵測器的光強度 I 與液晶盒相位延遲 δ 的關係如下，

ω 為檢偏片轉動的角速度

$$I = |E_x|^2 + |E_y|^2 = I_0 [\sin(2\omega t + \delta) + 1] \quad (2-4)$$

隨著雷射光打在液晶盒的入射角不斷的改變，我們即可得到液晶盒相位延

遲與雷射光入射角度的關係圖，以得到相位極值發生時的入射角 φ_x 之角度，求出預傾角 α_0 。下圖 2-4 為實際測量結果，實驗值會震盪，所以利用 fitting 去找對稱點。

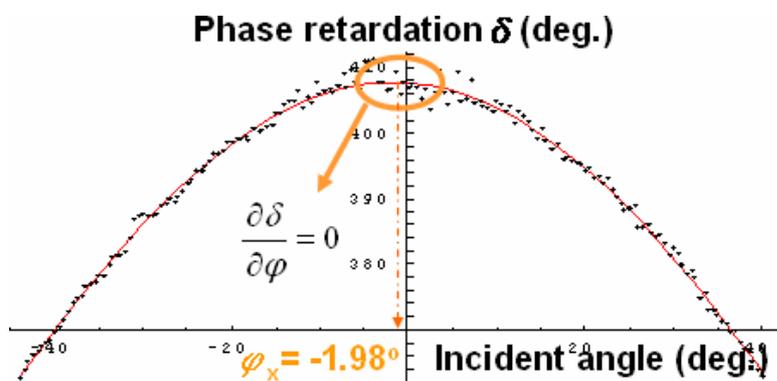


圖 2-4 相位延遲與雷射光入射角度關係圖

3. 實驗結果

除了將所有編號的液晶盒其量測到的預傾角及液晶盒厚度先整理在下表 2-3 中，同時也分別列出各個編號液晶盒所灌入的液晶、配向的方法及所做的量測。

編號	A	B	C	D
液晶	MJ01744			
配向方法	摩擦配向	光配向	光配向	光配向
傾角錨定能係數量測	○	○	／	／
方位角錨定能係數量測	○	／	○	／
熱穩定性	／	／	／	○
預傾角(°)	2.22	0.08	0	0.65
液晶盒厚度(μm)	8.72	10.23	／	8.02

表 2-3 液晶盒預傾角量測結果

○：代表液晶盒有被拿來做實驗。

／：代表液晶盒沒有被拿來做實驗。

第三章 傾角界面自由能

一般在描述液晶盒表面指向矢，都將其視為固定，意即相當靠近表面液晶層的液晶指向並不隨外加電場或磁場的強度而改變，但這個假設和真實狀況有些差異。為了更符合實際情形，便引入了界面自由能。這裡我們將傾角界面自由能獨立出來，忽略方位角界面自由能的影響。

3.1 傾角錨定能理論

我們考慮一液晶盒厚度為 d 的平行水平配向液晶盒如下頁圖 3-1 所示，未加電場時，假設每層液晶的指向矢皆相同且與easy direction重合，此角度我們稱為預傾角 α_0 。當外加一非零電場於 z 軸方向時，每層液晶層的指向矢方向為 z 的函數，那麼液晶盒總自由能就可以表示如下：

$$F = A \int_0^d [(K_{11} \cos^2 \alpha + K_{33} \sin^2 \alpha) \left(\frac{d\alpha}{dz}\right)^2 - \vec{D} \cdot \vec{E}(z)] dz + Af_s \Big|_{z=0} + Af_s \Big|_{z=d} \quad (3-1)$$

此處 A 為基板的表面面積； K_{11} 為斜展(splay)彈性係數； K_{33} 為彎曲(bend)彈性係數； \vec{D} 為電位移； \vec{E} 為電場；傾角 α 是液晶指向矢與 x 軸的夾角。

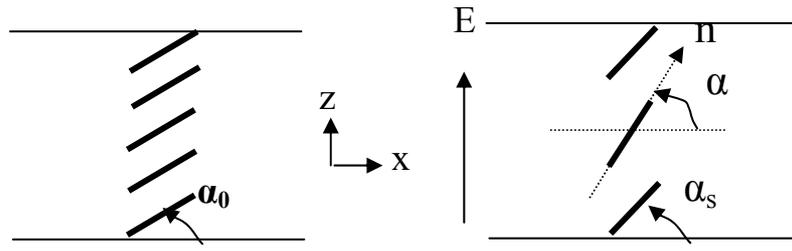


圖 3-1 平行水平配向液晶盒指向矢示意圖

在上下基板配向條件相同的情況下，液晶盒傾角的界面自由能使用 Rapini-Papoular 準則，則可表示如下：

$$f_s|_{z=0} = f_s|_{z=d} = \frac{1}{2} W_\theta \sin^2(\alpha_s - \alpha_0) \quad (3-2)$$

此處 W_θ 為傾角錨定能係數， $\Delta\alpha = (\alpha_s - \alpha_0)$ 為偏離角度。

利用方程式(3-1)與(3-2)，我們可以得到液晶盒的總自由能如下所示：

$$F = A \int_0^d [(K_{11} \cos^2 \alpha + K_{33} \sin^2 \alpha) \left(\frac{d\alpha}{dz}\right)^2 - \vec{D} \cdot \vec{E}(z)] dz + A W_\theta \sin^2(\alpha_s - \alpha_0) \quad (3-3)$$

根據 Euler-Lagrange Equation：

液晶層內指向矢變化將滿足下列方程式

$$\frac{d^2 \alpha}{dz^2} = \frac{\sin(2\alpha)}{2(K_{11} \cos^2 \alpha + K_{33} \sin^2 \alpha)} \times [(K_{11} - K_{33}) \left(\frac{d\alpha}{dz}\right)^2 - \varepsilon_0 \Delta \varepsilon E_z^2] \quad (3-4)$$

其中， ε 與 ε 分別是平行與垂直液晶指向矢的介電常數；

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon \quad ;$$

$$\text{外加電壓與電位移的關係為 } V = \int_0^d E_z dz = \frac{D_z}{\epsilon_0} \int_0^d \frac{1}{\epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon \sin^2 \alpha} dz \quad (3-5)$$

且在界面 $z=0$ 與 $z=d$ 的液晶分子力矩平衡方程式為

$$\left. \frac{d\alpha}{dz} \right|_{z=0} = \frac{W_{\theta} \sin[2(\alpha_s - \alpha_0)]}{2(K_{11} \cos^2 \alpha_s + K_{33} \sin^2 \alpha_s)} \quad (3-6)$$

$$\left. \frac{d\alpha}{dz} \right|_{z=d} = \frac{-W_{\theta} \sin[2(\alpha_s - \alpha_0)]}{2(K_{11} \cos^2 \alpha_s + K_{33} \sin^2 \alpha_s)} \quad (3-7)$$

由方程式(3-4)、(3-5)、(3-6)和(3-7)式可以得到不同電位移下液晶指向矢的分佈。有了指向矢分佈便可以計算出不同電壓下所對應的液晶盒光學相位延遲。利用商用模擬軟體DIMOS(所使用的界面自由能公式若不考慮方位角

界面自由能，則簡化為 $f_s = \frac{1}{2} W_{\theta} \sin^2(\alpha_s - \alpha_0)$ ，我們將量測出來的預傾角與液晶層厚度代入，改變不同傾角錨定能係數 W_{θ} 去模擬相位延遲與電壓關係曲線且與實驗比對，理論上可以得到傾角錨定能係數。下圖 3-2 是實驗與模擬

比較的局部放大結果，使用編號B的液晶盒，液晶參數列於第二章。

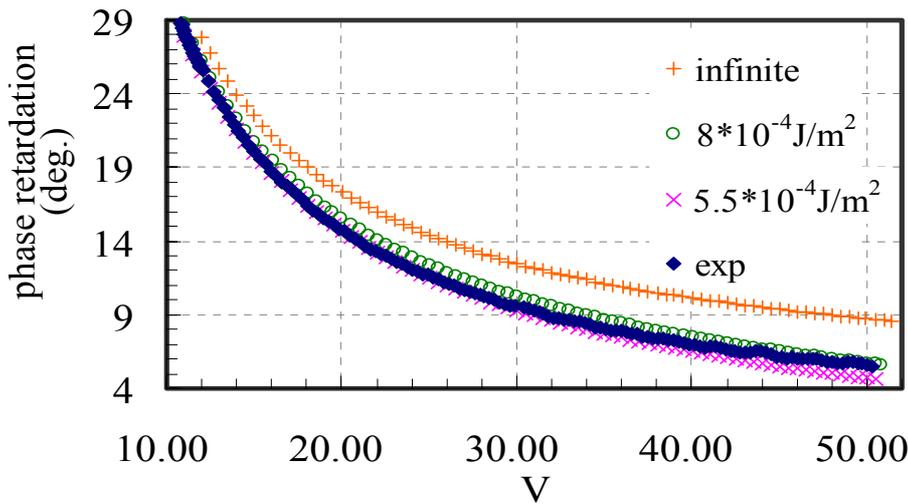


圖 3-2 編號 B 的液晶盒其實驗與 DIMOS 模擬的相位延遲對電壓的關係圖

從圖 3-2 中，我們可以發現，在外加電壓為 10~25V 時，實驗結果與傾角錨定能係數為 $5.5 \times 10^{-4} \text{J/m}^2$ 的模擬結果相當吻合，但隨著電壓上升時，差距愈來愈遠，至 50V 時，相位延遲已有 1 度的差別，因此，我們可得知在高電壓下邊界液晶指向矢偏離角度變較大時，RP 準則已不能完全適用，所以必需對 RP 準則做修正。

將 RP 準則做一個修正，加入四次項，修正過後的表面自由能表示如下式[7]， ζ 是修正係數：

$$f_s|_{z=0} = f_s|_{z=d} = \frac{1}{2} W_\theta \sin^2(\alpha_s - \alpha_0) [1 + \zeta \sin^2(\alpha_s - \alpha_0)] \quad (3-8)$$

在界面 $z=0$ 與 $z=d$ 的液晶分子力矩平衡方程式則修改為

$$\frac{d\alpha}{dz} \Big|_{z=0} = \frac{W_\theta \sin[2(\alpha_s - \alpha_0)](1 + 2\zeta \sin^2(\alpha_s - \alpha_0))}{2(K_{11} \cos^2 \alpha_s + K_{33} \sin^2 \alpha_s)} \quad (3-9)$$

$$\frac{d\alpha}{dz} \Big|_{z=d} = \frac{-W_\theta \sin[2(\alpha_s - \alpha_0)](1 + 2\zeta \sin^2(\alpha_s - \alpha_0))}{2(K_{11} \cos^2 \alpha_s + K_{33} \sin^2 \alpha_s)} \quad (3-10)$$

在下面 3.2 節中，我們將介紹傾角錨定能係數(包含修正係數 ζ)的量測原理。

3.2 傾角錨定能係數量測原理

我們提出一個方法，利用DIMOS模擬軟體模擬出相位延遲與電壓的關係與實驗結果做比較，可以求得傾角錨定能係數 W_θ 及修正係數 ζ 的值。(註：下圖 3-3 是相位延遲對電壓的實驗裝置圖，實驗裝置大約與預傾角量測裝置相同，只是將旋轉液晶盒的步進馬達置換為波形產生器，相位延遲量測原理也不變。因此，相位延遲對電壓的關係可由此裝置量測出。)

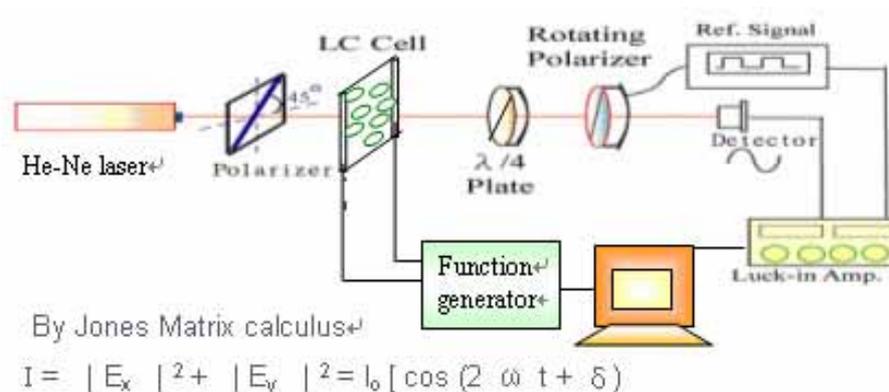


圖 3-3 相位延遲對電壓的量測裝置

以編號B的水平排列液晶盒為例，說明傾角錨定能係數的量測原理。首先以圖 3-3 的實驗裝置量測相位延遲與電壓的關係，再測量液晶盒的預傾角及液晶盒厚度(量測方法於第二章已介紹過)，將液晶盒的預傾角及厚度代入模擬軟體DIMOS，改變傾角錨定能係數 W_θ 以得到不同錨定能係數的相位延遲對電壓的關係(其中用於DIMOS的液晶參數列於第二章表 2-2 及表 2-3 中)，實驗結果與模擬曲線圖如下圖 3-4，圖 3-4 是小電壓的局部放大圖。

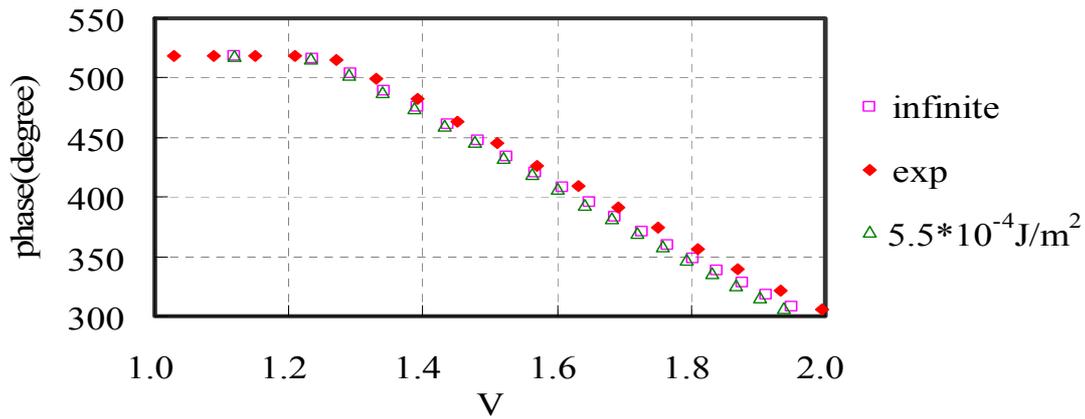


圖 3-4 液晶盒 B 相位延遲與電壓關係的局部放大圖

我們知道從DIMOS算出的任何傾角錨定能係數的 δ -V 曲線都應位於 infinite 的下方，但從圖 3-4 卻發現實驗的曲線比 infinite 高，這是不符合常理的，我們假設是 K_{11} 、 K_{33} 等參數的誤差，於是將 K_{11} 從 10.8pN 調整成 11.54pN， K_{33} 從 13.6pN 調整成 14.28pN 再做模擬以分析求得傾角錨定能係數的值。下圖 3-5 是調過參數後的實驗結果與模擬比對的相位延遲對電壓關係小電壓的局部放大圖，我們可以觀察到實驗曲線已經位於傾角錨定能強度無窮大以下，較合常理。以下，我們將採用調整過後的參數做模擬。

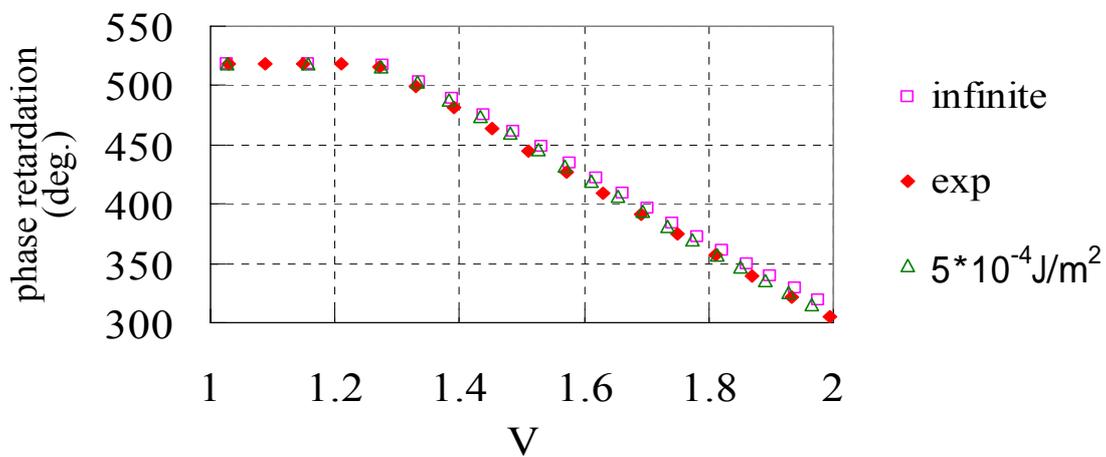


圖 3-5 液晶盒 B 調參數後相位延遲與電壓關係的局部放大圖

利用上述調整過的參數，模擬不同的傾角錨定能係數以找尋與實驗結果吻合的傾角錨定能係數 W_θ 。如下圖 3-6 所示，當電壓從 10V 加到 22V，實驗曲線與 $W_\theta=5*10^{-4}J/m^2$ 吻合，即當偏離角度不大時，我們便決定了修改過後的RP準則其二次方項($\sin^2\Delta\alpha$)錨定能係數。這裡必需注意的是，尋找此係數需在小電壓(偏離角度很小)下尋找，但由於在小電壓時，不同錨定能係數的相位延遲與電壓曲線非常靠近，不易判斷，於是選擇在高一點的電壓且偏離角度仍不是很大時去決定 W_θ ， $\Delta\alpha(10.5V)=5.513^\circ$ 。

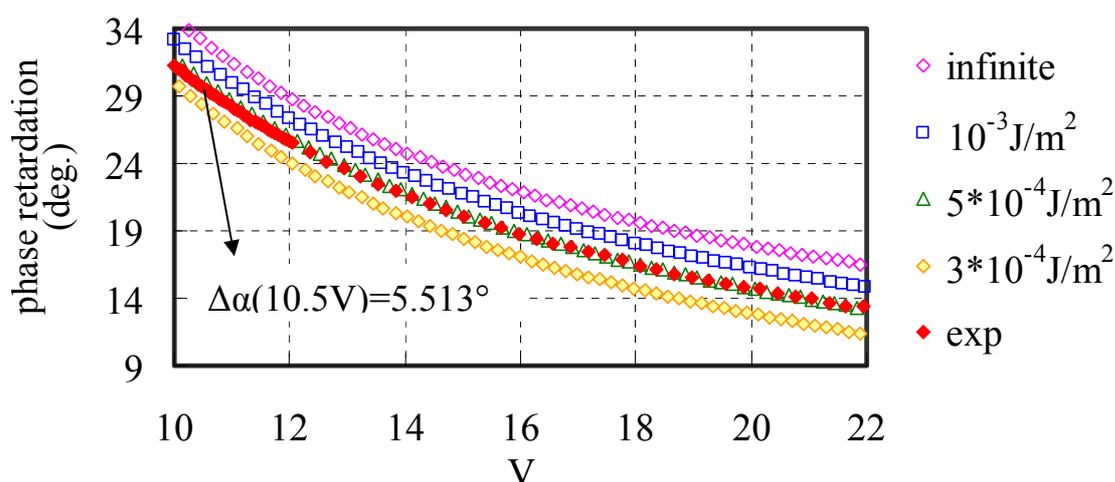


圖 3-6 模擬不同傾角錨定能係數 W_θ 的相位延遲與電壓關係圖

如果電壓持續上升，實驗曲線會開始與更高的錨定能係數相交(如下圖 3-7 所示)，於是傾角界面自由能四次項的影響顯現。但實驗曲線有些許的震盪，於是我們對實驗值做曲線 fitting 來代替實驗的數值，以減少誤差，以下所有的交點皆是 fitting 曲線與模擬曲線之交點。

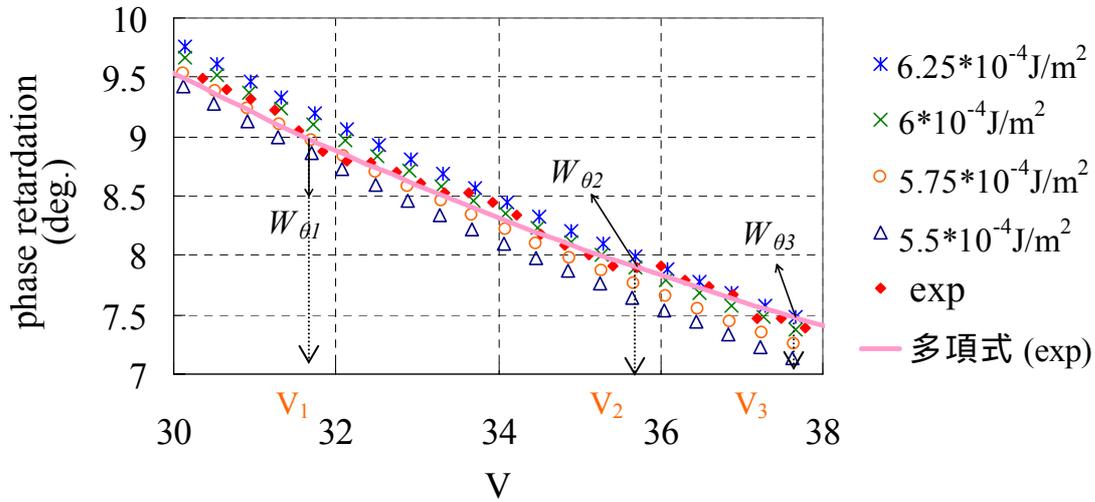


圖 3-7 模擬不同傾角錨定能係數 W_{θ} 在高電壓下的
相位延遲與電壓關係圖

由於液晶指向矢分佈會決定液晶盒的相位延遲，所以這裡我們假設在電壓 V_m 時($m=1,2,3,\dots$ 即exp曲線與模擬曲線相交時所對應的電壓)，真實液晶盒邊界的偏離角度 $\Delta\alpha$ 最接近於實驗擬合(fitting)曲線與模擬曲線交點 $W_{\theta m}$ 所算出的偏離角度 $\Delta\alpha_m$ (是 $W_{\theta m}$ 與 V_m 的函數)，且假設此時傾角界面的自由能 f_{exp} 也等於交點的傾角界面自由能 f_m (利用簡單RP準則算出)，可表示如下：

$$\begin{aligned}
 f_{s\ exp} &= \frac{1}{2} W_{\theta} \sin^2[\Delta\alpha_m(W_{\theta m}, V_m)][1 + \zeta \sin^2[\Delta\alpha_m(W_{\theta m}, V_m)]] \\
 &= \frac{1}{2} W_{\theta m} \sin^2[\Delta\alpha_m(W_{\theta m}, V_m)] = f_{sm}
 \end{aligned} \tag{3-11}$$

定義傾角界面自由能 f_{sRP} 如下所示：

$$f_{sRP} = \frac{1}{2} W_{\theta} \sin^2[\Delta\alpha_m(W_{\theta m}, V_m)] \tag{3-12}$$

由(3-11)與(3-12)式，我們可以得到修正項的係數 ζ 的關係式：

$$\zeta = \frac{f_{sm} - f_{sRP}}{f_{sRP} \sin^2[\Delta\alpha_m(W_{\theta m}, V_m)]} \quad (3-13)$$

不同的交點會得到不同的 ζ 值，利用數學軟體非線性擬合的指令去 fit (3-11) 式可以得到一最合適的 ζ 值。

因此，我們不僅得到傾角錨定能係數 W_{θ} 的值，也約略估計出修正項 $(\sin^4\Delta\alpha)$ 的係數 ζ 值。



3.3 傾角錨定能係數量測結果

3.3.1 實驗結果

使用編號A及B的液晶盒，參數列於第二章內，但 K_{11} 調整成 11.54pN， K_{33} 調整成 14.28pN。利用上述方法，我們決定液晶盒A的傾角錨定能係數 $W_{\theta}=6.5*10^{-4}\text{J/m}^2$ ，液晶盒B的傾角錨定能係數 $W_{\theta}=5*10^{-4}\text{J/m}^2$ ，下表 3-1 與 3-2 分別列出液晶盒A及液晶盒B與模擬曲線所有交點的 V_m 、 f_{sRP} 、 $W_{\theta m}$ 、 $\Delta\alpha_m$ 及 f_{sm} 的實驗結果。

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V_m(\text{V})$	28.15	31.54	33.02	34.21	35.99	36.88	38.06	39.85	41.62	44.83
$f_{sRP}(10^{-5}\text{J/m}^2)$	2.00	2.50	2.69	2.83	3.08	3.16	3.31	3.57	3.83	4.39
$W_{\theta m}(10^{-4}\text{J/m}^2)$	6.6	6.7	6.8	6.9	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5
$\Delta\alpha_m(^{\circ})$	14.37	16.09	16.71	17.15	17.94	18.18	18.61	19.35	20.08	21.57
$f_{sm}(10^{-5}\text{J/m}^2)$	2.03	2.57	2.81	3.00	3.32	3.46	3.67	4.01	4.36	5.07

表 3-1 液晶盒 A 與模擬曲線交點相關數據

m	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_m(\text{V})$	22.84	27.58	31.84	35.71	37.78	41.02	43.37	47.17
$f_{sRP}(10^{-5}\text{J/m}^2)$	1.15	1.60	2.03	2.43	2.56	2.87	3.04	3.45
$W_{\theta m}(10^{-4}\text{J/m}^2)$	5.25	5.5	5.75	6.0	6.25	6.5	6.75	7.0
$\Delta\alpha_m(^{\circ})$	12.37	14.65	16.55	18.16	18.66	19.81	20.41	21.82
$f_{sm}(10^{-5}\text{J/m}^2)$	1.20	1.76	2.33	2.91	3.20	3.73	4.10	4.84

表 3-2 液晶盒 B 與模擬曲線交點相關數據

利用表 3-1 與表 3-2 我們求出液晶盒 A 與液晶盒 B 最佳的 ζ 值分別為 1.01 與 2.65。所以液晶盒 A 修正過後的傾角界面自由能關係式如下(3-14)式，液晶盒 B 如下(3-15)式。

$$f_{sMRP} = \frac{1}{2} \times 6.5 \times 10^{-4} \times \sin^2[\Delta\alpha] \times (1 + 1.01 \sin^2[\Delta\alpha]) \quad (3-14)$$

$$f_{sMRP} = \frac{1}{2} \times 5 \times 10^{-4} \times \sin^2[\Delta\alpha] \times (1 + 2.65 \sin^2[\Delta\alpha]) \quad (3-15)$$

將(3-14)式與(3-15)式分別與RP準則比較，並將實驗得到的傾角界面自由能 f_{sexp} 畫於下圖 3-8 與圖 3-9 中。因修正過後的 ζ 值為正的，所以當偏離角度愈大時，液晶盒傾角界面自由能會比RP理論所描述的還要大，也就是邊界的液晶指向矢愈來愈難拉動，此現象與實驗結果列於表 3-1 與表 3-2(往較高 W_θ 模擬曲線相交)相符合。

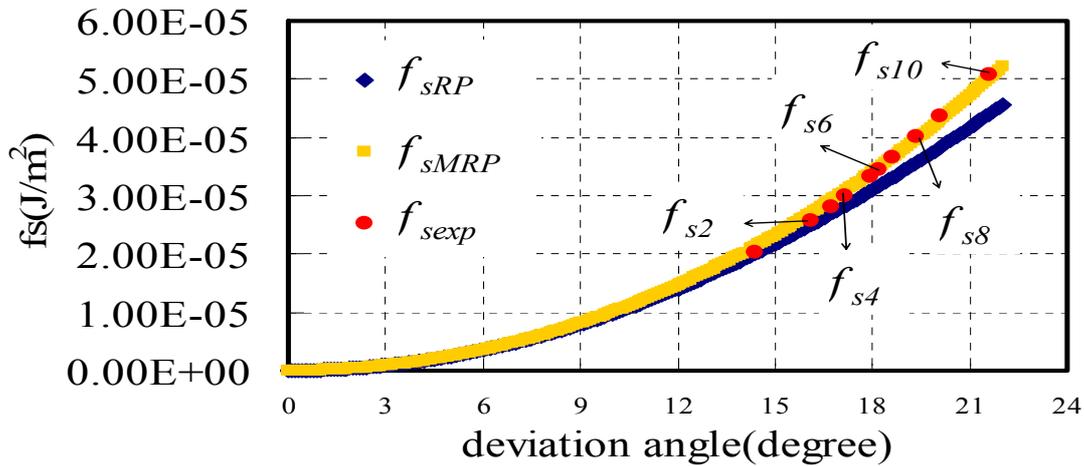


圖 3-8 液晶盒 A 傾角界面自由能與偏離角度關係圖

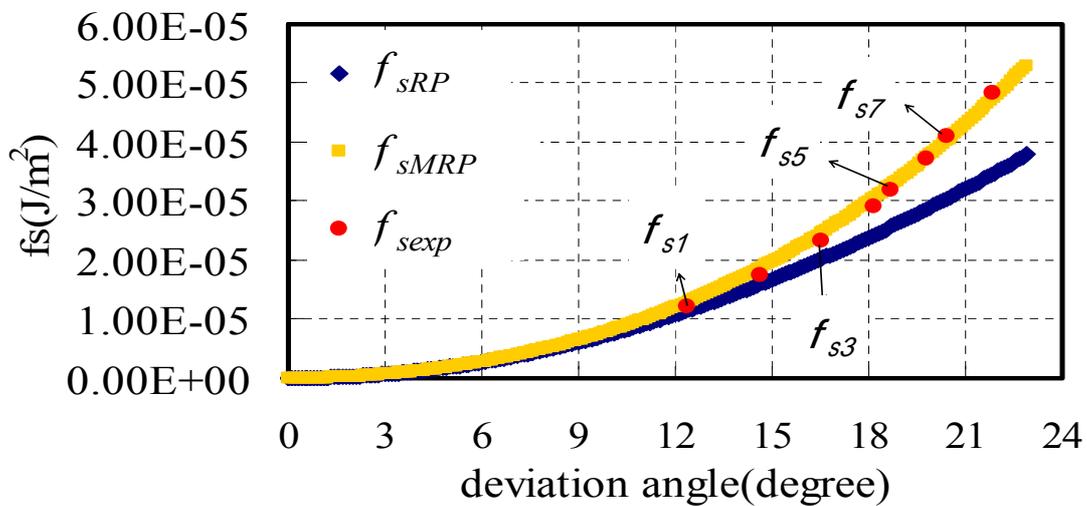


圖 3-9 液晶盒 B 傾角界面自由能與偏離角度關係圖

3.3.2 討論

由於在上述量測 W_θ 與 ζ 值時，對液晶MJ01744 的參數 K_{11} 與 K_{33} 做了調整。為了確認調整參數是否會影響 W_θ 與 ζ 值的量測，利用 3.2 節的量測方法，我們分別模擬未調整參數液晶盒A與B的 δ -V曲線圖並與實驗比較得 W_θ 與 ζ 值如下表 3-3：

	液晶盒 A		液晶盒 B	
(K_{11}, K_{33})	(10.8,13.6)	(11.54,14.28)	(10.8,13.6)	(11.54,14.28)
$W_\theta (10^{-4} \text{J/m}^2)$	7.0	6.5	5.5	5.0
ζ	0.74	1.01	2.18	2.65

表 3-3 不同 K_{11} 及 K_{33} 下液晶盒A與B傾角錨定能係數 W_θ 與 ζ 值的量測

從表 3-3 中可以看出調整 K_{11} 與 K_{33} 確實會影響 W_θ 與 ζ 值的決定，但卻不會影響 ζ 值的正負。因此，得到一個結論：隨著電壓上升，真實傾角界面自由能會比RP準則計算的值大，表示液晶盒邊界的液晶指向矢所拉開的偏離角度 $\Delta\alpha$ 比RP準則模擬計算的小。

另外，我們所提出的方法是在一些特定假設下，所以有其誤差存在，因此要確認 ζ 值的正負號就遠比 ζ 值精確的求得更重要。我們利用寫好程式 FlexPDE將邊界條件修改成(3-9)及(3-10)式，解偏微分方程，分別將 ζ 值為 1.01、0 及 -1.01 代入，求液晶指向矢分佈後計算出相位延遲與電壓的關係圖，使用液晶盒A($K_{11}=11.54$ 、 $K_{33}=14.28$)的參數，如下圖 3-10 所示：

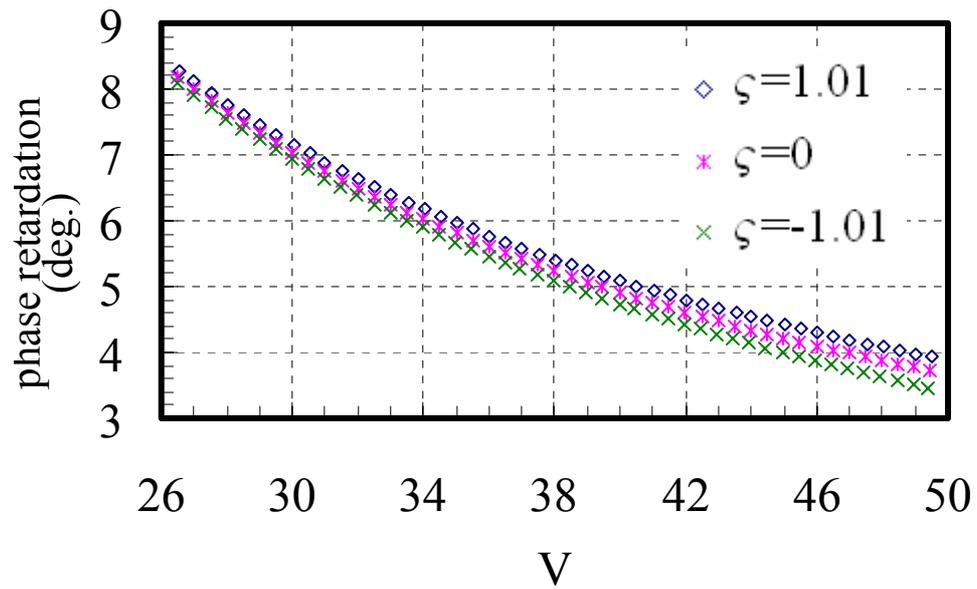


圖 3-10 高電壓下不同 ζ 值相位延遲與電壓的關係圖

從圖 3-10，我們可以確定，當 ζ 值為 1.01 時， δ -V 的曲線位於 ζ 值為零的上方，表示同一電壓下， ζ 為正的相位延遲確實比 ζ 為零(RP 準則)的值大，也與我們的實驗結果相符合。

第四章 方位角界面自由能

4.1 方位角錨定能理論

根據 elastic continuum theory 我們可得知，液晶盒的自由能為 bulk 與界面自由能的總合，即

$$F = A \int_0^d f_b dz + Af_s(0) + Af_s(d) \quad (4-1)$$

A 為基板的表面面積；d 為液晶盒厚度； f_b 為 bulk 彈性能密度； $f_s(0)$ 為液晶盒上層的單位面積界面自由能； $f_s(d)$ 為液晶盒下層的單位面積界面自由能。

使用 RP 準則，且不考慮傾角界面自由能，則液晶盒的界面自由能可表示如下：

$$f_s = \frac{1}{2} W_\phi \sin^2(\phi - \phi_E) \quad (4-2)$$

W_ϕ ：方位角錨定能係數；

ϕ ：表面液晶指向的方位角；

ϕ_E ：液晶不受外力表面自然排列其 easy direction 的方位角；

當表面錨定能不強時，液晶指向矢會偏離 easy direction 的方向排列，與液晶 easy direction 偏離一角度。訂定下基板的 easy direction 方向在 x 軸，上下基板的 easy direction 夾角為 ϕ_e ，上下基板液晶真正指向矢的方向為 ϕ_1 與 ϕ_2 ，因此下基板的偏離角度為 ϕ_1 ，上基板的偏離角度為 $(\phi_e - \phi_2)$ ，則總自由能可表示為：

$$F = \frac{1}{2} A \int_0^d K_{22} \left(\frac{d\phi(z)}{dz} \right)^2 dz + \frac{1}{2} A W_{\phi,1} \sin^2 \phi_1 + \frac{1}{2} A W_{\phi,2} \sin^2(\phi_e - \phi_2) \quad (4-3)$$

以 Φ_t 為液晶盒上下表面液晶指向的實際扭轉角度，即

$$\Phi_t = \phi_2 - \phi_1。$$

當達平衡時，總自由能為最低，且均勻扭轉形變發生時，其界面所須符合的條件為

$$K_{22} \frac{\Phi_t}{d} - W_{\phi,1} \sin \phi_1 \cos \phi_1 = 0 \quad (4-4)$$

$$K_{22} \frac{\Phi_t}{d} - W_{\phi,2} \sin(\phi_e - \phi_2) \cos(\phi_e - \phi_2) = 0 \quad (4-5)$$

由上面(4-4)與(4-5)式經過推導可知上下基板方位角錨定能關係如下：

$$\phi_e - \Phi_t = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{2K_{22}\Phi_t}{W_{\phi,2}d} \right) + \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{2K_{22}\Phi_t}{W_{\phi,1}d} \right) \quad (4-6)$$

對於上下基板表面經過相同配向處理而有相等方位角錨定能係數 ($W_{\phi,1} = W_{\phi,2} = W_{\phi}$) 的液晶盒，稱其為對稱型液晶盒，由上式可得知其上下基板的方位角錨定能可表示為

$$W_{\phi} = \frac{2K_{22}\Phi_t}{d \sin(\phi_e - \Phi_t)} \quad (4-7)$$

4.2 方位角錨定能係數量測原理

一般量測方位角錨定能係數的方法可以分為加外場與不加外場兩種，然而不加外場的量測法主要是利用液晶本身扭轉彈性與界面自由能平衡下的扭轉形變程度來推算方位角錨定能係數，量測過程與數據處理工作較簡單，因此常用於方位角錨定能係數的量測。

在不加外場的量測方法文獻中，旋轉偏光片法不需知道入射面的液晶指向矢，也不用要求液晶盒放特殊位置，在操作上較為簡易。綜合連水池博士提出利用 double cell [8]量測方位角錨定能係數的概念與旋轉偏光片法 [9]，以下我們將說明此種改進旋轉偏光片法[10]的量測原理。



4.2.1 原理

當灌入液晶盒的液晶混合旋性材料時，一個上下基板表面經過相同配向處理而有相同錨定能的扭轉液晶盒，其方位角錨定能可表示為

$$W_{\phi} = \frac{2K_{22}}{\sin(\Phi_t - \phi_e)} \left(\frac{2\pi}{p} - \frac{\Phi_t}{d} \right) \quad (4-8)$$

其中 $\frac{\Phi_t - \phi_e}{2}$ 為偏離角度。

為了求得上下基板 easy axis 的夾角 ϕ_e ，我們使用 double cell 的方法 [8]，將液晶盒分成左右兩個區間，分別灌入不同 pitch 的液晶，使得這兩區間具有相同的 ϕ_e 及相同的錨定能係數 W_{ϕ} ，則可得

$$W_\phi = \frac{2K_{22}}{\sin(\Phi_{t1} - \phi_e)} \left(\frac{2\pi}{p_1} - \frac{\Phi_{t1}}{d_1} \right) = \frac{2K_{22}}{\sin(\Phi_{t2} - \phi_e)} \left(\frac{2\pi}{p_2} - \frac{\Phi_{t2}}{d_2} \right) = W_\phi \quad (4-9)$$

其中 K_{22} 為已知， p_1, p_2 為實驗量測得到，若實驗可求得 Φ_{t1} 、 Φ_{t2} 、 d_1 及 d_2 ，代入上式可算出 ϕ_e ，進而得知 W_ϕ 。以下介紹 Φ_t, d 的量測原理。

我們採用 improved 的旋轉偏光片法[10]來量測液晶盒的扭轉角度與厚度，下圖 4-1 為實驗裝置圖，經由轉動檢偏片及液晶盒的方法尋求穿透率極小值發生時，偏光片、檢偏片及液晶盒的位置關係，藉由解聯立方程式得知扭轉角度與厚度。

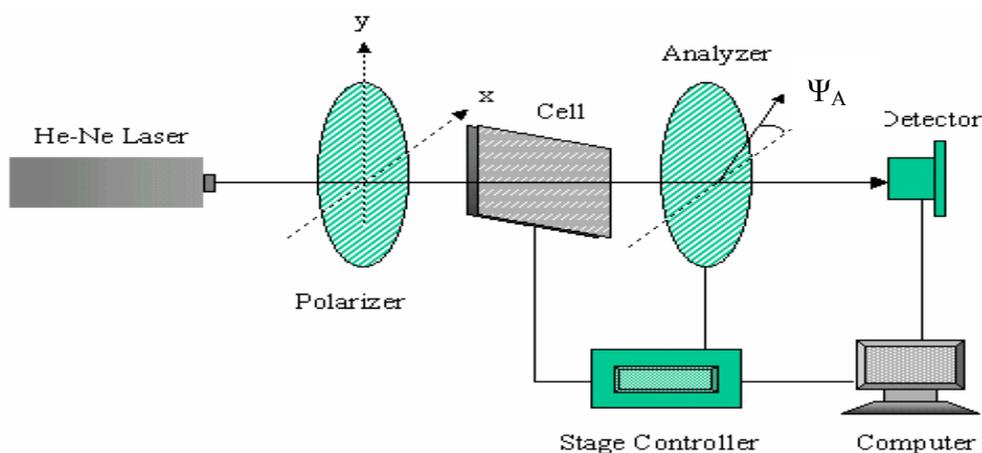


圖 4-1 液晶盒扭轉角度與厚度量測裝置圖

如圖 4-2 所示，以入射面液晶指向矢為 x 軸， Ψ_{ent} 為偏光片穿透軸與入射面液晶指向矢的夾角， Ψ_{exit} 為檢偏片穿透軸與入射面液晶指向矢的夾角， Φ_t 為出射面液晶指向矢與入射面液晶指向矢的夾角也就是液晶扭轉角度。

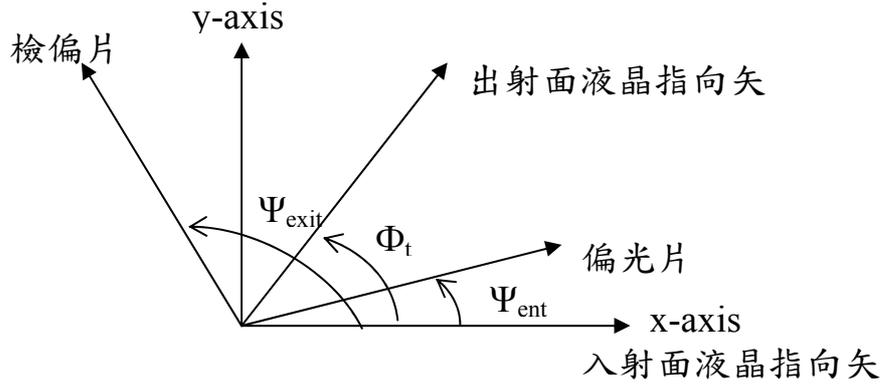


圖 4-2 偏光片與液晶盒的對應關係圖

由 Jones Matrix calculus 可得知一個只有扭轉形變的液晶盒放置於偏光片與檢偏片之間時，垂直入射光的穿透率可表示如下[11]：

$$T = |V'^* \cdot MV|^2 = \left\{ \cos X \cos(\Phi_t - \Psi_{exit} + \Psi_{ent}) + \Phi_t \frac{\sin X}{X} \sin(\Phi_t - \Psi_{exit} + \Psi_{ent}) \right\}^2 + \left\{ \frac{\Gamma \sin X}{2X} \cos(\Phi_t - \Psi_{exit} - \Psi_{ent}) \right\}^2 \quad (4-10)$$

$$\text{其中} \left\{ \begin{array}{l} V = \begin{pmatrix} \cos \Psi_{ent} \\ \sin \Psi_{ent} \end{pmatrix} \\ M = \begin{pmatrix} \cos \Phi_t & -\sin \Phi_t \\ \sin \Phi_t & \cos \Phi_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos X - i \frac{\Gamma \sin X}{2X} & \Phi_t \frac{\sin X}{X} \\ -\Phi_t \frac{\sin X}{X} & \cos X + i \frac{\Gamma \sin X}{2X} \end{pmatrix} \\ V' = (\cos \Psi_{exit} \quad \sin \Psi_{exit}) \\ X = \sqrt{\Phi_t^2 + \left(\frac{\Gamma}{2}\right)^2} \\ \Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{eff} - n_o) d \\ n_{eff} = \frac{n_e}{\sqrt{\left(\left(\frac{n_e}{n_o}\right)^2 - 1\right) \times \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_0\right) + 1}} \end{array} \right. \quad (4-11)$$

在(4-11)式中，d為液晶盒厚度， $n_e(n_o)$ 為非尋常光(尋常光)的折射係數， Γ 為相位延遲， α_0 為液晶盒的預傾角(第二章預傾角的量測)。

利用座標轉換，如下圖 4-3 所示，以偏光片為x軸， Ψ_0 為入射面液晶指向矢與偏光片穿透軸的夾角， Ψ_A 為檢偏片穿透軸與偏光片穿透軸的夾角，則 $\Psi_A = \Psi_{\text{exit}} - \Psi_{\text{ent}}$ ， $\Psi_0 = -\Psi_{\text{ent}}$ ，

因此，垂直入射光的穿透率(4-11)式可表示如下：

$$T = \left\{ \cos X \cos(\Phi_t - \Psi_A) + \Phi_t \frac{\sin X}{X} \sin(\Phi_t - \Psi_A) \right\}^2 + \left\{ \frac{\Gamma \sin X}{2X} \cos(\Phi_t + 2\Psi_0 - \Psi_A) \right\}^2 \quad (4-12)$$

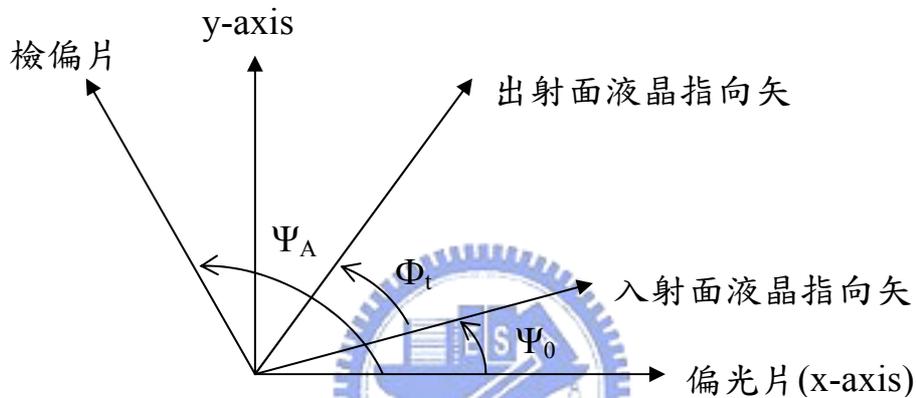


圖 4-3 偏光片與液晶盒對應位置示意圖

利用(4-12)式找尋穿透率極值以求得扭轉角度及厚度的三步驟如下：

步驟一：

在正交偏光片即 $\Psi_A = 90^\circ$ 下，(4-12)式又可化簡為

$$T = \left[\Phi_t \frac{\sin X}{X} \cos \Phi_t - \cos X \sin \Phi_t \right]^2 + \left[\frac{\Gamma \sin X}{2X} \sin(\Phi_t + 2\Psi_0) \right]^2 \quad (4-13)$$

當旋轉液晶盒即改變 Ψ_0 時，只有第二項有 Ψ_0 ，所以穿透率極小值發生時會

滿足此方程式 $2\Psi_{01} + \Phi_t = n\pi$ ，其中 n 為整數，也就是

$$\Psi_{01} = \frac{1}{2}(n\pi - \Phi_t) \quad (4-14)$$

因此，我們得到第一個方程式。

步驟二：

因(4-12)式又可表示為：

$$T = \frac{1}{2} + T_c \cos(2\Psi_A) + T_s \sin(2\Psi_A) = \frac{1}{2} + T_a \cos(2\Psi_A - \beta) \quad (4-15)$$

其中

$$T_c = \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Phi_t}{X} \right)^2 \sin^2 X + \frac{1}{2} \cos^2 X \right] \cos(2\Phi_t) + \frac{1}{2} \frac{\Phi_t}{X} \sin(2X) \sin(2\Phi_t) \\ + \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\Phi_t}{X} \right)^2 \right] \sin^2 X \cos(2\Phi_t + 4\Psi_0) \quad (4-16)$$

$$T_s = \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Phi_t}{X} \right)^2 \sin^2 X + \frac{1}{2} \cos^2 X \right] \sin(2\Phi_t) - \frac{1}{2} \frac{\Phi_t}{X} \sin(2X) \cos(2\Phi_t) \\ + \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{\Phi_t}{X} \right)^2 \right] \sin^2 X \sin(2\Phi_t + 4\Psi_0) \quad (4-17)$$

$$T_a = \sqrt{T_c^2 + T_s^2} \text{ 以及 } \tan \beta = \frac{T_s}{T_c} \quad (4-18)$$

因此，當液晶盒的位置固定在 Ψ_{01} 時，旋轉檢偏片改變 Ψ_A ，可由(4-15)式知垂直入射光穿透率極小值為 $T_{\min} = \frac{1}{2} - T_a$ ，此時偏光片與檢偏片的夾角 Ψ_{A1} 需

符合

$$\Psi_{A1} = \frac{\beta_1(\Phi_t, d, \Psi_{01}, \alpha_0) + \pi}{2} \quad (4-19)$$

我們得到第二個方程式。

步驟三：

將液晶盒從 Ψ_{01} 的位置旋轉一個角度 $\Delta\Psi_0$ ，再旋轉檢偏片，同樣可得到垂直入射光穿透率極小值為 $T_{\min} = \frac{1}{2} - T_a$ ，此時偏光片與檢偏片的夾角 Ψ_{A2} 需符合

$$\Psi_{A2} = \frac{\beta_2(\Phi_t, d, \Psi_{01}, \alpha_0, \Delta\Psi_0) + \pi}{2} \quad (4-20)$$

我們得到第三個方程式。

因為 Ψ_{A1} 、 Ψ_{A2} 由實驗過程中可得， $\Delta\Psi_0$ 為已知， α_0 可由第二章預傾角量測得知，利用解(4-14)、(4-19)及(4-20)式我們可以求得液晶盒的扭轉角度 Φ_t 及液晶盒厚度 d 。

因此，將量測到 double cell 的 Φ_{t1} 、 Φ_{t2} 、 d_1 、 d_2 代入(4-9)式，則可求出 ϕ_e ，進而得知 W_ϕ 。



4.2.2 討論

當穿透率極小值發生時，液晶盒、偏光片及檢偏片相對位置會有特定關係如上節所述，improved 旋轉偏光片法便是利用此特定關係解聯立方程式以求液晶扭轉角及液晶盒厚度。但是，並不是所有的液晶盒都可以精確求值，我們觀察(4-12)式穿透率公式，並分為兩種特殊情形來討論。

(A) $\sin X = 0$ 或 $\sin X \approx 0$

當 $\sin X = 0$ 時即 $X = n\pi$ (n 為整數)，此時穿透率(4-12)式可表示為

$$T = \cos^2(\Phi_t - \Psi_A) \quad (4-21)$$

從(4-21)式可以得知此時穿透率變化只與檢偏片的位置有關，故不論怎麼旋轉液晶盒，其穿透率都不會發生變化。因此，利用旋轉檢偏片，可以得到穿透率極小值發生的條件為

$$\Phi_t = \Psi_{A1} + (n + \frac{1}{2})\pi, \quad n \text{ 為整數} \quad (4-22)$$

藉由轉動偏光片可以找到穿透率極小值發生時的 Ψ_{A1} ，代入(4-22)式便可以求得液晶扭轉角度 Φ_t ，再將 Φ_t 代入(4-11)式中的 X ，此時 $X = n\pi$ ，若已知 spacer 厚度便可估計 n 值，即可求得液晶盒厚度 d 。

但我們要注意的是，真實的情況下， $\sin X = 0$ 極少發生，常常發生的是 $\sin X \approx 0$ ，其入射光穿透率與液晶盒位置 Ψ_0 以及兩偏光片夾角 Ψ_A 之光學關係如下圖 4-4 所示

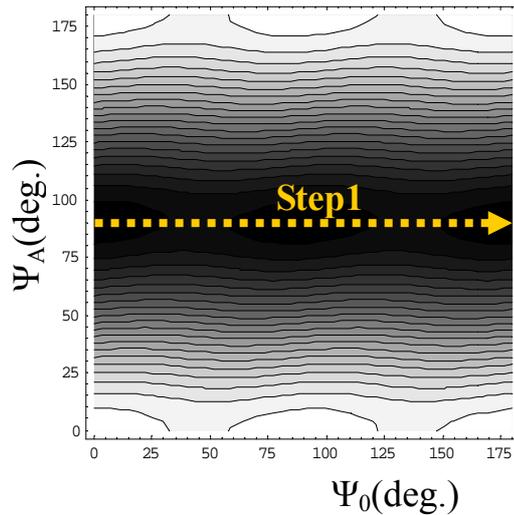


圖 4-4 入射光穿透率與液晶盒位置及偏光片夾角關係圖($\sin X \approx 0$)

由圖 4-4 我們可以發現，第一步驟固定檢偏片旋轉液晶盒時，穿透率的變化並不大，因此不易量測穿透率極小值精確的 Ψ_{01} 值，造成實驗誤差變大。



(B)、 $\cos X = 0$ 且 $\Phi_t = 0$ 或 $\cos X \approx 0$ 且 $\Phi_t \approx 0$

當 $\cos X = 0$ 即 $X = \frac{n}{2}\pi$ (n 為整數) 且 $\Phi_t = 0$ 時，將 $\Phi_t = 0$ 代入(4-11)式中的 X ，

若已知 spacer 的厚度便可估計 n 值，同樣也可以求得液晶盒厚度 d 。

但要注意的是，真實的情況下， $\cos X = 0$ 且 $\Phi_t = 0$ 極少發生，且我們也無法在量測前判斷 Φ_t 是否為零，反倒是常常發生的情況為 $\cos X \approx 0$ 且 $\Phi_t \approx 0$ 。在這個情形下，入射光穿透率與液晶盒位置 Ψ_0 以及兩偏光片夾角 Ψ_A 之光學關係如下圖 4-5 所示

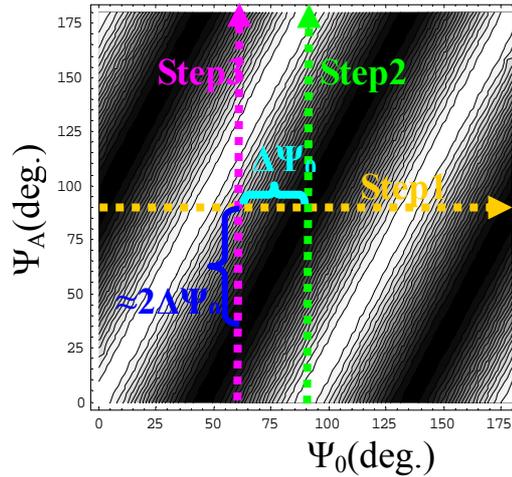


圖 4-5 入射光穿透率與液晶盒位置及偏光片夾角關係圖
($\cos X \approx 0$ 且 $\Phi_i \approx 0$)

在 $\cos X \approx 0$ 且 $\Phi_i \approx 0$ 此條件發生時，穿透率的公式(4-12)可近似如下：

$$T \approx \cos^2(2\Psi_0 - \Psi_A) \quad (4-23)$$

第一步驟可以找到穿透率極小值發生時液晶盒的位置 Ψ_{01} ，固定此位置旋轉檢偏片，分別從第二、三步驟可得到下列兩式

$$2\Psi_{01} - \Psi_{A1} \approx \frac{n}{2}\pi \quad (4-24)$$

$$2(\Psi_{01} + \Delta\Psi_0) - \Psi_{A2} \approx \frac{n}{2}\pi \quad (4-25)$$

由(4-24)及(4-25)兩式可得

$$\Psi_{A2} - \Psi_{A1} \approx 2\Delta\Psi_0 \quad (4-26)$$

從(4-26)式可以得知，(4-19)及(4-20)兩方程式幾乎快重疊在一起，也就是說，兩方程式的交點較多，此時便需要去判斷哪一個值是正確的，如果判斷錯誤便會造成實驗的誤差變大。

所以綜合(A)(B)兩種情況，我們可以發現並不是所有液晶盒都可以精確求解的，因此，如果要得到較精確的結果，就必需避開(A)(B)兩種情況，所以若液晶參數固定，液晶盒厚度就要特別選擇，即 $d \neq \frac{\lambda}{(n_{eff} - n_o)\pi} \sqrt{n^2 \pi^2 - \Phi_t^2}$ ，其中 $n=0.5, 1, 1.5, 2, \dots$ 。但是如果在液晶盒厚度固定且液晶參數不能改變時，也可以改變使用的雷射光波長。



4.2.3 誤差分析

如(4-8)式 $W_\phi = \frac{2K_{22}}{\sin(\Phi_t - \phi_e)} \left(\frac{2\pi}{p} - \frac{\Phi_t}{d} \right)$ 所示，方位角錨定能係數的量測

必需先知道 K_{22} 、 p 、 d 、 Φ_t 及 ϕ_e 等參數，其中 K_{22} 是廠商提供的， p 是實驗室量測的(量測方法在 4.3 節中會介紹)， Φ_t 、 d 及 ϕ_e 也是經由實驗量測後計算而得的。因此，方位角錨定能係數的量測精確度就與上述參數的量測準確性有關，且隨著不同強度的方位角錨定能其精確性也不盡相同。

我們以一個厚度為 $8\mu\text{m}$ ， $p=46.13\mu\text{m}$ ，且上下基板 easy axes 的夾角 ϕ_e 為 0° 的液晶盒為例子，說明當方位角錨定能量測誤差定為 $\pm 10\%$ 時，其各個參數的量測誤差容忍度為何，使用液晶為 MJ01744，液晶參數列於表 2-2 中。

(1)、 K_{22} 的容忍度

由(4-8)式， W_ϕ 與 K_{22} 為正比關係，所以對於不同錨定能強度其容忍度同樣為 $\pm 10\%$ 。

(2)、 p 的容忍度

如下圖 4-6，橫軸為 $\text{Log } W_\phi$ (當 $\text{Log } W_\phi = -5$ 時表示 $W_\phi = 10^{-5} \text{J/m}^2$)，縱軸為 p 。以 $W_\phi = 10^{-5} \text{J/m}^2$ 為例，當 W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時， p 的容忍度約為 $\pm 4\mu\text{m}$ 。當 W_ϕ 愈來愈大時， p 的容忍度也愈來愈大，只有在很弱的方位角錨定能下， p 的量測誤差影響才會較明顯。

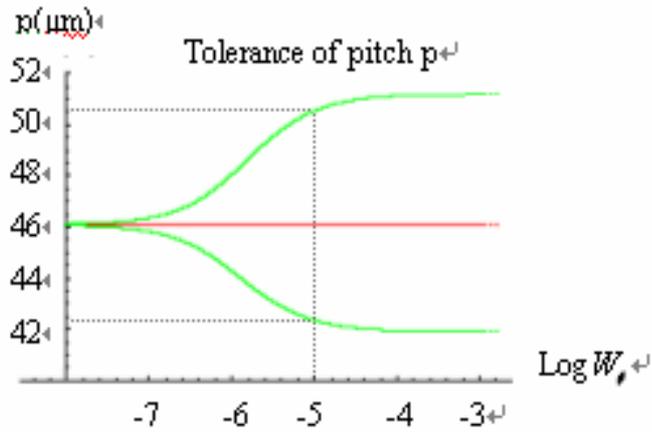


圖 4-6 W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時不同 W_ϕ 其 p 的容忍度

(3)、 d 的容忍度

如下圖 4-7 所示，縱軸為 d 。以 $W_\phi = 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 為例，當 W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時， d 的容忍度至少為 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。當 W_ϕ 愈來愈大時， d 的容忍度也愈來愈大，只有在很弱的方位角錨定能下， d 的量測誤差影響才會較明顯。

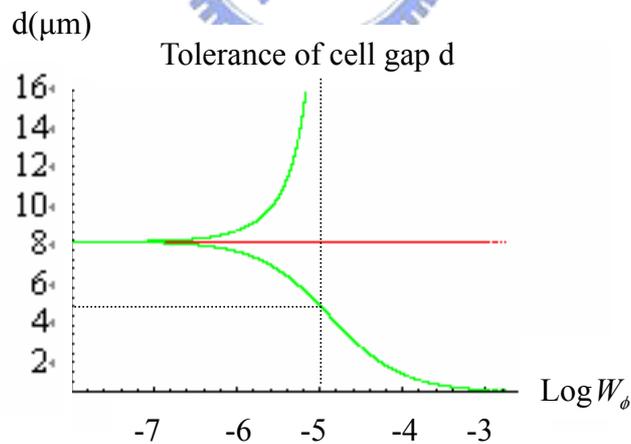


圖 4-7 W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時不同 W_ϕ 其 d 的容忍度

(4)、 Φ_t 的容忍度

如下圖 4-8 所示，縱軸為 $\Delta \Phi_t$ 。以 $W_\phi = 10^{-5} \text{ J/m}^2$ 為例，當 W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差

時， $\Delta\Phi_t$ 的容忍度為 $\pm 0.6^\circ$ 。當 W_ϕ 很大及很小時， $\Delta\Phi_t$ 的容忍度就會相對變小，於是，對於強方位角錨定能的液晶盒，其量測的誤差就會增加。

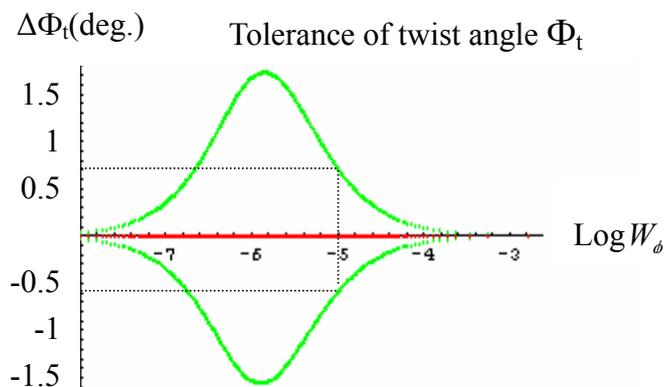


圖 4-8 W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時不同 W_ϕ 其 $\Delta\Phi_t$ 的容忍度

(5)、 ϕ_e 的容忍度

如下圖 4-9 所示，縱軸為 $\Delta\phi_e$ 。以 $W_\phi=10^{-5}\text{J/m}^2$ 為例，當 W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時， $\Delta\phi_e$ 的容忍度為 $\pm 1^\circ$ 。當 W_ϕ 持續變小時， $\Delta\phi_e$ 的容忍度就會相對變大，於是，對於弱方位角錨定能的液晶盒，其量測的誤差就會減小，但是強方位角錨定能其 ϕ_e 的量測就需要很準確。

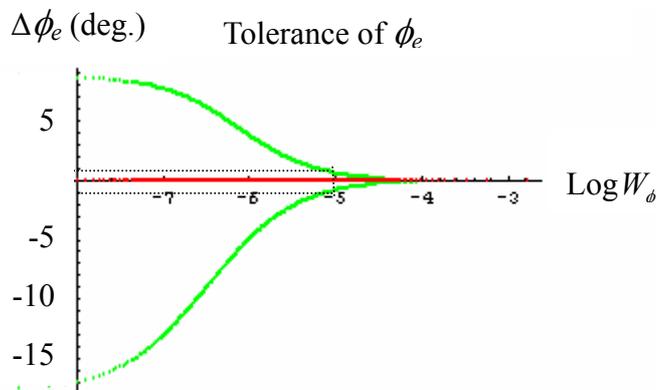


圖 4-9 W_ϕ 有 $\pm 10\%$ 誤差時不同 W_ϕ 其 $\Delta\phi_e$ 的容忍度

4.3 液晶節距的量測

4.3.1 原理

本實驗使用 Cano wedge 來量測螺旋液晶的節距[12]。所製作的 wedge cell 如下圖 4-10 所示。

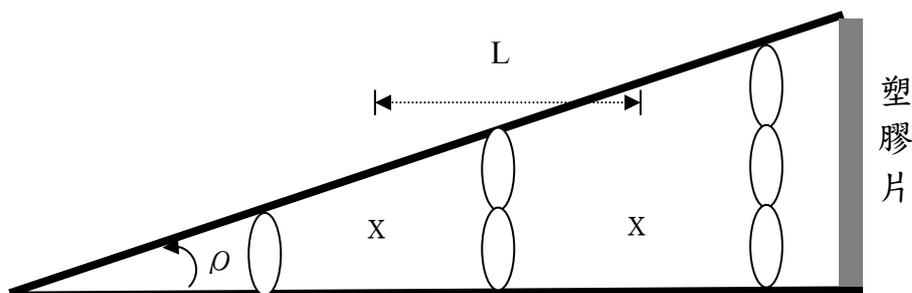


圖 4-10 wedge cell 示意圖

此 wedge cell 的上下基板配向為互相平行，因此，螺旋液晶在厚度為半節距整數倍的位置處是平衡狀態，在兩平衡態間會產生 disclination line，兩 disclination line 的距離為 L，可由顯微鏡觀察得到，如果兩片玻璃的夾角為 ρ ，便可求得節距

$$p=2L\tan\rho \quad (4-26)$$

下圖 4-11 為 ρ 角量測的實驗架構圖[13]

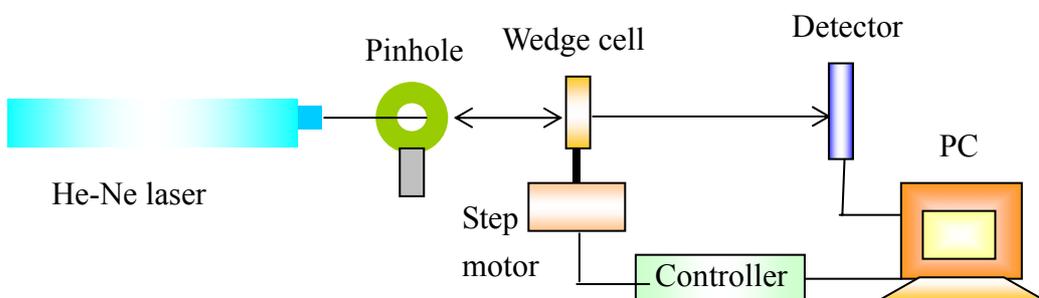


圖 4-11 wedge cell 夾角 ρ 量測實驗架構圖

利用雷射光束打在液晶盒兩不平行的玻璃基板上，會產生兩個反射點的性

質進行量測。參考圖 4-12，我們可分別從兩圖以簡單的幾何運算獲得 X_1 及

X_2 值：

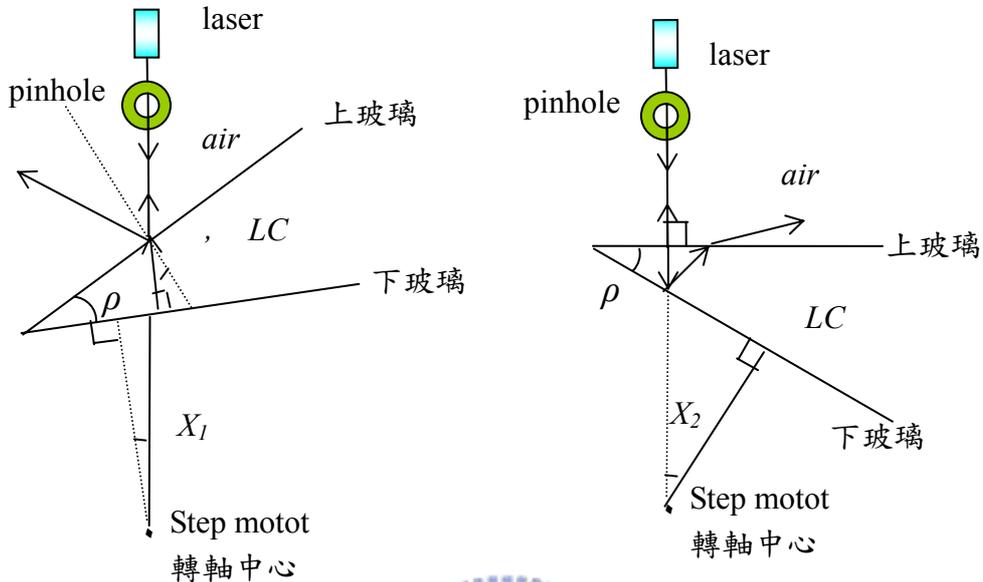


圖 4-12 雷射光經 wedge cell 反射示意圖

$$X_1 = \sin^{-1}(\bar{n} \sin \rho) - \rho \quad (4-27)$$

$$X_2 = \rho \quad (4-28)$$

其中 \bar{n} 為液晶平均折射率[14]

$$\bar{n}^{-2} = \frac{2}{3}n_o^2 + \frac{1}{3}n_e^2 \quad (4-29)$$

從第一個反射點打回 pinhole 時，開始計算液晶盒轉動 X 角度使得第二個反射點也打回 pinhole，則

$$X = X_1 + X_2 = \sin^{-1}(\bar{n} \sin \rho) \quad (4-30)$$

$$\rho = \sin^{-1}\left(\frac{\sin X}{\bar{n}}\right) \quad (4-31)$$

將(4-31)式代入(4-26)式，可得 p ，若增加 wedge cell 與 pinhole 的距離，就可以增加節距 p 量測的準確性。

4.3.2 液晶節距量測結果

我們調配左右旋各四種不同節距長度的螺旋性液晶盒(左右旋螺距的長度是由 Merck 所調螺距為 $32\mu\text{m}$ 的左旋及右旋液晶再利用重量百分比濃度調製而成)，嘗試將液晶盒方位角的偏離角度拉開以便觀察方位角界面自由能高階項的影響。下表 4-1 是左右旋液晶節距的量測結果。

液晶編號	1-R	1-L	2-R	2-L	3-R	3-L	4-R	4-L
使用液晶	MJ01744							
\bar{n}	1.51028							
$\rho(\text{deg.})$	0.867	0.834	0.622	0.689	0.550	0.556	0.530	0.550
$L(\mu\text{m})$	3333.3	3416.7	2900.0	2944.4	2711.1	2822.2	2166.7	2146.7
$p(\mu\text{m})$	100.93	-99.50	67.03	-68.05	52.01	-54.79	40.06	-41.68

表 4-1 液晶節距量測結果



4.4 方位角錨定能係數量測結果

使用兩種不同配向的液晶盒量測方位角錨定能係數，選擇了一種摩擦配向液晶盒 A 及一種光配向液晶盒 C，其表面配向皆為平行水平配向，把表 4-1 所列的四組不同左右旋節距液晶分別灌入液晶盒 A 及液晶盒 C，其中液晶盒 A 為同一批工廠製作，所以假設每片液晶上下基板的配向皆為相同，故每個液晶盒上下基板 easy axes 夾角 ϕ_e 為相同。而液晶盒 C 為實驗室製作如圖 2-2 所示，所以在同一組液晶盒中左右旋上下基板 easy axes 夾角 ϕ_e 亦為相同。液晶盒 A 及液晶盒 C 的測量結果以及計算所得 easy axes 夾角與方位角錨定能係數分別列於表 4-2 及表 4-3 中。



編號	A1		A2		A3		A4	
	1-R	1-L	2-R	2-L	3-R	3-L	4-R	4-L
灌入液晶								
空液晶盒厚度(μm)	8.33	8.25	8.35	8.46	8.62	8.64	8.47	8.35
p(μm)	100.93	-99.5	67.03	-68.05	52.01	-54.79	40.06	-41.68
d(μm)	8.39	8.37	8.38	8.65	8.52	8.72	8.47	8.36
自然節距扭轉角度($^\circ$)	29.93	-30.28	45.01	-45.76	58.97	-57.30	76.12	-72.21
Φ_t ($^\circ$)	1.21	0.93	1.33	0.98	1.39	1.01	1.17	0.88
d/p	0.08	-0.08	0.13	-0.13	0.16	-0.16	0.21	-0.20
ϕ_e ($^\circ$)	1.08		1.16		1.20		1.02	
$0.5(\Phi_t - \phi_e)$ ($^\circ$)	0.07	-0.07	0.09	-0.09	0.1	-0.09	0.07	-0.07
W_ϕ (10^{-4}J/m^2)	2.81		3.34		3.90		6.67	

表 4-2 液晶盒 A 方位角錨定能係數量測結果

編號	C1		C2		C3		C4	
灌入液晶	1-R	1-L	2-R	2-L	3-R	3-L	4-R	4-L
空液晶盒厚度(μm)	8.30	8.12	8.14	8.34	7.99	8.24	8.13	8.34
$p(\mu\text{m})$	100.93	-99.5	67.03	-68.05	52.01	-54.79	40.06	-41.68
$d(\mu\text{m})$	8.01	8.08	7.84	8.01	7.93	7.85	8.15	8.06
自然節距扭轉角度($^\circ$)	28.57	-29.23	42.11	-42.37	54.89	-51.58	73.24	-69.62
$\Phi_t(^\circ)$	0.83	0.25	2.51	1.66	2.01	0.81	5.13	1.31
d/p	0.08	-0.08	0.12	-0.12	0.15	-0.14	0.20	-0.19
$\phi_e(^\circ)$	0.33		2.01		1.49		3.27	
$0.5(\Phi_t - \phi_e)(^\circ)$	0.14	-0.15	0.20	-0.22	0.30	-0.30	0.93	-0.98
$W_\phi (10^{-5} \text{J/m}^2)$	13.5		13.7		12.2		4.94	

表 4-3 液晶盒 C 方位角錨定能係數量測結果

將表 4-2 及表 4-3 中 d/p 與 W_ϕ 的結果整理於下圖 4-13 與 4-14 中，並分析其實驗量測 Ψ_{A1} 與 Ψ_{A2} 的誤差對實驗結果的影響。發現不管是液晶盒 A 或液晶盒 C， Ψ_{A1} 與 Ψ_{A2} 的誤差皆約為 $\pm 0.05^\circ$ ，所以造成計算出的 Φ_t 誤差約為 $\pm 0.1^\circ$ ， d 的誤差約為 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ ， ϕ_e 的誤差約為 $\pm 0.1^\circ$ ，則各個編號方位角錨定能係數的量測誤差標示於下圖中。

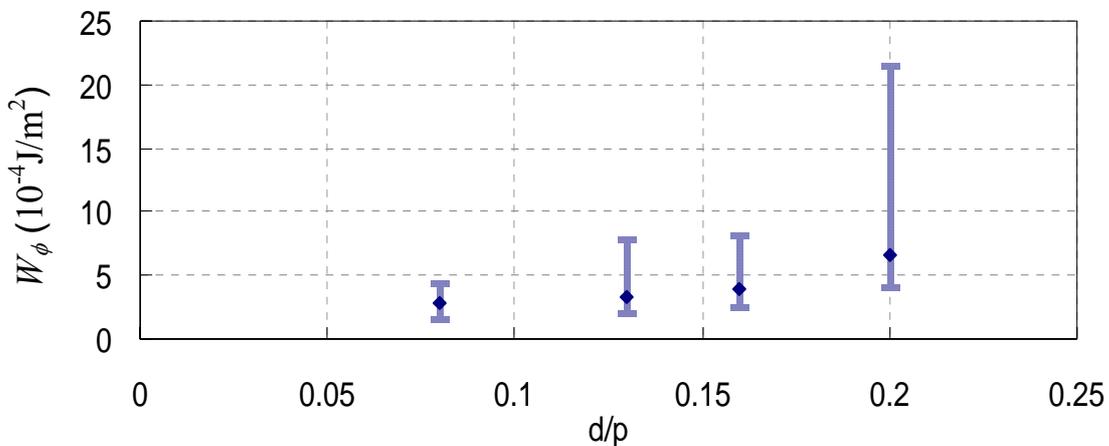


圖 4-13 液晶盒 A 的 d/p 值與方位角錨定能係數的關係圖

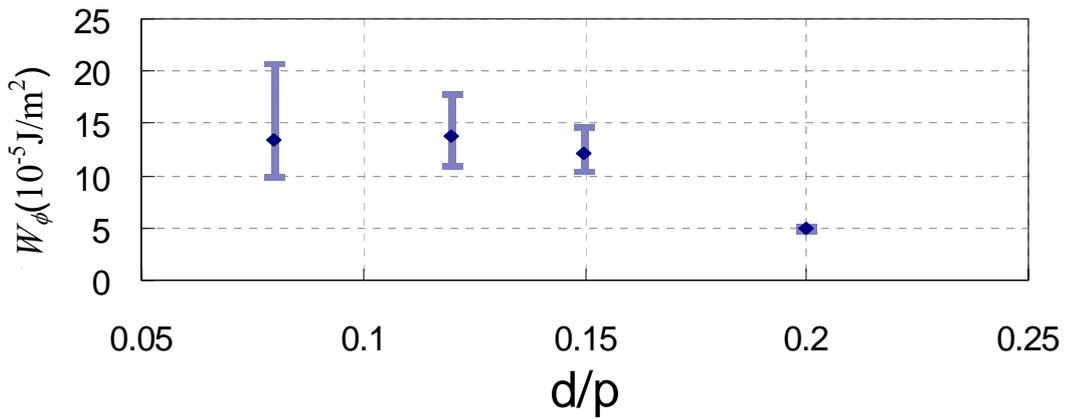


圖 4-14 液晶盒 C 的 d/p 值與方位角錨定能係數的關係圖

從圖 4-13 中，我們發現，實驗誤差太大造成無法判斷其方位角錨定能是否隨著 pitch 的拉力變化而改變，我們曾嘗試再將 d/p 加大至接近但小於 0.25，但發現液晶盒內的液晶指向矢會旋轉 180 度找到另一個 easy axis 的方向，不過可以肯定的是，摩擦配向的液晶盒 A 其方位角錨定能很強，使得液晶盒內的指向矢偏離角度不大。同樣在液晶盒 C 中，如圖 4-14，我們雖然發現 $d/p=0.2$ 時，方位角錨定能有顯著的下降，且確定不是量測誤差所造成，但是由於表 4-3 中量測所得的偏離角度仍未超過 1° ，仍是符合 RP 準則小角度近似的假設，若將 d/p 加大至接近但小於 0.25，也發現液晶盒內的液晶指向矢會旋轉 180 度找到另一個 easy axis 的方向，所以也無觀察出方位角錨定能四次項的影響。

第五章 熱穩定性

大多數的光配向液晶盒其配向膜的錨定強度及預傾角對於熱的穩定度並沒有明確的定論，且與配向膜的材料和所搭配的液晶有關。錨定性質與預傾角的不同會導致液晶盒的電光效應產生極大的差異，並影響液晶顯示器的表現，因此必須加以探討。然而在現有文獻中，不乏製造及合成光配向膜的文章，但對於新材料的穩定性研究卻不多。

此次實驗所使用的光配向材料屬於破壞型的光配向方法，並預設其在加溫至一百多度後降回室溫後會發生變化。根據文獻[15]在液晶盒加熱後， T_{\max}/T_{\min} 及偏光顯微鏡下液晶盒的均勻性會改變，而文獻[16]觀察到液晶盒預傾角與退火溫度的關係。故我們將液晶盒經過不同退火溫度一小時處理再緩慢降至室溫量測液晶盒的預傾角 α_0 、扭轉角錨定能係數 W_ϕ 及觀察偏光顯微鏡下液晶盒的均勻性等。也就是同一液晶盒先在室溫量測一次做為對照組，然後依次加熱 60°C、80°C、100°C、120°C 及 140°C 各一小時後量得數據，直至加熱 140°C 後液晶盒已無配向效果為止。在此實驗中，烤箱溫度的穩定性非常重要，故在下節中對烤箱溫度穩定性做一量測。

5.1 烤箱溫度穩定性量測

我們針對實驗室的烤箱做加溫 2 小時之實驗，觀察 1 個位置(如圖 5-1 所示)的溫控變化，分別對 50°C 及 150°C 的溫度穩定性做量測，結果如表 5-1 及表 5-2 所示。以確定屆時量測實驗時溫控的穩定性。

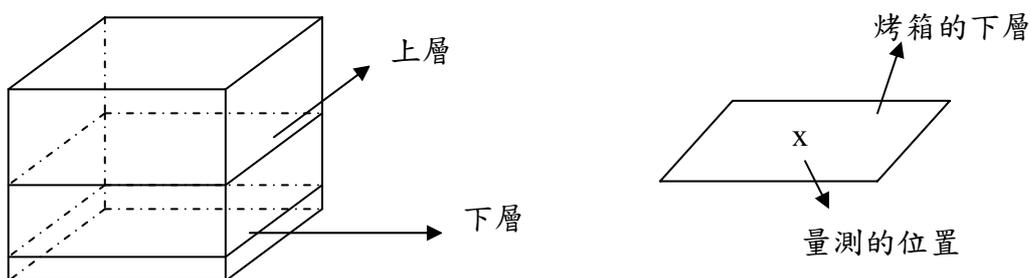


圖 5-1 烤箱溫度測定位置示意圖

Time(min)	0	1	2	3	5	7	9.5	12
T(°C)	48.4	48.8	49.2	50	50.2	50.6~ 51.2	50.4~ 51.4	50.8~ 51.6

Time(min)	27	40	60	80	100	120
T(°C)	51.4~ 51.2	51.6~ 52.4	51.2~ 52.4	51.2~ 52.2	51.0~ 52.4	51.2~ 52.4

表 5-1 烤箱溫度設定為 50°C 其溫度隨時間的變化

Time(min)	1	5	10	20	40
T(°C)	155	154.4~ 155.2	155.0~ 156.2	156.2~ 158.4	157.2~ 158.6

Time(min)	60	90	120
T(°C)	156.4~158.0	156.4~158.0	157.0~158.6

表 5-2 烤箱溫度設定為 150°C 其溫度隨時間的變化

從以上結果我們得知，設定刻度標示 150°C 時，量測到真實穩定溫度會高於 150°C ，所以在加熱時烤箱持續加溫至所要的溫度，例如 150°C ，利用人工的方法，調整量測的值穩定為 $150\pm 1^{\circ}\text{C}$ 後，才可離開。

5.2 光配向液晶盒的熱穩定性實驗結果

這裡所使用的液晶盒為表 2-1 中編號 D 的光配向液晶盒，此三個液晶盒是由一大片玻璃分割成九片取其中三片而得(工研院提供)，所以此三片液晶盒的製程是相同的，意謂著配向的條件是相同的，即符合連水池博士文章所要求的 double cell 條件，以推得方位角錨定能係數。而左右旋螺距的長度是由 Merck 所調螺距為 $32\mu\text{m}$ 的左旋及右旋液晶再利用重量百分比濃度調製而成，右旋螺距長度為 $46.13\mu\text{m}$ ，左旋螺距長度為 $-46.12\mu\text{m}$ 。

下圖 5-2、圖 5-3 分別是預傾角與退火溫度關係圖及方位角錨定能係數與退火溫度關係圖，可以發現液晶盒的預傾角在退火溫度 120°C 以下幾乎不隨著退火溫度而改變，而方位角錨定能係數卻隨退火溫度的上升而下降，直至 100°C 後液晶盒排列出現 defect 如表 5-3 所示，至 140°C 後液晶盒排列已經非常的不均勻如表 5-4 所示。

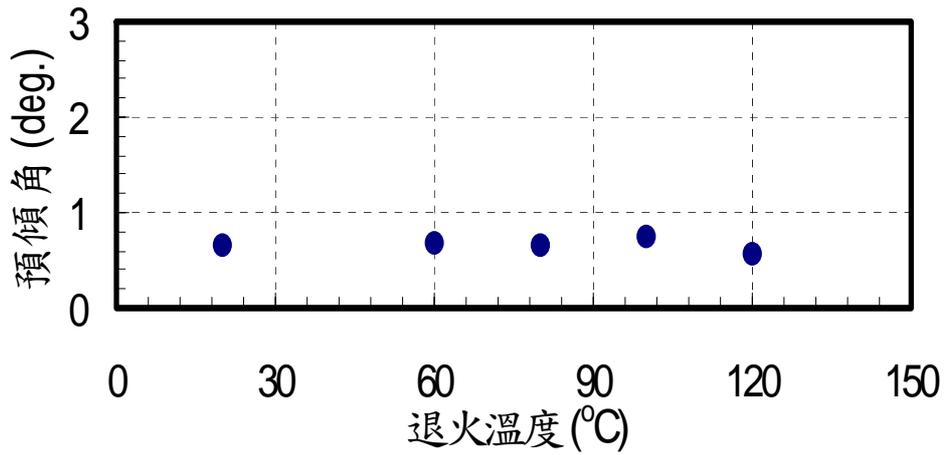


圖 5-2 預傾角與退火溫度關係圖

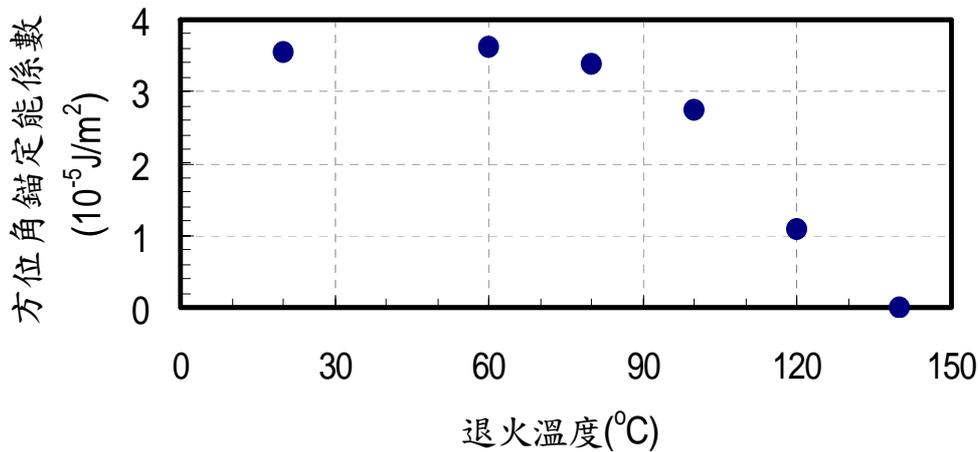


圖 5-3 方位角錨定能係數與退火溫度關係圖

如下頁表 5-3 所示，在退火 100°C 後，液晶盒已經發生些許變化與方位角錨定能係數的量測的變化吻合。在巨觀下，三個液晶盒顏色變得比較偏黃，而微觀下，也開始出現 defects，雖然變化不大，但我們得到了當液晶盒累積加熱到 100°C 後液晶盒會開始產生變化的結果，我們認為只要在 100°C 加熱更久的時間，一定會有更大的改變。

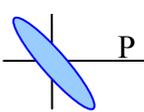
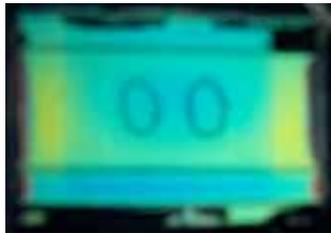
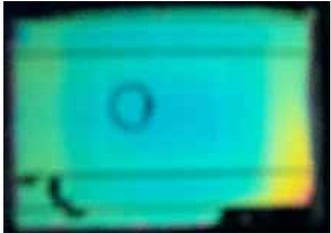
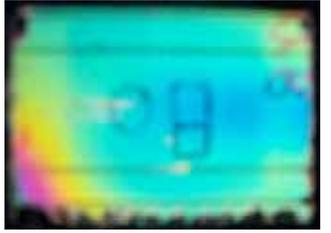
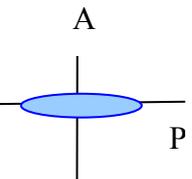
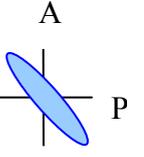
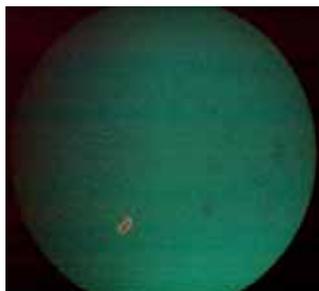
	homogeneous	右旋	左旋
巨觀 			
偏光顯微鏡 			
偏光顯微鏡 			

表 5-3 退火溫度 100°C 時液晶盒在偏光顯微鏡下的均勻性

如下頁表 5-4 所示，在退火溫度 140°C 下，巨觀地來觀察液晶的暗態，發現三個液晶盒都再也不是暗態了，而在微觀下，更是出現 4 個 brushes 的 defects，此時因為液晶盒排列已經非常的不均勻了，所以我們使用量測 Neel Wall 寬度去計算方位角錨定能係數的方法[17]求出其方位角錨定能係數大約是 $8.6 \times 10^{-8} \text{J/m}^2$ ，結果顯示此液晶盒歷經退火溫度 140°C 一小時後，不再具有配向的能力了。

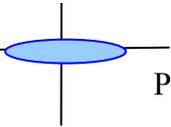
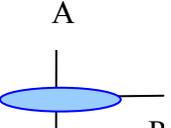
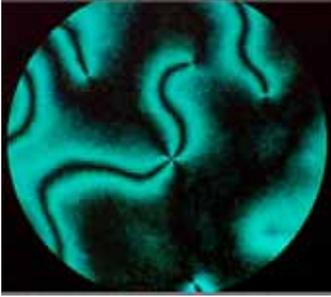
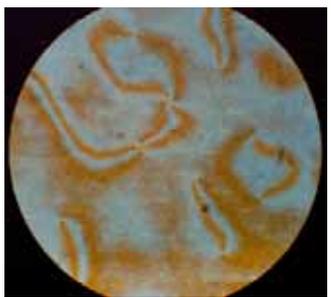
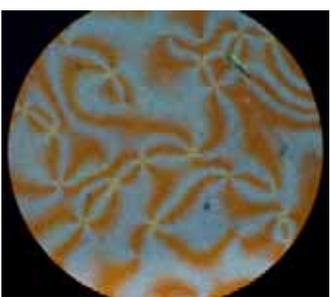
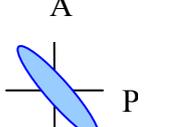
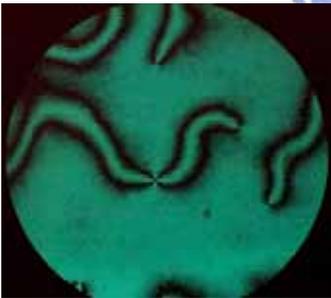
	homogeneous	右旋	左旋
巨觀 A  P			
偏光顯微鏡 A  P			
偏光顯微鏡 A  P			

表 5-4 退火溫度 140°C 時液晶盒在偏光顯微鏡下的均勻性

綜合以上實驗結果，在退火溫度小於 120°C，液晶盒預傾角是無太大改變的，反倒是方位角的液晶指向排列受到破壞，不只從顯微鏡下看到 defects 產生，同時也量測到方位角錨定強度變弱，因此，我們發現其方位角錨定特性的熱穩定性仍需再改進，否則將造成液晶盒光電特性產生極大的差異。

第六章 結論與展望

6.1 結論

本研究使用一種摩擦配向及兩種光配向液晶盒來探討平行水平配向液晶盒的錨定特性，將液晶盒傾角界面自由能與方位角界面自由能分開討論。除了利用商用模擬軟體 DIMOS 與實驗結果比較提出一套傾角錨定能係數量測的方法，探討傾角界面自由能的形式。也利用經由改變液晶節距的方法量測方位角錨定能係數及熱穩定性。綜合以上實驗結果，我們可以歸納出以下結論：

- 一、我們量測液晶盒相位延遲與電壓的關係圖與依RP準則模擬的結果互相比較，可以得到傾角錨定能係數 W_0 與修正後的RP準則四次項的修正項係數 ζ 值，不管是摩擦配向還是光配向液晶盒，修正係數 ζ 值皆為正，這代表著隨著外加電場的增大即偏離角度變大時，液晶盒邊界的液晶指向矢比RP準則描述的更難拉動。
- 二、利用改變液晶節距的方法量測方位角錨定能係數有其限制性，並非所有參數及厚度的液晶盒都可以精確量測，而是需針對不同的液晶參數設計液晶盒厚度才能精確量測。除此，由實驗結果也顯示，對於較強的方位角錨定能係數其量測結果誤差會較大。

三、配向層 PI-B 光配向液晶盒的錨定強度雖小於摩擦配向，但仍舊不易將偏離角度拉大，如果探討方位角界面自由能的形式，可以考慮用外加橫向電場的液晶盒，利用大電壓將方位角的偏離角度拉大。

四、配向層 PI-C 的光配向液晶盒在累積不同退火溫度一小時後，液晶盒的均勻性漸漸被破壞，且方位角錨定能係數也隨之下降。我們發現此種機械的光配向液晶盒，熱穩定性不佳。



6.2 展望

液晶盒界面自由能的研究不論在學術還是在顯示器的應用上都有其重要性與需求，對於未來的展望，可以朝向下列幾個方向作進一步的研究與探討。

- 一、將傾角界面自由能的修正項加入模擬軟體中，計算出液晶指向矢分佈及所對應的光學特性，並與實驗比較之以求得界面自由能修正項的係數。
- 二、利用外加橫向電場，將液晶盒邊界的液晶指向矢方位角偏離角度拉大，以探討液晶盒方位角界面自由能的形式。
- 三、在本研究中，是將傾角界面自由能與方位角界面自由能獨立分析。事實上，兩者的耦合關係也是值得探討的，且必需加入修正項去考慮。
- 四、利用加入修正項的界面自由能形式，來建構更完整的理論模型，以幫助弱錨定能液晶盒的研究與應用及發展更完備的數值模擬軟體。
- 五、光配向液晶盒的熱穩定性是需要改善的，可能是PI遭到破壞，或是液晶遭到破壞，甚至是PI與液晶在加熱的過程中的相互作用，這些都是必需去釐清。所以，對於製作光配向液晶盒的材料開發仍有許多發展的空間。

參考文獻

1. A. Rapini, M. Papoular, J. Phys. Colloc. Paris, Vol.30, c4-54(1969)
2. A.A. Sonin, The Surface Physics of Liquid Crystal, 20 (1995)
3. Y. Guochen and Zh Suhua, Liq. Cryst., Vol.29, No.5, 641-646(2002)
4. H. Birecki and F.J. Kahn, The Physics and Chemistry of Liquid Crystal Devices, 115(1980)
5. K.-C. Lim and John T. Ho, Mol. Cryst. Liq. Cryst., Vol.47, 173(1978)
6. 范揚宜, "垂直配向液晶盒的錨定特性", 交通大學, 光電所碩士論文 (2001)
7. Y. Guochen, Z. Zhiguo, L. Li and G. Ronghua, Liq. Cryst. Vol.30, No.12, 1441-1447(2003)
8. Y. Saitoh and A. Lien, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.39, 1743-1746(2000)
9. T. Akahane, H. Kanedo and M. Kimura, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.35, 4434-4437(1996)
10. 楊惠雯, "水平配向液晶盒方位角錨定能量測研究", 交通大學, 光電所碩士論文(2002)
11. Pochi Yeh and Claire Gu, Optics of Liquid Crystal Displays.(1999)
12. 謝毓章, 液晶物理學, 科學出版社, 北京(1998)
13. 張庭瑞, "非強錨定扭轉型液晶盒的電光特性研究", 交通大學, 光電所碩士論文(2002)
14. Iam-Choon Khoo and Shin-Tson Wu, Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore(1993)
15. Yinghan Wang, Chunying Xu, Kanazawa A, Shiono T, Ikeda T, Matsuki Y and Takeuchi Y, Liq. Cryst., Vol.28, No.3, 473-5(2001)
16. Chae BH, Han KY, Lee JS, Yang HG, Choi HJ, Kim JY and Park JG., IDRC, 785-8(1998)
17. Xiang Tong Li, Dong He Pei, Shunsuke Kobayashi and Yasufumi Iimura, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36,L432-434(1997)

附錄

Matlab 程式：液晶扭轉角度與厚度量測

```
clear all;

%----- input data -----
delta1=90.48*pi/180;
delta2=85.21*pi/180;

dmin=8.2;
dmax=8.4;
dstep=0.001;

phimin=0.7;
phimax=0.9;
phistep=0.001;

error=0.000005;
gerror=0.001;

ne=1.5691;
no=1.48;
%-----

lamda=632.8*10^-9;
alpha=2.2*pi/180;
neff=1/sqrt(cos(pi/2-alpha)^2/no^2+sin(pi/2-alpha)^2/ne^2);
deltan=neff-no;

%-----
%-----change d from          micro-meter to          micro-meter
%-----step 0.01 micro-meter
%-----

a=1;b=1;c=1;
for d=(dmin:dstep:dmax)*10^-6
    gamma=2*pi*deltan*d/lamda;
%-----
```



```

%-----change phi from          degrees to          degrees
%-----step          degree
%-----

for phi=(phimin+.00003:phistep:phimax)*pi/180
    beta1=-phi/2+pi/2;
    beta2=(pi/2-(2*pi/36))-phi/2;
    x=sqrt(phi^2+gamma^2/4);

tc1=(-(phi/x*sin(x))^2/2+cos(x)^2/2)*cos(2*phi)+sin(2*x)*sin(2*phi)/(2*x/phi)+(gamma/(2*
x)*sin(x))^2*cos(2*phi+4*beta1)/2;

ts1=(-(phi/x*sin(x))^2/2+cos(x)^2/2)*sin(2*phi)-sin(2*x)*cos(2*phi)/(2*x/phi)+(gamma/(2*
x)*sin(x))^2*sin(2*phi+4*beta1)/2;

    DELTA1=1/2*atan2(ts1,tc1)+pi/2;

tc2=(-(phi/x*sin(x))^2/2+cos(x)^2/2)*cos(2*phi)+sin(2*x)*sin(2*phi)/(2*x/phi)+(gamma/(2*
x)*sin(x))^2*cos(2*phi+4*beta2)/2;

ts2=(-(phi/x*sin(x))^2/2+cos(x)^2/2)*sin(2*phi)-sin(2*x)*cos(2*phi)/(2*x/phi)+(gamma/(2*
x)*sin(x))^2*sin(2*phi+4*beta2)/2;

    DELTA2=1/2*atan2(ts2,tc2)+pi/2;

%-----
%          For every d and phi, there is a DELTA1
%          If DELTA1 is very closed to input delta1,
%          it is the solution for correspond d and phi
%-----

if DELTA1<delta1+error & DELTA1>delta1-error
    result1(1,b)=d;
    result1(2,b)=phi*180/pi;
    b=b+1;
end

```

