

國立交通大學

照明與能源光電研究所

碩士學位論文

混合配向液晶元件的預傾角量測與計算之研究

Determination of Pretilt Angles in Hybrid-Aligned
Liquid Crystal Cells

研究生：吳皇明 Huang-Ming Wu

指導教授：楊界雄 教授 Kei-Hsiung Yang

中華民國 101 年 7 月

混合配向液晶元件的預傾角量測與計算之研究

Determination of Pretilt Angles in Hybrid-Aligned Liquid Crystal
Cells

研究生:吳皇明

Student: Huang-Ming Wu

指導教授:楊界雄博士

Advisor: Dr. Kei-Hsiung Yang



國立交通大學
照明與能源光電研究所
碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Lighting and Energy Photonics

College of Photonics

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Lighting and Energy Photonics

July 2012

Tainan, Taiwan, Republic of China

中華民國 101 年 7 月

混合配向液晶元件的預傾角量測與計算之研究

學生:吳皇明

指導教授:楊界雄 博士

國立交通大學照明與能源光電研究所碩士班

摘要

預傾角的量測對於顯示器的各種光電特性有很重要的影響，目前現有的預傾角量測公式，像是相位延遲極值法或者晶體旋轉法，皆是用於傾斜配向的量測方法，但對於混合配向下的預傾角量測，便無公式可將兩面混合配相的角度同時得之，因此我們希望對此種混合配向的液晶樣品，演算出一套新的公式，達到我們的目的。

在我們的公式中，是從晶體旋轉法的公式為基礎，藉由量測出的相位延遲值代入公式計算，便可得其混合預傾角，並在我們的實驗結果中相互印證。在本實驗中，我們使用 POSS 奈米分子摻雜於水平配向膜中，以及摩擦配向的摩擦強度控制其預傾角角度，分別與水平配向膜、垂直配向膜組成樣品，先從這兩組類型樣品中，模擬推導其公式的準確度，並對公式加以修正後，再從實際量測出的預傾角數值，確定我們公式計算出的解是正確的，最後再以實驗求得的相位延遲值的交互關係，代入其適當的公式中，驗證是否能準確求出任意混合樣

品的預傾角。

最後從我們的實驗結果，確定了其公式修正後的可信度，對於量測到的相位延遲值關係不同，使用不同的公式計算，可以增加預傾角量測上的準確性，因此本篇研究中所提出的解析方法，為第一次能從量測到的相位延遲數據，同時求出混合配向的液晶盒一邊與對邊兩個不同的預傾角。

關鍵字:預傾角，相位延遲極值法，晶體旋轉法，摩擦配向



Determination of Pretilt Angles in Hybrid-Aligned Liquid Crystal Cells

Student: Huang-Ming Wu

Advisor: Dr. Kei-Hsiung Yang

Institute of Lighting and Energy photonics
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The measurement of the pretilt angle is very important for both optical and electrical properties in liquid crystal displays (LCDs). Previous methods of measurements, such as the phase-retardation-extremum method and the crystal rotation method, have been applied to liquid crystal cells whose alignment were parallelly tilted at the cell substrates. However, there was no method for measurement of the pretilt angles of hybrid-aligned LCDs. In this thesis, a new method was proposed to provide that.

We developed a theoretical model to calculate the phase retardation of the hybrid-aligned LCDs and compared with experimental results to derive its pretilt angles. In our experiments, we doped the homogeneous alignment film with the nanoparticle POSS (polyhedral oligomeric silsesquioxane) to change the pretilt angles. The hybrid-aligned sample was composed of alignment by this film and the homogeneous or vertical aligned film at the opposite side. We have used an iterative approach to derive suitable equations for the determination of accurate pretilt angle by comparing our simulated results with experimental results. In each iteration, the equations suitable for the measured phase retardation of the hybrid-aligned LC cell were modified to decrease the standard deviations of the obtained pretilt angles.

We believe that, for the first time, we have developed a general approach to determine the pretilt angles of any hybrid-aligned nematic LC cells.

Keywords: pretilt angle, phase-retardation-extremum method, crystal rotation method, rubbing alignment, POSS (polyhedral oligomeric silsesquioxane)



致 謝

兩年來的研究所生涯，也將隨著本論文的完成告一段落，這些日子來的學習，也讓我從原本對液晶領域一無所知，到現在居然能完成一篇完整的液晶研究，其中最需要感謝的，就是指導教授 楊界雄 老師的教導，老師在液晶領域上的豐富經驗與成就，給予我最正確的知識與研究方向，以及在生活中的機會教育，讓我隨時都在吸收最新的科技資訊，在生活上由於家裡經濟的緣故，還是多靠了老師給予我的協助，才讓我能夠順利的完成兩年的學業，使我每當想起都感動在心頭。

同時也很感謝 鄭協昌 老師給予研究上的協助與建議，實驗室中要特別感謝 王聖雅 同學，對於我的研究過程給予很大的幫助，也是我最重要的研究討論夥伴，也要感謝 黃偉彥、徐菀君 同學在生活上與學業上的幫忙和建議，也感謝學弟妹 黃冠傑、徐曉晴、曾千容 和 郭羽眉 這一年來的陪伴，使得整個實驗室的氣氛活絡不少，在研究之餘的生活豐富許多，此外，也感謝 鄭協昌 老師實驗室的同學與學弟，在實驗儀器使用上的協助，以及研究上的相互砥礪，在此表示最由衷的感謝之意。

最後，要感謝我的家人在背後默默的支持，使我能無後顧之憂的完成學業，也是我遇到挫折時最穩固的避風港，也要感謝女友的陪伴與精神上的支持，給予我更大的前進動力，謹以此論文獻上最大致意。

目 錄

摘 要	i
ABSTRACT	iii
致 謝	v
目 錄	vi
表目錄	viii
圖目錄	ix
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 液晶的基本物理性質	2
1.2.1 秩序參數(order parameter)	3
1.2.2 雙折射率(birefringence)	4
1.2.3 介電常數(dielectric constant)	6
1.2.4 彈性係數(elastic constant)	7
1.3 預傾角(pretilt angle)定義與形成	8
1.4 研究動機	10
第二章 相關研究與文獻探討	12
2.1 調變預傾角之方法	12
2.1.1 摻雜 POSS 奈米分子於聚亞醯胺(PI)[9]	12
2.2 預傾角量測之原理	14
2.2.1 光學相位延遲極值法	15
2.2.2 旋轉晶體法	17
2.3 液晶盒的間距量測之原理	22
第三章 實驗配置與架構	24

3.1 實驗樣品製備	24
3.1.1 配向膜參雜奈米粒子(POSS)之製備	24
3.1.2 樣品製作流程	24
3.2 實驗光路之配置	26
3.3 研究方法	28
3.3.1 量測公式	28
3.3.2 實驗架構	30
第四章 結果與討論	33
4.1 調變式配向膜+垂直配向膜	33
4.1.1 公式討論與修正	33
4.1.2 實驗數據與量測結果	44
4.2 調變式配向膜+水平配向膜(AL-58)	47
4.2.1 公式討論與修正	47
4.2.2 實驗數據與量測結果	58
4.3 計算公式統整	60
4.4 混合配向樣品(Hybrid-Aligned Cell)	62
4.5 液晶盒的間距計算與量測	63
第五章 結論與未來展望	67
參考文獻	71

表目錄

表 3.1 配向膜塗佈參數	25
表 4.1 圖 4.7 上四點數值	40
表 4.2 圖 4.8 上四點數值	41
表 4.3 實驗量測之相位延遲值	43
表 4.4 公式計算之預傾角數據	44
表 4.5 $A_{VA+P} \sim F_{VA+P}$ 實驗量測之相位延遲值	45
表 4.6 傾斜配向與混合配向預傾角量測結果	47
表 4.7 圖 4.11 八點數據	49
表 4.8 圖 4.14 八點數值	52
表 4.9 實驗量測之相位延遲值	54
表 4.10 公式計算之預傾角數據	54
表 4.11 $A_{AL+P} \sim E_{AL+P}$ 實驗量測之相位延遲值	59
表 4.12 傾斜配向與混合配向預傾角量測結果	60
表 4.13 實驗量測之相位延遲值	62
表 4.14 公式計算之預傾角數據	63
表 4.15 預傾角代入公式求得液晶盒間距數值	63
表 4.16 夾置樣品量測間距數值	65
表 4.17 黏置樣品量測間距數值	65

圖目錄

圖 1.1 安息香酸膽固醇酯之化學結構	2
圖 1.2 液晶分子長軸方向 α 與導軸 n 的空間關係	3
圖 1.3 單軸液晶之折射率異向性示意圖	5
圖 1.4 單光軸介質的折射率橢圓示意圖	5
圖 1.5 正型與負型液晶在電場中的扭轉示意圖	6
圖 1.6 向列型液晶主要型變的種類[5]	7
圖 1.7 液晶分子在玻璃基板上的相對位置	9
圖 1.8 液晶分子在樣品內的排列情形	9
圖 1.9 預傾角存在與否的差異	10
圖 2.1 POSS/PI 配向膜表面與蒸餾水接觸角度以及計算出表面能和 POSS 濃度之關係圖[9]	13
圖 2.2 偏光顯微鏡下摻雜不同濃度 POSS 於 PI 中之液晶盒顏色變化圖:[9]	14
圖 2.3 兩種深度摩擦配向下 POSS 濃度與預傾角關係圖[9]	14
圖 2.4 單層液晶光徑圖	15
圖 2.5 入射角與相位延遲值關係圖	17
圖 2.6 光入射液晶盒光徑圖	18
圖 2.7 入射光與光軸角度關係圖	19
圖 2.8 單道光入射一空液晶盒示意圖	22
圖 3.1 光學量測系統示意圖	27
圖 3.2 液晶 E7 參數值與模擬數值	30
圖 3.3 LCD Simulation 模擬結果圖	30
圖 3.4 POSS/PI 配向膜與水平垂直配向膜之混合配向樣品示意圖	31
圖 3.5 兩 POSS/PI 配向膜混合配向樣品示意圖	32

圖 4.1 高預傾角 90° 求其低預傾角之 χ 值關係圖	34
圖 4.2 三種高預傾角角度下其低預傾角 χ 值分布圖($\phi=50^\circ$)	35
圖 4.3 三種高預傾角角度下其低預傾角 χ 值分布圖($\phi=40^\circ$)	35
圖 4.4 光入射角與相位延遲值關係圖	37
圖 4.5 不同公式下其 χ 值與低預傾角關係圖	38
圖 4.6 高預傾角 90° 求其低預傾角之 χ 值關係圖(公式 4-3)	39
圖 4.7 低預傾角($0^\circ\sim 30^\circ$)與 χ 值關係圖	40
圖 4.8 低預傾角($40^\circ\sim 90^\circ$)與 χ 值關係圖	41
圖 4.9 高預傾角 90° 求其低預傾角之 χ 值關係圖(公式 4-6)	42
圖 4.10 低預傾角 1.7° 求其高預傾角之 χ 值關係圖(公式 4-3)	48
圖 4.11 高預傾角($20^\circ\sim 40^\circ$)與 χ 值關係圖(公式 4-3)	49
圖 4.12 光入射角與相位延遲值關係圖	51
圖 4.13 不同公式下其 χ 值與高預傾角關係圖	52
圖 4.14 高預傾角($20^\circ\sim 40^\circ$)與 χ 值關係圖(公式 4-7)	53
圖 4.15 三種低預傾角角度下其高預傾角 χ 值分布圖($\phi=50^\circ$)	55
圖 4.16 三種低預傾角角度下其高預傾角 χ 值分布圖($\phi=40^\circ$)	56
圖 4.17 光入射角與相位延遲值關係圖	57
圖 4.18 不同公式下其 χ 值與高預傾角關係圖	58
圖 4.19 偏光顯微鏡下間隙物之照片	65
圖 4.20 偏光顯微鏡下間隙物之照片	66

第一章 緒論

1.1 前言

平面顯示器產業的產生是由於液晶的特殊光電性質所導致，不斷發展的液晶材料在目前已經被廣泛而大量的使用在顯示器上，雖然液晶的顯示器技術發展及運用是近 30 年來的事，但液晶的發現卻可追溯到 100 多年前。在西元 1888 年，當時的奧地利植物學家 F. Reinitzer 從膽固醇的安息香酸與醋酸的酯化物中觀察到奇特的現象，此酯化物的化學結構如圖 1.1 所示，他將此酯化物加熱至 145.5°C 時晶體開始溶化並得到一種白色混濁的液體，繼續加熱至 178.5°C 時，此液體突然變得清亮透明，他經過反覆地實驗後確認此一現象並不是偶然發生的，他發表了實驗結果，並將樣品送至德國經由物理學家 O. Lehmann 觀察。在西元 1889 年 Lehmann 以控溫系統式的偏光顯微鏡觀察此白濁液體，發現在光學性質上具有各向異性(anisotropy)結晶體所特有的雙折射特性(birefringence)[1]，此看來像液體且能自由流動的物質竟然能同時具有固體相中的特性，因此將這具有固態晶體的光學性質及液體的流動特性的材料稱作『液晶』。

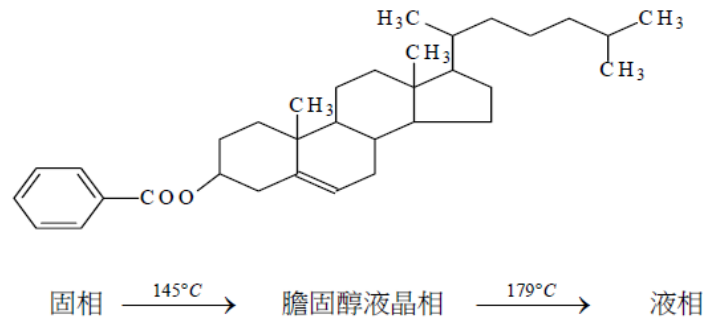


圖 1.1 安息香酸膽固醇酯之化學結構

到了西元 1960 年代中，液晶的光學性質漸漸的被研究瞭解，而許多應用性的論文也陸續被發表，不過此時這些液晶的研究尚未與顯示元件作結合，直到了西元 1963 年，在液晶的光學性質上觀察到當電場作用在液晶分子上，液晶材料會由透明的狀態轉變成不透明[2]，而這個發現又一直到了西元 1968 年才由 Heilmeyer 等人發表出來，並將此一特性開始往顯示器的應用上發展[3]，此後液晶顯示便開始蓬勃發展。

1.2 液晶的基本物理性質

目前液晶顯示器所使用的液晶類型幾乎都是長條狀的向列型液晶，在此我們討論的對象就以此類液晶為主。由於分子結構及排列的關係，液晶的物理性質均存有所謂的「異向性」(anisotropy)，也就是說量測其物理性質時，分子長軸方向與其他方向的量測值相異。以下介紹幾種液晶異向性物理性質：

1.2.1 秩序參數(order parameter)

秩序參數[4] 是分子排列整齊度的重要指標，而液晶分子排列整齊與否，液晶的參數與性質都受其影響，在液晶光電的應用非常重要。

一般而言，秩序參數以 S 來定義之：

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle \quad (1-1)$$

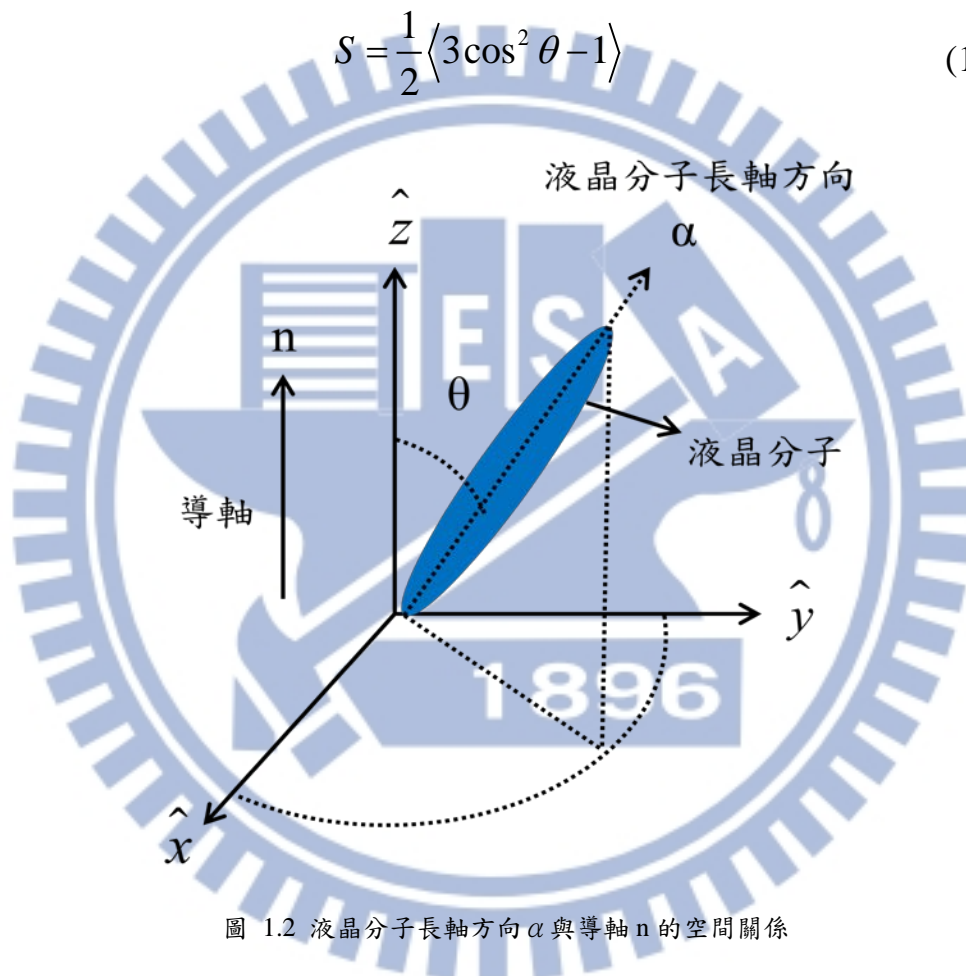


圖 1.2 液晶分子長軸方向 α 與導軸 n 的空間關係

其中，如圖 1.2 所示，分子優先定向的單位向量定為導軸 n ，而液晶的長軸方向為 α ，並且與主軸偏離 θ 角，而公式(1-1)中記號 $\langle \rangle$ 表全部空間的平均值，作為液晶配向秩序性的量度，若是平均角度越接近零，則配向的秩序性越高，反之，代表秩序性越低。因此若液晶分子長軸排列方式為完全無序，如同等向性的液體， $S = 0$ ；若所有的分

子長軸均和導軸方向完全平行，則 $S = 1$ ；一般向列型液晶的秩序參數約在 $0.4 \sim 0.6$ 的範圍。

1.2.2 雙折射率 (birefringence)

液晶分子因本身結構的異向性，導致光波在液晶中行進的速度不同，又因折射率受光波行進速度的影響，進而造成液晶折射率的異向性。因此，當光線從不同的角度入射或其偏振方向有所不同時，經過液晶分子所感受到的折射率都會不一樣，此種現象又稱之為雙折射 (birefringence) [5]。

當入射光之電場方向與光軸方向垂直，其入射光所見折射率為 n_o ，稱為尋常光折射率 (ordinary refractive index; o-ray)；如入射光之電場方向與光軸方向平行，則入射光所見之折射率為 n_e ，此稱之為非尋常光折射率 (extraordinary refractive index; e-ray)，而折射率異向性差 $\Delta n = n_e - n_o$ ，如圖 1.3 所示。

若入射光之偏極方向與光軸方向夾 θ 角時則入射光所見之折射率為 $n_{\text{eff}}(\theta)$ [6]，此稱之有效折射率 (effective refractive index)，其關係式為：

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta}} \quad (1-2)$$

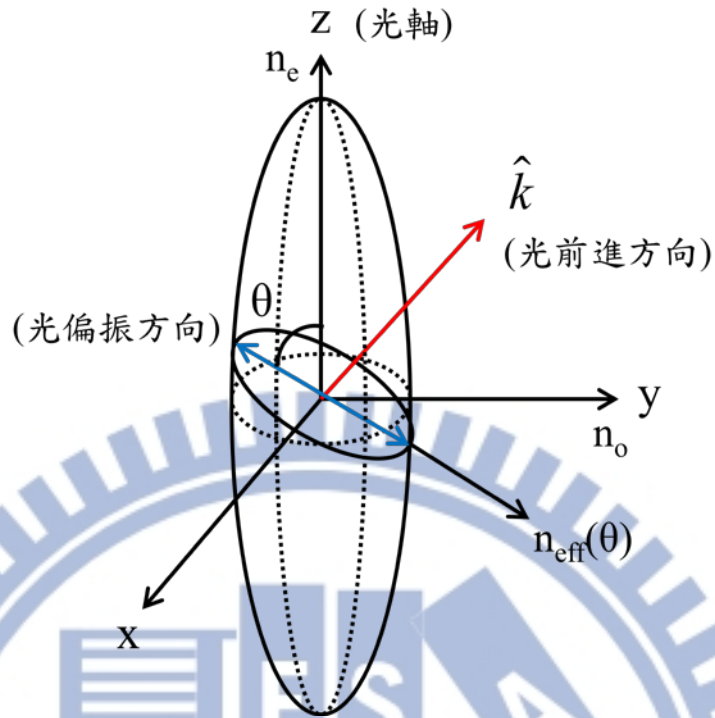


圖 1.3 單軸液晶之折射率異向性示意圖

如圖 1.4 所示，尋常光為球面，非尋常光為橢圓。那麼當 $n_e > n_o$ ，則 $\Delta n > 0$ ，所以將此液晶稱為正單光軸液晶；反之，若是 $n_e < n_o$ ，則 $\Delta n < 0$ ，所以將此液晶稱為負單光軸液晶。

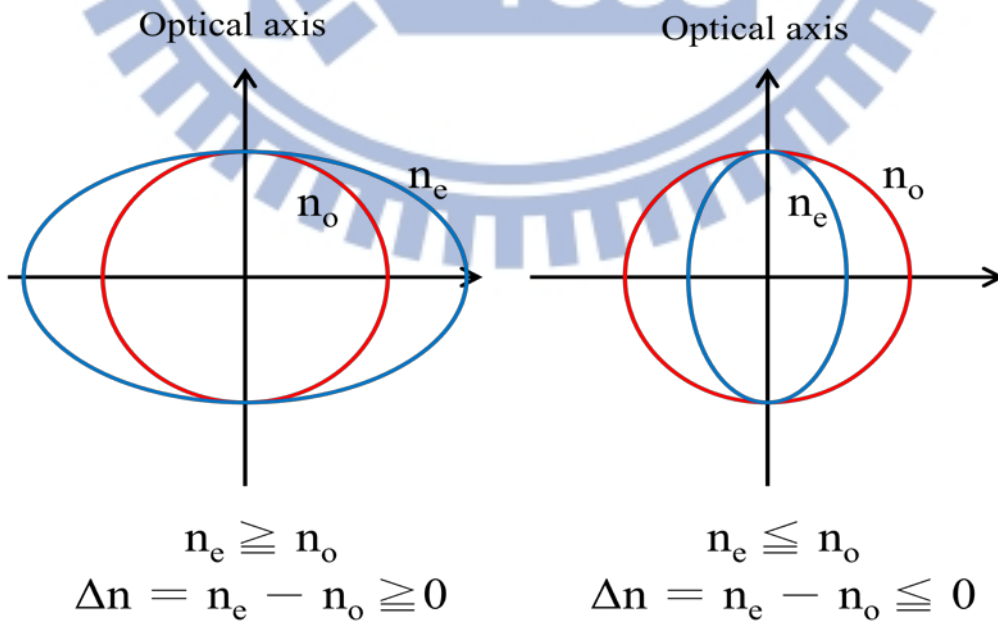


圖 1.4 單光軸介質的折射率橢圓示意圖

1.2.3 介電常數(dielectric constant)

當液晶分子受外加電場作用時，會使液晶分子排列發生轉移，並使其光學性質產生變化，此乃液晶分子水平方向介電率($\epsilon_{//}$)與垂直方向介電率(ϵ_{\perp})不同所致，此稱為介電率異向性(dielectric anisotropy) [4]，如式(1-3):

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp} \quad (1-3)$$

而液晶的 $\Delta\epsilon$ 與液晶的分子結構相關聯，使其值有正有負，當 $\Delta\epsilon > 0$ 之液晶稱為正型液晶，若外加大於某一程度的電壓($E > E_c$)時，液晶分子長軸會與電場方向平行排列；反之， $\Delta\epsilon < 0$ 之液晶稱為負型液晶，而當外加大於某一程度的電壓時，液晶分子長軸會與電場方向垂直排列，如圖 1.5 所示。

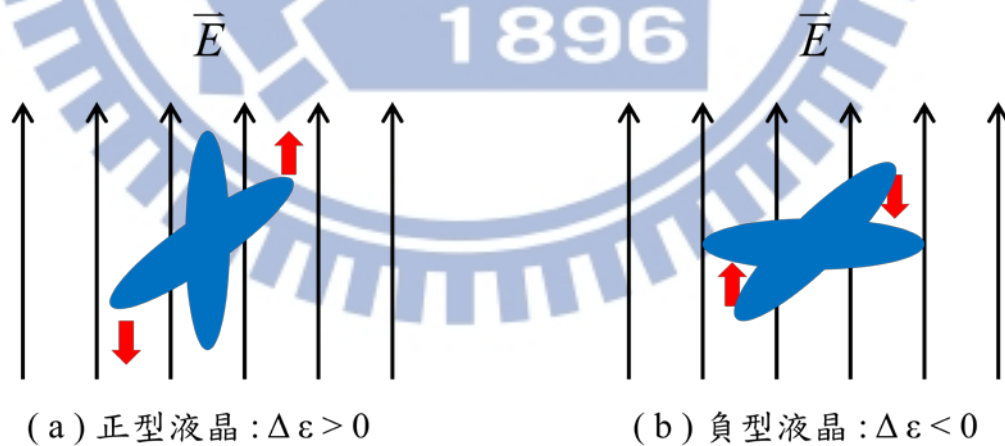


圖 1.5 正型與負型液晶在電場中的扭轉示意圖

而其所形成的原因，可以從這個理論去說明。當受到外加電場的作用時，電場對每單位體積貢獻的自由能 F_e [6] 可寫成:

$$F_e = -\frac{1}{4\pi} \int \bar{D} \cdot d\bar{E} = -\frac{\epsilon_{\perp}}{8\pi} \bar{E}^2 - \frac{\Delta\epsilon}{8\pi} (\hat{n} \cdot \bar{E})^2 \quad (1-4)$$

由上式可看出電場所貢獻的自由能與導軸有關，而自由能需最低才能形成穩定態，因此，當 $\Delta\epsilon > 0$ 時，外加電場將使液晶分子作平行電場的方向排列，自由能才能達到最低；同樣地，當 $\Delta\epsilon < 0$ 時，外加電場將使液晶分子作垂直電場的方向排列，而達到穩定態。

1.2.4 彈性係數(elastic constant)

由於液晶分子軸方向的變化非常微弱且具彈性，所以適用於連續彈性體理論，因此當液晶分子受到外力而變形時，可視為是受某種程度作用力而對應變化的連續彈性體，當向列型液晶之分子排列受到外在的應力、電場或磁場作用而發生型變，其型變的方式可分為擴展型 (splay)、扭轉型 (twist) 及彎曲型 (bend) 三種類[5]，如圖 1.6 所示。

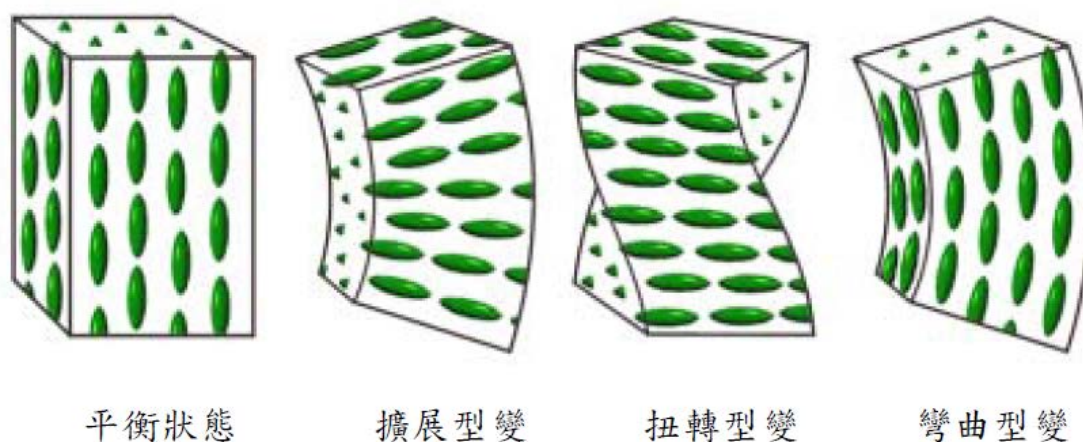


圖 1.6 向列型液晶主要型變的種類[5]

其中 k_{11} 、 k_{22} 、 k_{33} 分別代表此擴展、扭轉、彎曲型變的彈性係數，其大小關係為 $k_{33} > k_{11} > k_{22}$ ；而有一外力施加於液晶分子時，其單位體積內的彈性自由能 F_d [6] 為：

$$F_d = \frac{1}{2} [k_{11}(\nabla \cdot \hat{n})^2 + k_{22}[\hat{n} \cdot (\nabla \times \hat{n})]^2 + k_{33}(\hat{n} \times \nabla \times \hat{n})^2] \quad (1-5)$$

結合電場對系統所貢獻的自由能 F_e (式 1-4) 和受外力造成形變的彈性自由能 F_d (式 1-5)，以及邊界條件配向束縛力所貢獻的介面作用自由能 F_s (與基板表面的配向處理有關)，可得總自由能

$$F = F_e + F_d + F_s \quad (1-6)$$

藉由最小化的總自由能，可以推得液晶樣品在各種條件下液晶分子的排列情形。

1.3 預傾角 (pretilt angle) 定義與形成

由於本論文主要是研究量測預傾角的方法，所以在此小節對預傾角的定義與形成加以介紹說明。

長棒狀的液晶分子，使其被控制在塗佈過 PI 配向膜的玻璃基板上，其主要的相對位置如圖 1.7 所示，其中 φ 角為投影在基板上的方位角，而此角度會與摩擦配向的方向相同，亦即是配向方向；而圖中的 θ_p 角，其液晶分子與配向膜邊界表面上光軸與表面的夾角，就是所謂的預傾角，此實際在樣品內的情況如圖 1.8 所示。預傾角是影響 LCD 顯

示特性的重要參數，其預傾角的控制主要取決於 (1)配向膜與液晶的作用力，如氫鍵 (hydrogen bond)、凡德瓦力 (Vander Waals force)；(2)機械力效應，即摩擦配向強度或配向膜表面型態。

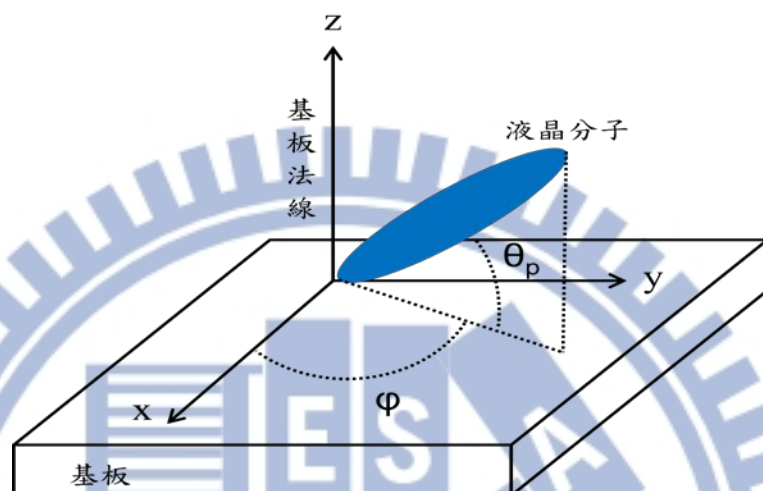


圖 1.7 液晶分子在玻璃基板上的相對位置

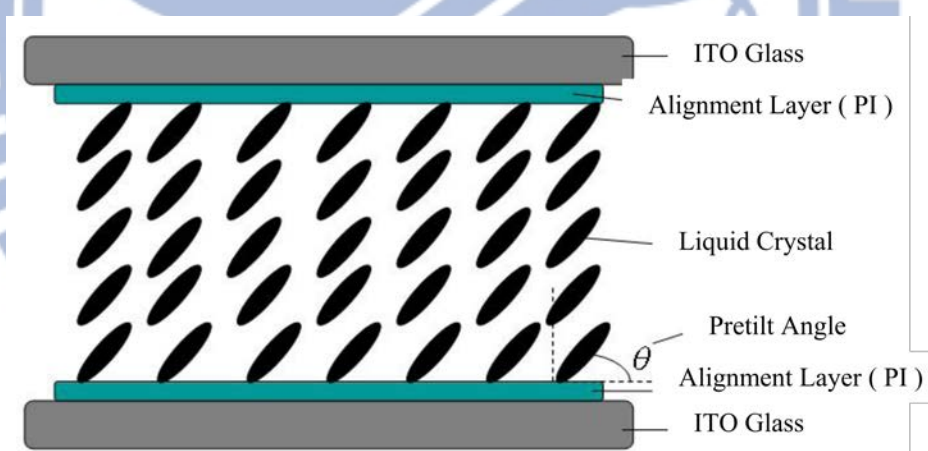


圖 1.8 液晶分子在樣品內的排列情形

而預傾角對於液晶樣品是非常重要的特性，若是完全水平配向無預傾角情況下，施加電壓後，可能會發生液晶分子站立方向不同，而有預傾角下，則無此情況發生，因此預傾角對於防止施加電壓於液晶元件後，產生反向扭轉的配向不良情況來說相當重要，圖 1.9 表示其

存在與否的差異。

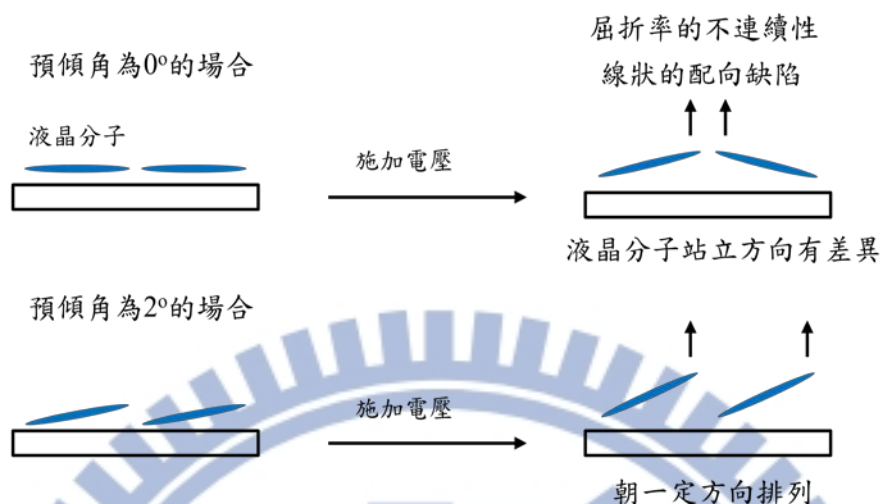


圖 1.9 預傾角存在與否的差異

1.4 研究動機

在液晶顯示器中，液晶分子的預傾角會和配向膜的表面能量關係密切，而對於顯示器的各項光電特性都有很大的影響，例如：起始電壓（ V_{th} ）、操作電壓（operating voltage）、光穿透率、對比度等，因此若能準確的量測液晶層預傾角，對於液晶顯示器的設計及製造會有很大的幫助。

而目前相當熱門的半穿半反顯示器，其主要的製作原理是利用光學配向（photoalignment）方法和電控雙折射（electrically controlled birefringence）機制來製作，將光配向劑以適當的比例與液晶混合後，在光配向時外加 curing 電壓並利用光罩控制 UV 曝光時間，使其在穿

透區形成較低的預傾角達到 π 相位延遲，反射區形成較高的預傾角相位延遲為 $\pi/2$ ，而形成這種半穿半反的效果。由於這種顯示器在穿透區與反射區的預傾角是不同的，所以是屬於混合配向預傾角，而目前現有的預傾角量測公式，像是相位延遲極值法或是晶體旋轉法，皆是應用於傾斜配向的預傾角量測，即液晶樣品上下兩面之預傾角為同一角度，但對於混合配向，即上下兩面預傾角隨意混合搭配而成的樣品，便無公式可將兩面角度同時量測，因此我們希望對這種混合配向的液晶樣品，推導出一個新的計算公式，藉由量測出樣品的相位延遲值代入公式計算後，便可同時得知其高低預傾角，對此我們也設計了一套完整的實驗架構進行驗證，確定此公式求得的解是準確的。

其本論文的架構，第一章先對液晶基本物理性質，以及預傾角的定義作出解釋；在第二章中，我們對於本論文中所應用到的研究方法文獻資料詳細探討；第三章針對實驗的製備與架構以及研究方法加以說明；第四章將演算出的公式先模擬推導，確定在各角度混合下計算的準確性並對公式加以修正，以及探討我們的實驗結果；最後第五章作出結論與未來展望。

第二章 相關研究與文獻探討

2.1 調變預傾角之方法

由於預傾角會影響液晶顯示中許多光學性質，所以若是可以隨意調變其預傾角，便可進而控制我們所需應用的光學性質，因此許多調變預傾角的方法被研究出來，如：聚亞醯胺(PI)的混合[7]、雙層配向法[8]、以及本研究中所應用到的摻雜 POSS (polyhedral oligomeric silsesquioxane) 奈米粒子於聚亞醯胺(PI)中[9]的方法等，都是目前熱門的研究方向，這邊我們就介紹本論文中所應用的摻雜 POSS 奈米分子的方法。

2.1.1 摻雜POSS奈米分子於聚亞醯胺(PI)[9]

本論文所使用來控制預傾角的方法，即利用在傳統的配向膜聚亞醯胺(PI)材料中摻雜 POSS (polyhedral oligomeric silsesquioxane) 奈米粒子，利用 POSS 摻雜的比例和摩擦配向的摩擦強度達到調變預傾角的效果，其主要的原理是藉由 POSS 去改變其水平配向膜的表面能，由於 POSS 的垂直配向趨勢與水平配向膜的表面能相互競爭，因此加入不同濃度的 POSS 即會達到不同預傾角的結果[9]。

文獻中的實驗製程，使用的液晶為 E7，其 POSS 與水平配向膜混合之後，先將玻璃進行 100°C 預熱 10 分鐘，之後使用旋轉塗佈機將配向膜鍍在 ITO 玻璃上，再在 180°C 的溫度下硬烤 1 小時，最後再將此

玻璃摩擦配向，即可組成樣品，而本研究的製程參數也多是參考本篇文獻所述。

在此樣品的實驗結果中，可以從晶體旋轉法得到其預傾角，以及可在摩擦配向後的 ITO 玻璃上滴上蒸餾水，量測其水滴與玻璃之接觸角，再根據 Girifalco-Good-Fowkes-Young model 方法去計算出表面能，最後的表面能量測結果在圖 2.1 可看到，其接觸角隨著 POSS 摻雜比例的增加而變大，表面能則隨之變小，意謂著由於 POSS 的加入因而改變其表面配向膜的配向趨勢。

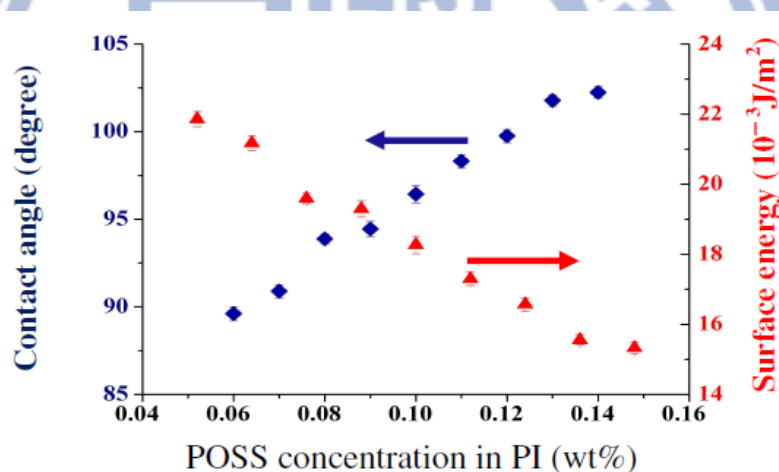


圖 2.1 POSS/PI 配向膜表面與蒸餾水接觸角度以及計算出表面能和 POSS 濃度之關係圖[9]

在圖 2.2 中為液晶樣品在偏光顯微鏡下所拍攝的照片，其中顏色的不同是由於不一樣的預傾角造成不同的相位延遲(phase retardation)，從圖中可看出利用 POSS 去調變預傾角，其製作出的液晶樣品是非常均勻的，最後在圖 2.3 中展現出其 POSS 摻雜比例與預傾角的關係，可看出此預傾角的調變範圍是非常寬的，POSS 濃度在 0 到 0.16 wt %

中就可使角度在 $0^\circ < \theta_p < 90^\circ$ 中進行調變，隨著濃度變高而預傾角隨之而升高，並且可藉著摩擦配向的深度去搭配出預傾角的控制，隨著摩擦強度的增加而使預傾角下降，本論文研究也利用此結果去作為我們的實驗方法。

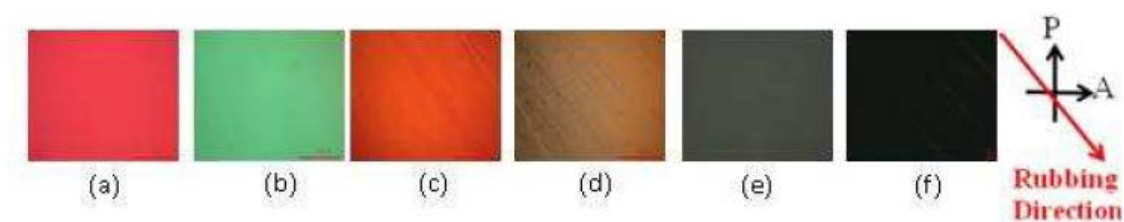


圖 2.2 偏光顯微鏡下摻雜不同濃度 POSS 於 PI 中之液晶盒顏色變化圖: [9]

(a) 0.05% , (b) 0.08% , (c) 0.10% , (d) 0.11% , (e) 0.12% , (f) 0.14%

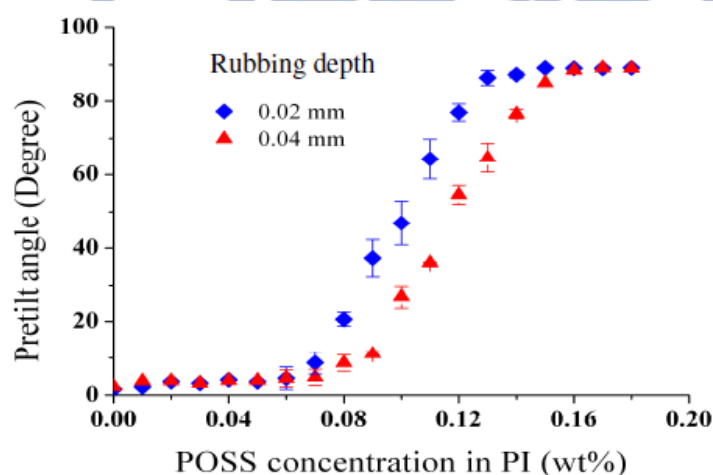


圖 2.3 兩種深度摩擦配向下 POSS 濃度與預傾角關係圖[9]

2.2 預傾角量測之原理

預傾角一直是液晶樣品中重要的參數之一，其角度的大小與許多光學性質相關，因此量測預傾角的方法一直都是很重要的研究，而最常見的兩種方法就是光學相位延遲極值法和旋轉晶體法，底下就針對

兩種方法分別探討說明。

2.2.1 光學相位延遲極值法

光學相位延遲極值法[10]，是利用旋轉液晶樣品，改變其入射光與樣品的夾角，利用最大或最小的相位延遲發生時的入射光角度與樣品內液晶分子預傾角間的關係式，進而求出此預傾角大小，此方法較適用於去量測水平 $0^\circ \sim 10^\circ$ 和垂直 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的預傾角，其理論模型如下：

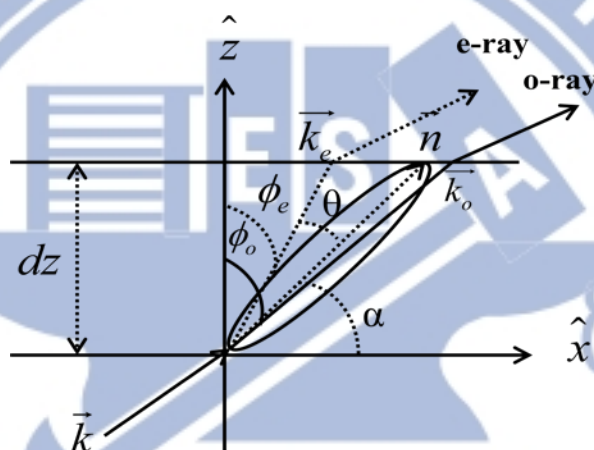


圖 2.4 單層液晶光徑圖

液晶其雙折射性，以不同的極化方向可分為尋常光(ordinary ray；o-ray)與非尋常光(extraordinary ray；e-ray)，而分別對應的折射係數為 n_o 與 $n_e(\theta)$ ， θ 為光軸與非尋常光波向量的夾角。為計算 o-ray 與 e-ray 穿過樣品所造成的光相位差 φ ，先將樣品沿 z 軸分割成許多層，假設每一層內的液晶分子指向皆為同向，在 adiabatic following 的條件成立下，每一層光的偏極方向會隨液晶分子指向旋轉，因此 o-ray(或 e-ray) 由某一層進入下一層仍然是 o-ray(或 e-ray)。則 o-ray 與 e-ray 之間的

相位延遲可表示為

$$\varphi(\phi) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_\theta(z) - n_o] dz \quad (2-1)$$

$$\hat{n} = (\cos \alpha, 0, \sin \alpha) = (n_x, n_y, n_z) \quad (2-2)$$

$$\vec{k} = (\sin \phi, 0, \cos \phi), \vec{k}_e = (\sin \phi_e, 0, \cos \phi_e), \vec{k}_o = (\sin \phi_o, 0, \cos \phi_o) \quad (2-3)$$

$$\cos \theta = \hat{n} \cdot \vec{k}_e = \cos \alpha \sin \phi_e + \sin \alpha \cos \phi_o \quad (2-4)$$

再由 Snell's Law

$$1 \cdot \sin \theta = n_o \sin \theta_o = n_e \sin \theta_e \quad (2-5)$$

故可推得有效折射率 $n_\theta(z)$

$$n_\theta(z) = \frac{n_e}{\sqrt{\left[\left(\frac{n_e}{n_o}\right)^2 - 1\right] \cos^2 \theta + 1}} \quad (2-6)$$

如圖所示，可得知 o-ray 與 e-ray 所行之光程分別為

$$l_e = \frac{n_\theta dz}{\cos \phi_e} + (\tan \phi_o - \tan \phi_e) \sin \phi dz \quad (2-7)$$

$$l_o = \frac{n_o dz}{\cos \phi_o} \quad (2-8)$$

所以從上兩式可求出光程差為

$$l_e - l_o = \left(\frac{n_\theta}{\cos \phi_e} - \frac{n_o}{\cos \phi_o} \right) dz + (\tan \phi_o - \tan \phi_e) \sin \phi dz \quad (2-9)$$

再由(2-4) (2-5) (2-6)式代入(2-9)式，可得

$$\varphi(\phi) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d F dz \quad (2-10)$$

$$F = \frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \phi}{c^2} + \frac{n_e n_o}{c} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \phi}{c^2}} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \phi}$$

$$c^2 = n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha$$

當相位差發生極值 $\frac{\partial \varphi(\phi)}{\partial \phi} = 0$ 時，預傾角 α 約為一常數，因此得到 φ 極值所對應到的 ϕ_x 角，利用極角和預傾角為互餘角關係，因此可求出此預傾角大小。

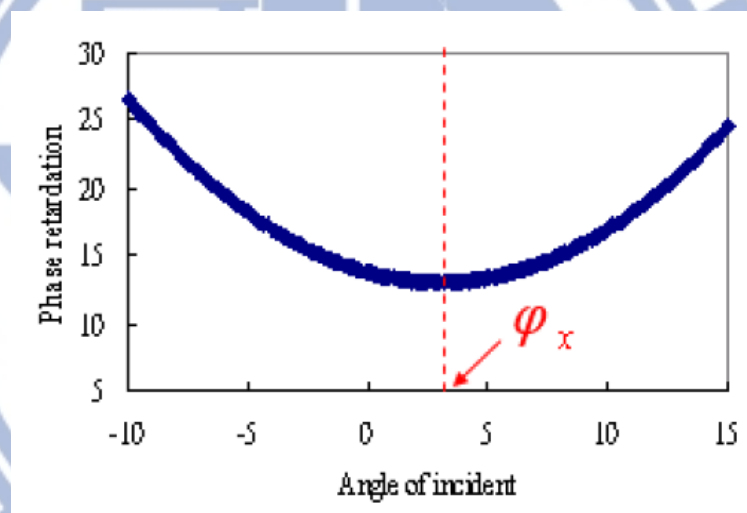


圖 2.5 入射角與相位延遲值關係圖

2.2.2 旋轉晶體法

對於去量測接近水平 $0^\circ \sim 10^\circ$ 和垂直 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的預傾角，我們通常會使用相位延遲極值法來求，但在 10° 到 70° 的角度，由於極值所對應的 ϕ_x 角太大，取值上比較困難以及準確度也較低，因此我們另外找出一種旋轉晶體法[11][12]，並推導出另一公式，利用量測幾組不同入射角下的相位延遲 (phase retardation)，代入公式求得其預傾角，以下

為其推導的理論模型：

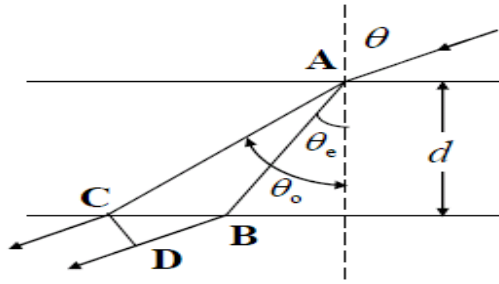


圖 2.6 光入射液晶盒光徑圖

從圖 2.6 上可看出入射光進入 A 點後好像分成了路徑 \overline{AC} 以及 \overline{ABD} 兩路徑，其相位差可表示成：

$$\varphi(\theta) = k n'_e \overline{AB} + k \overline{BD} - k n_o \overline{AC} \quad (2-11)$$

其中，

$$\begin{aligned} \overline{AB} &= d \sec \theta_e, \quad \overline{AC} = d \sec \theta_o \\ \overline{BD} &= (\overline{AC} \sin \theta_o - \overline{AB} \sin \theta_e) \sin \theta \\ &= [(d \sec \theta_o) \sin \theta_o - (d \sec \theta_e) \sin \theta_e] \sin \theta \\ &= d (\tan \theta_o - \tan \theta_e) \sin \theta \end{aligned}$$

所以，

$$\varphi(\theta) = kd(n'_e \sec \theta_e + \tan \theta_o \sin \theta - \tan \theta_e \sin \theta - n_o \sec \theta_o) \quad (2-12)$$

又由 Snell 定理：

$$1 \cdot \sin \theta = n_o \sin \theta_o = n_e \sin \theta_e$$

我們可以得到相位差與入射角的關係式為：

$$\varphi(\theta) = kd(n'_e \cos \theta_e - n_o \cos \theta_o) \quad (2-13)$$

但是上式中的入射角還是未知數，因此，再考慮入射光與光軸的

情形下，如下圖 2.7 我們可將上式繼續展開，

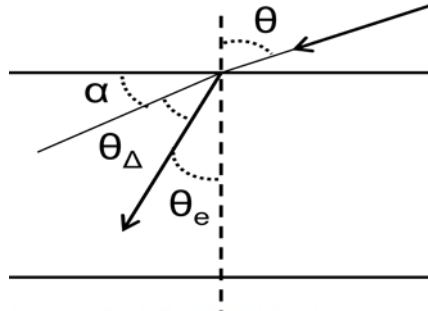


圖 2.7 入射光與光軸角度關係圖

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_e'^2} &= \frac{\cos^2 \theta_\Delta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta_\Delta}{n_e^2} \\ \frac{1}{n_e'^2} &= \frac{\cos^2[\frac{\pi}{2} - (\theta_e + \alpha)]}{n_o^2} + \frac{\sin^2[\frac{\pi}{2} - (\theta_e + \alpha)]}{n_e^2} \\ &= \frac{\sin^2(\theta_e + \alpha)}{n_o^2} + \frac{\cos^2(\theta_e + \alpha)}{n_e^2} \end{aligned} \quad (2-14)$$

且由 Snell 定理：

$$1 \cdot \sin \theta = n_e' \sin \theta_e \Rightarrow n_e' = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_e}$$

所以我們得到

$$\frac{\sin^2 \theta_e}{\sin^2 \theta} = \frac{(\sin \theta_e \cos \alpha + \cos \theta_e \sin \alpha)^2}{n_o^2} + \frac{(\cos \theta_e \cos \alpha + \sin \theta_e \sin \alpha)^2}{n_e^2} \quad (2-15)$$

乘開後為

$$\begin{aligned} 1 &= \sin^2 \theta \left[\frac{1}{n_o^2} (\cos \alpha + \cot \theta_e \sin \alpha)^2 + \frac{1}{n_e^2} (\cot \theta_e \cos \alpha - \sin \alpha)^2 \right] \\ &= \frac{1}{n_o^2} (\sin \theta \cos \alpha + \sin \theta \cot \theta_e \sin \alpha)^2 + \frac{1}{n_e^2} (\sin \theta \cot \theta_e \cos \alpha - \sin \theta \sin \alpha)^2 \end{aligned} \quad (2-16)$$

$$\text{令} \quad a = \frac{1}{n_o} \quad , \quad b = \frac{1}{n_e} \quad , \quad Z = \sin \theta \cot \theta_e \geq 0$$

則

$$\begin{aligned}
 1 &= a^2 (Z \cos \alpha - \sin \theta \sin \alpha)^2 + b^2 (\sin \theta \cos \alpha + Z \sin \alpha)^2 \\
 &= Z^2 (a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha) + \sin^2 \theta (a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha) \quad (2-17) \\
 &\quad - 2 Z \sin \theta \sin \alpha \cos \alpha (a^2 - b^2)
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 &4 c^2 [\sin^2 \theta (a^2 + b^2 - c^2) - 1] \\
 &= 4 (a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha) \{ \sin^2 \theta [a^2 + b^2 - (a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha)] - 1 \} \\
 &= 4 (a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha) \{ \sin^2 \theta [a^2 + b^2 - a^2 (1 - \sin^2 \alpha) - b^2 (1 - \cos^2 \alpha)] - 1 \} \\
 &= 4 (a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha) [\sin^2 \theta (a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha) - 1] \\
 &= \sin^2 \theta (4 a^4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + 4 a^2 b^2 \cos^4 \alpha + 4 a^2 b^2 \sin^4 \alpha + 4 b^4 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha) - 4 c^2 \\
 &= \sin^2 \theta [a^4 \sin^2 2\alpha + b^4 \sin^2 2\alpha + 4 a^2 b^2 (\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha)] - 4 c^2
 \end{aligned}$$

且

$$\begin{aligned}
 &\sin^4 \alpha + \cos^4 \alpha \\
 &= (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)^2 - 2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \\
 &= 1 - 2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \\
 &= 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\alpha
 \end{aligned}$$

最後得到，

$$\begin{aligned}
 Z &= \frac{1}{2 c^2} [\sin \theta \sin 2\alpha (a^2 - b^2) + \sqrt{4 (a^2 b^2 \sin^2 \theta - c^2)}] \\
 &= \frac{1}{c^2} (a^2 - b^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \theta + \frac{1}{c} \sqrt{1 - \frac{a^2 b^2}{c^2} \sin^2 \theta} \quad (2-18)
 \end{aligned}$$

又，

$$Z = \sin \theta \cot \theta_e = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_e} \cos \theta_e = n'_e \cos \theta_e$$

代入後可得

$$n'_e \cos \theta_e = \frac{1}{c^2} (a^2 - b^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \theta + \frac{1}{c} \sqrt{1 - \frac{a^2 b^2}{c^2} \sin^2 \theta} \quad (2-19)$$

另外，

$$n_o \cos \theta_o = \frac{1}{b} \sqrt{\cos^2 \theta_o} = \frac{1}{b} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_o} \quad (2-20)$$

及 Snell 定理，

$$1 \cdot \sin \theta = n_o \sin \theta_o \Rightarrow \sin \theta_o = \frac{1}{n_o} \sin \theta = b \sin \theta$$

因此(2-20)式可換為

$$n_o \cos \theta_o = \frac{1}{b} \sqrt{1 - b^2 \sin^2 \theta} \quad (2-21)$$

最後我們將 (2-19)和(2-21)式代入(2-13)，我們可以得到相位差與入射角的關係式為：

$$\varphi(\theta) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\frac{1}{c^2} (a^2 - b^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \theta + \frac{1}{c} \sqrt{1 - \frac{a^2 b^2}{c^2} \sin^2 \theta} - \frac{1}{b} \sqrt{1 - b^2 \sin^2 \theta} \right]$$

將 a, b, c 參數全部以 n_e, n_o 代換後，關係式為

$$\varphi(\theta) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \theta}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha} + \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}} \cdot \left[\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \theta} \right] \right] \quad (2-22)$$

所以相位延遲率 φ 主要與入射光波長 λ 、液晶盒的間距 (cell gap) d 、入射角度 θ ，以及預傾角 α 這些參數相關，而其中入射光波長 λ 、角度 θ 皆可從量測中得知，因此我們將量測出的正負 θ 的相位延遲率

相減，而得到

$$\varphi_{\pm\theta} = \frac{4\pi d}{\lambda} \left[\frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin |\theta|}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha} \right] \quad (2-23)$$

最後再將(2-22)除以(2-23)式 $f(\alpha) = \frac{\varphi_\theta}{\varphi_{\pm\theta}}$ ，由於 n_e 、 n_o 已知，以及 d

因為兩式相除而消掉後，我們即可求出預傾角。

2.3 液晶盒的間距量測之原理

兩束或多束光相互疊加，在每一處的總照度不會都是各束光所產生的照度之和，而是有的地方極大有的地方極小的情形，此稱之為干涉，那我們就可以利用光的干涉現象，來量測該兩玻璃間之空氣薄膜厚度即液晶盒的間距 (cell gap) [13]。

如圖 2.8 將一道光以角度 θ 射入兩平行玻璃之間，透射光 A 和經過兩次玻璃反射的透射光 B 之光程差為 $2d/\sin \theta$ 。

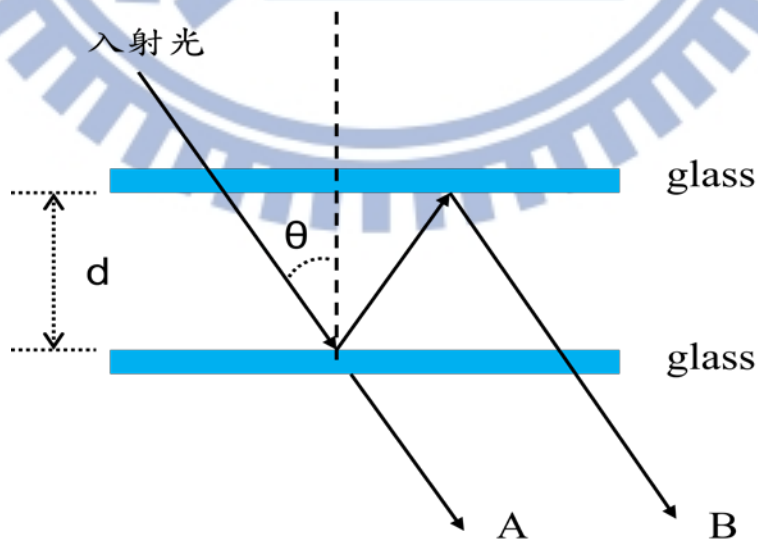


圖 2.8 單道光入射一空液晶盒示意圖

如果 A 與 B 維持同調，則光在空氣薄膜產生建設性干涉 (constructive interference) 時，可以得到最大穿透率，若是破壞性干涉 (destructive interference)，則得到最小穿透率，其條件分別為：

$$\text{建設性干涉: } 2d/\sin \theta = m \lambda$$

$$\text{破壞性干涉: } 2d/\sin \theta = (m+1/2) \lambda \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

今將入射光正向垂直打在空液晶盒上，此時光程差為 $2d$ ，當出射光行程建設性干涉時必須滿足其條件 $2d/\sin \theta = m \lambda$ ，則取之兩相鄰造成最大穿透率之波長 λ_j 、 λ_{j+1} ，將之代入，利用下面公式(2-24)[14] 即可求出其間距。

$$2d \left| \frac{1}{\lambda_j} - \frac{1}{\lambda_{j+1}} \right| = 1 \quad (2-24)$$

第三章 實驗配置與架構

3.1 實驗樣品製備

3.1.1 配向膜參雜奈米粒子(POSS)之製備

- (一)以 POSS 與水平配向膜(AL-58)取適當的比例調配成 0.2%之配向膜，使用破碎機四小時加以均勻混合。
- (二)混合後之配向膜，經由過濾之後即完成配置。
- (三)在之後的製程中，對於我們所需的比例之配向膜，可再加入水平配向膜加以稀釋，以達到我們所要的 POSS 濃度，接著放入震盪器震 1 小時即可進行塗佈製程。

3.1.2 樣品製作流程

(一)清洗玻璃基板

- (1)利用玻璃切割器，將 ITO 玻璃基板切成 25mm X 25mm 之正方，並放入置具中。
- (2)將置具放入調配好的中性清潔劑，並利用超音波震盪器震盪 15 分鐘，之後用去離子水將殘餘之清潔劑沖掉，再加入去離子水至置具中，再次震盪 15 分鐘後，用去離子水作沖洗。
- (3)之後再依序加入丙酮、異丙醇重複步驟 2 後半部之動作完成清洗階段。
- (4)用氮氣吹乾玻璃表面，再放入 90°C 烘箱中烘烤完成玻璃製備。

(二)配向膜之塗佈

- (1)用氮氣吹乾淨玻璃表面，將玻璃置於旋轉塗佈機之轉軸上，開啟真空幫浦將玻璃吸住。
- (2)用滴管將配向膜溶液滴上五滴於玻璃表面。
- (3)依照配向膜特性，調整自旋塗佈之轉速，而本實驗所使用的塗佈參數如表 3.1 所示。
- (4)完成自旋塗佈後，必須按照配向膜之類型，設定不同的硬烤時間和溫度，本實驗所使用的配向膜，其水平配向膜以及垂直配向膜皆進行硬烤 180°C 60 分鐘，另水平配向膜摻雜入 POSS 之配向膜同樣硬烤 180°C 240 分鐘。

表 3.1 配向膜塗佈參數

	時間	轉速
Step 1	10s	1000rpm
Step 2	40s	4000rpm

(三)摩擦配向

- (1)裝上其配向膜所搭配之摩擦絨布滾輪，調整滾輪之轉速和滾動方向。
- (2)將已塗佈上配向膜的玻璃基板置於摩擦配向機的平台，並調整其配向方位。

- (3)調整其所需的摩擦深度，按下自動開關鍵，即完成摩擦配向。
- (四)利用甲醇溶入適當直徑(9 μm)之間隙物(spacer)，使用噴霧器將間隙物均勻地灑至已完成摩擦配向的玻璃基板上。
- (五)將兩片玻璃基板依照其配向方向以相反方向覆蓋在一起，上下各留下約0.5mm的寬度外接電極，左右邊緣使用AB膠將其黏合，用魚尾夾將四邊固定2小時使其AB膠完全固化。
- (六)固化後的液晶空樣品，從上下缺口利用毛細作用以及地心引力驅使灌入液晶(E7)，完成後再將上下缺口以AB膠黏合，最後放置加熱平台上以80 $^{\circ}\text{C}$ 退火十分鐘後，則液晶樣品製作完成。

3.2 實驗光路之配置

本論文中是使用 Zeeman Laser 外差干涉技術[15][16] 來量測相位延遲值，其主要的光學量測架構如圖 3.1 所示，圖中 BS 為分光鏡(beam splitter)，D1、D2 為感測器(detector)，LP1、LP2 為兩 45 度的線偏振片(line polarizer)；其實驗架構是 Zeeman Laser 打出波長 633nm 的雷射光，此光是兩互相正交，其頻率 ω_1 、 ω_2 非常相近，差頻為 2.6MHz 的線偏振光(S、P 偏振光)[17]，經由分光鏡將這道光分為兩路，其中一道光作為參考光，直接進入感測器(detector)，頻率經過外差干涉疊加後的結果，此光的頻率變為兩頻率的差($\omega_1 - \omega_2$)，此稱之為拍頻，

其光強度(I_r)為式(3-1)所示；而另一道光則作為訊號光，打入所要量測的晶體後產生了相位延遲(φ)，頻率為 $\omega_1 + \varphi_1$ 、 $\omega_2 + \varphi_2$ ，一樣經由外差干涉疊加後，頻率為 $(\omega_1 - \omega_2) + \varphi$ ， $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ ，此光強度(I_t)推導後變為式(3-2)，那麼相位計藉由這兩式計算後，便可求得其相位延遲值的大小。

$$I_r = \langle |E_r|^2 \rangle = 4E_0^2 \cos^2 \frac{1}{2} [(\omega_1 - \omega_2)t] = I_{r0} \{1 + \cos[2\pi(f_1 - f_2)t]\} \quad (3-1)$$

$$I_t = \langle |E_t|^2 \rangle = 4E_0^2 \cos^2 \frac{1}{2} [(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi] = I_{t0} \{1 + \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi]\} \quad (3-2)$$

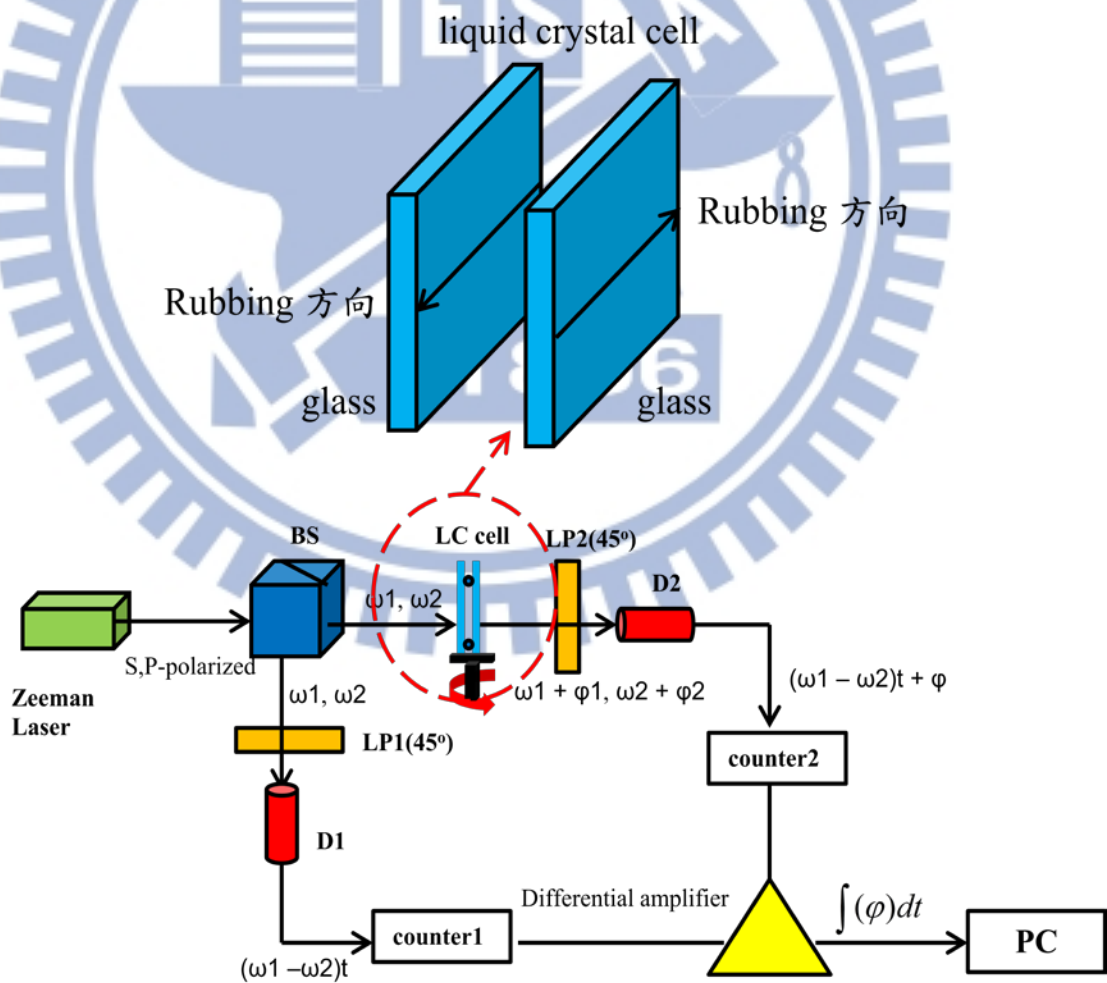


圖 3.1 光學量測系統示意圖

3.3 研究方法

3.3.1 量測公式

在量測公式上，我們是從晶體旋轉法的量測公式當作基礎，去推導出混合配向樣品的預傾角量測公式，其旋轉晶體法的公式如前一章所提出的式(2-22)與式(2-23)

$$\varphi(\theta) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \theta}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha} + \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \theta} \right] \quad (2-22)$$

$$\varphi_{\pm\theta} = \frac{4\pi d}{\lambda} \left[\frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin |\theta|}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha} \right] \quad (2-23)$$

最後再將(2-22)除以(2-23)式 $f(\alpha) = \frac{\varphi_{\theta}}{\varphi_{\pm\theta}}$ ，由於 n_e 、 n_o 已知， λ 即入射光的波長， θ 為入射角度，以及 d 因為兩式相除而消掉後，因此我們量測出相位延遲值(φ)即可求出預傾角(α)。

那麼在我們的公式中，我們首先假設其混合樣品之預傾角，從小角度到大角度會呈現線性的變化，因此我們利用 LCD Simulation 去對其樣品作模擬，其中代入的參數為我們所使用的 E7 液晶參數，如圖 3.2 所示，在樣品厚度為 9um，預傾角從 3° 到 85° 去進行模擬，從圖 3.3 中就可看到，果然如我們預期的一般，其角度的變化是呈現出線性的，因此我們的推導便可從這假設往下進行，而此公式就如式(3-3)

$$\varphi_{total}(\phi) = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \sum_{\alpha=\alpha_{low}}^{\alpha_{high}} \left[\frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \phi}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha} + \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}} \right] \cdot \left[\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \phi}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \phi} \right] \quad (3-3)$$

將此樣品分割成數層，此樣品的預傾角，是從低預傾角(α_{low})呈線性變化到高預傾角(α_{high})，把每層的相位延遲值累加起來，其中 Δd 是指分割出的每一小層之液晶盒的間距，最後就得到某入射角(ϕ)的光進入樣品後，經過每一層不同預傾角下的總相位延遲值(φ_{total})，接著和晶體旋轉法一樣，由於 n_e 、 n_o 已知， λ 即入射光的波長， ϕ 為入射角度，以及 d 會因為兩式相除而消掉，所以我們可以將正負入射角下的相位延遲值兩值相除後求出其 χ 值，其式(3-4)，再以兩 χ 值作聯立求得高低預傾角，如式(3-5)所示。

$$\chi(\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high}) = \frac{Total_Retar(-\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \quad (3-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi_1 = \frac{Total_Retar(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2 = \frac{Total_Retar(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{array} \right. \quad (3-5)$$

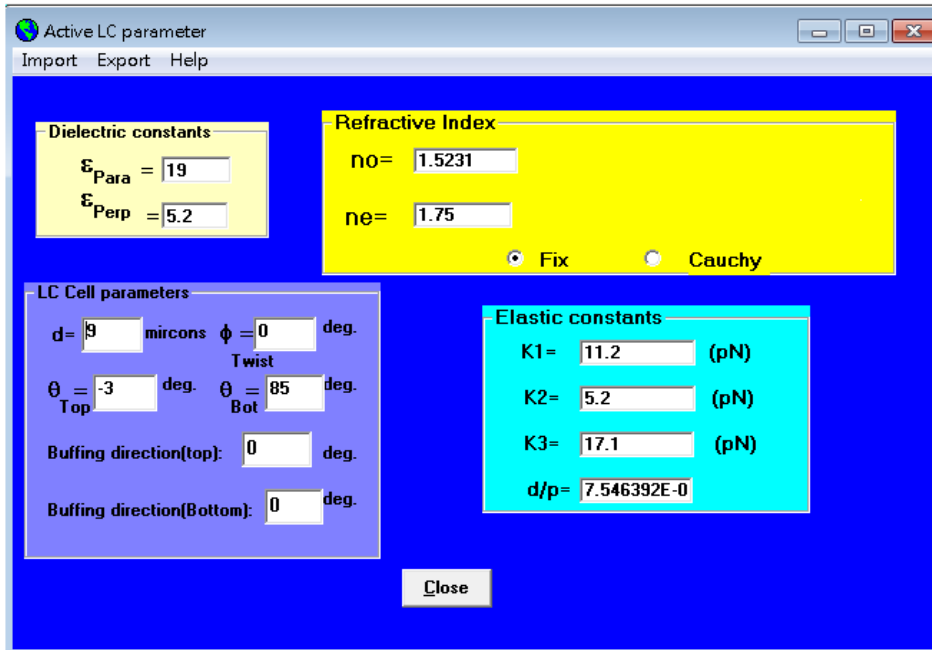


圖 3.2 液晶 E7 參數值與模擬數值

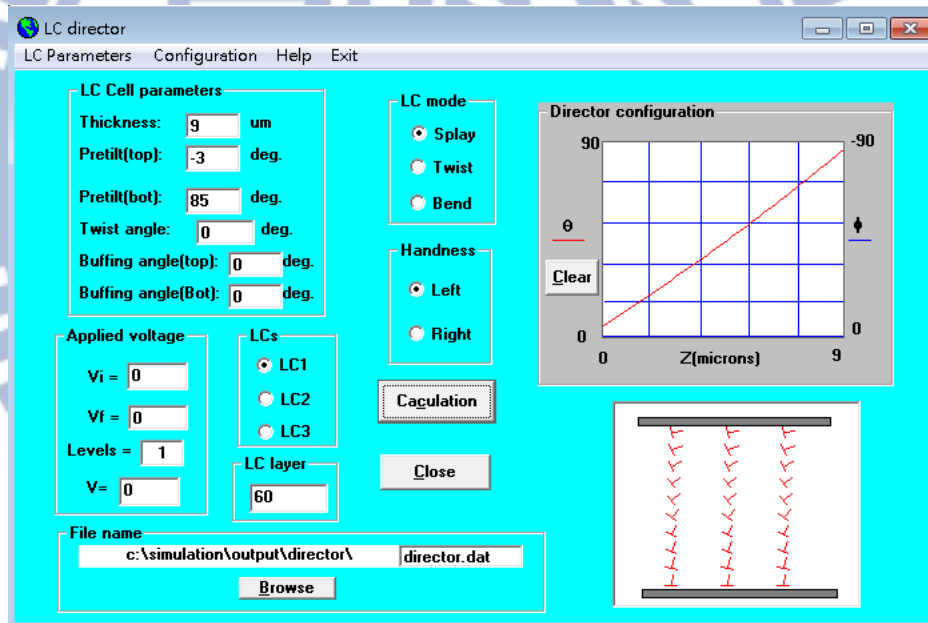


圖 3.3 LCD Simulation 模擬結果圖

3.3.2 實驗架構

在實驗上，為了逐步的驗證我們公式計算的準確性，以達到最後混合樣品的預傾角量測，我們將其分為三個階段進行研究。其中前兩個階段如以下方法去進行實驗：

(一)調變式配向膜+垂直配向膜

(二)調變式配向膜+水平配向膜

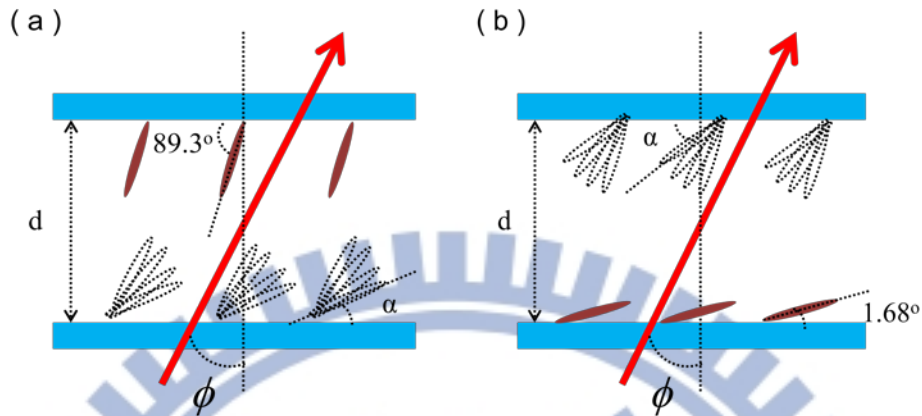


圖 3.4 POSS/PI 配向膜與水平垂直配向膜之混合配向樣品示意圖

(a) POSS/PI 配向膜+垂直配向膜；(b) POSS/PI 配向膜+水平配向膜

實驗中我們是以水平配向膜 PI 摻雜 POSS 來控制我們想要的預傾角角度，其 POSS 的摻雜比例為 0.07wt%，然後藉由控制摩擦配向的摩擦強度來對角度作改變。在每一組實驗中，我們都將其中一組樣品上下兩面玻璃基板，以我們設定的摩擦強度去對摻雜 POSS 的配向膜摩擦配向，組成一組預傾角相同的傾斜配向樣品，並以我們之前文獻中提過的晶體旋轉法，量測出其預傾角角度，以此當作對照組；之後以一樣的方式，組成一片垂直配向的樣品或者是水平配向的樣品，以相位延遲極值法量測計算，確定其預傾角角度；最後再組成一片由摻雜 POSS 的配向膜與垂直配向(水平配向)的配向膜組成的混合配向樣品，而此組樣品使用我們推導出的量測公式下去計算，可同時求出上下兩面兩不同的角度，由於此兩面的角度都已經由之前的兩組樣品，以文獻

的方法準確求出，因此可去驗證我們量測結果的準確度。並且我們在公式量測計算前，先利用 Matlab 去對我們的公式模擬推導，看其各種角度組合下對公式計算可能的影響或錯誤，並依此對公式加以修正，確保我們最後量測的可信度與準確性。

(三)混合配向樣品(Hybrid-Aligned)

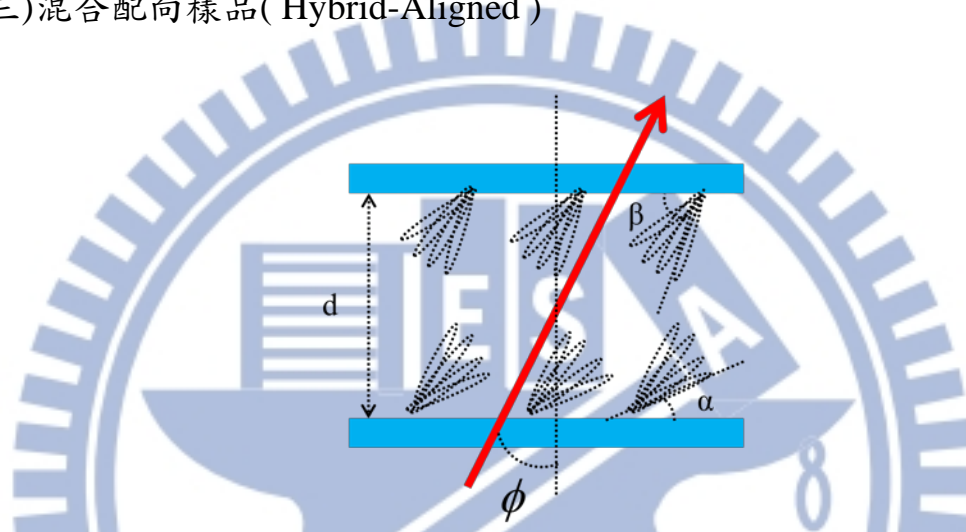


圖 3.5 兩 POSS/PI 配向膜混合配向樣品示意圖

最後，我們再將上下兩面皆由不同磨擦深度的 POSS 配向膜下去組合成樣品，以及各別兩組為上下相同預傾角的 POSS 配向膜樣品，以旋轉晶體法下去量測計算當作對照組，以驗證隨意預傾角組合而成的混合樣品，皆可利用我們的公式去準確求出，以確立本篇研究的計算方法。

由於本研究可精確量測出混合配向的預傾角，因此也可藉由量測出的精確預傾角代入理論公式，進而推導出液晶樣品間距，在最後我們也將對計算出的間距大小與量測數據加以討論。

第四章 結果與討論

4.1 調變式配向膜+垂直配向膜

4.1.1 公式討論與修正

$$\chi(\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high}) = \frac{Total_Retar(-\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \quad (4-1)$$

從我們推導出的公式(4-1)，以不同入射角量出的相位延遲值求其兩個 χ 值，理論上來說，應該就可以準確求出其預傾角，不過無法確定公式在不同預傾角混合下，是否會出現錯誤而無法求解的情況，因此我們決定先利用 Matlab 將公式進行模擬推導，找尋其可能發生的計算錯誤並將公式加以修正，以下我們就由各種特定情況下進行模擬，並在最後從我們量測出的實驗數據加以驗證其公式計算的準確性。首先我們從調變式配向膜+垂直配向膜這類樣品進行討論：

(一)高預傾角為 90° 角，求其低預傾角

由於這類樣品其中一面是垂直配向膜，所以我們先將高預傾角那一面設定為 90° 角，去對低預傾角那面進行模擬計算，看其求解的情形。從圖 4.1 可以看到，在高預傾角為 90° 角，其光入射角(ϕ)為 40° 與 50° 時，低預傾角在 0° 到 90° 之間 χ 值皆可明確的分辨，並且曲線上無平緩趨勢的區域或極值出現，因此只需準確的量測出入射角下的相位延遲值(ϕ)，便可利用公式(4-1)求出其兩 χ 值，而此兩 χ 值便能準確的

計算出預傾角。

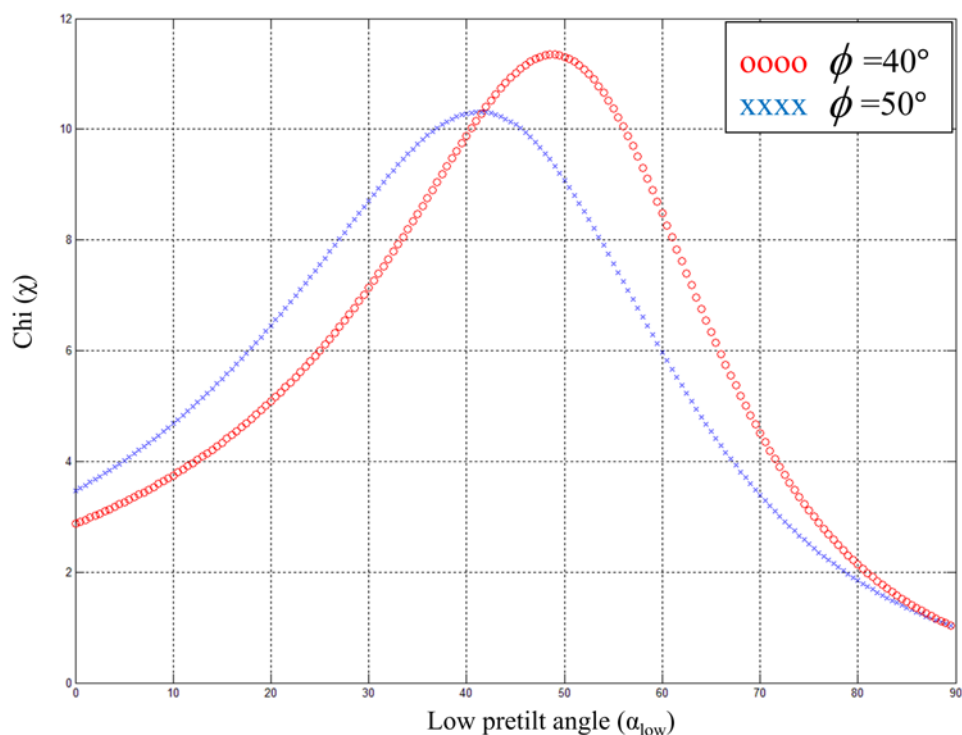


圖 4.1 高預傾角 90° 求其低預傾角之 χ 值關係圖

(二) 任意低預傾角，求其高預傾角

接著，我們將高預傾角設定在 90° 、 88° 、 85° 三個角度，看其隨著低預傾角在 0° 到 90° 之間的變化下，光入射角 (ϕ) 為 50° 與 40° 時求取 χ 值的情形。於是我們可從圖 4.2 與圖 4.3 發現，當低預傾角為 0° 到 20° 之間時，其 χ 值在高預傾角不同的情況下卻是非常的接近，所以在量測相位延遲值 (ϕ) 時發生的誤差，由於 χ 值差異太小，會很容易造成求出的高預傾角是錯誤的，影響到我們求取預傾角的準確度，因此我們必須討論造成這結果的原因，並對公式加以修正。

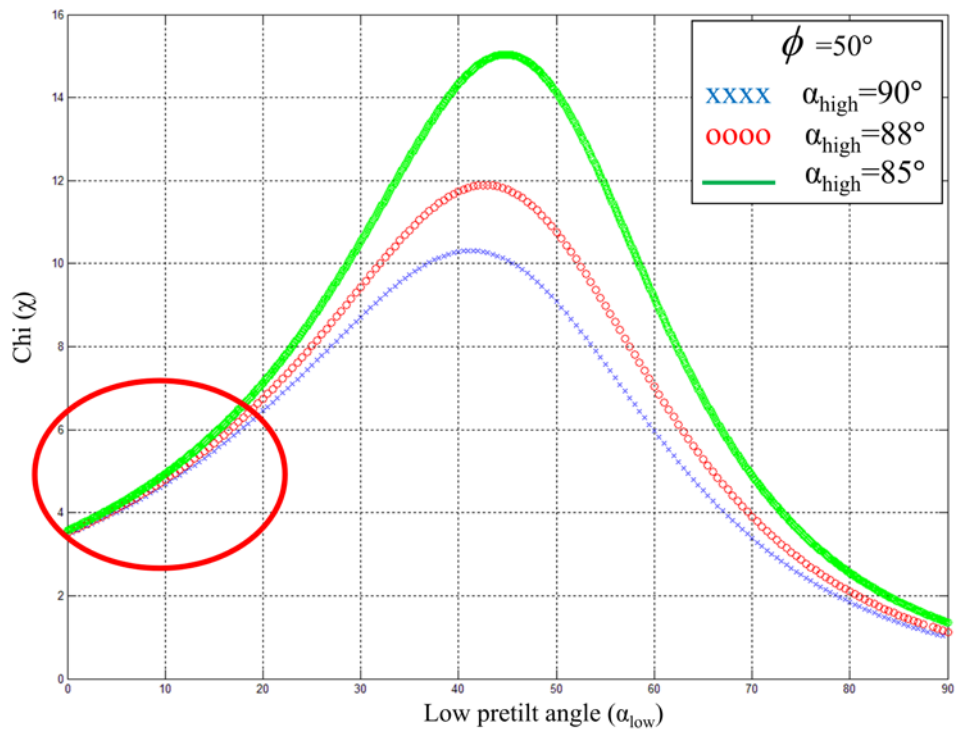


圖 4.2 三種高預傾角角度下其低預傾角 χ 值分布圖($\phi = 50^\circ$)

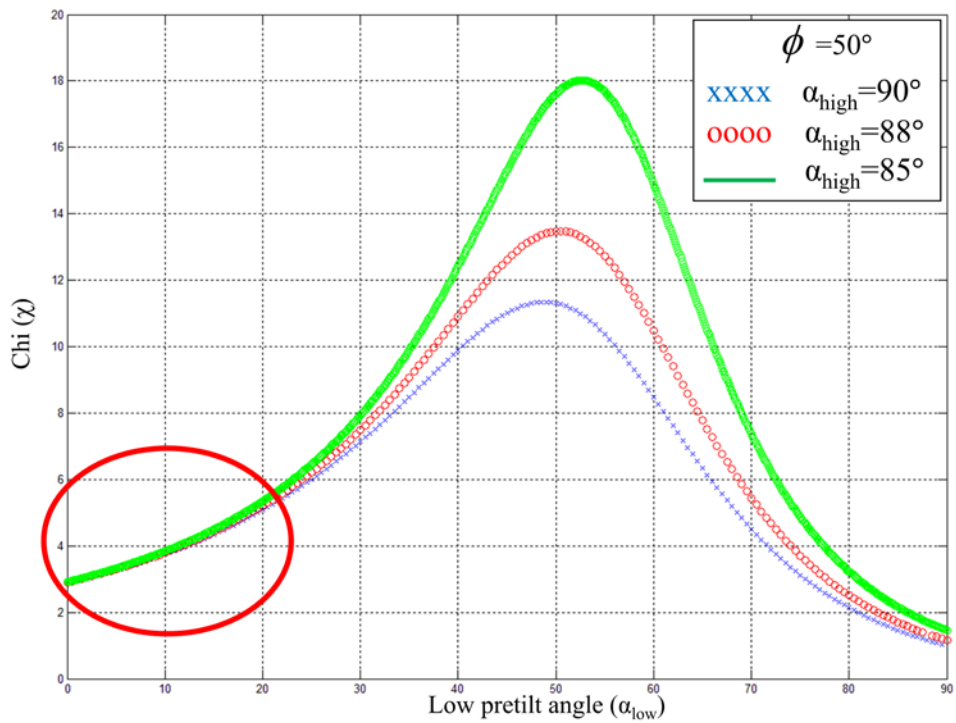


圖 4.3 三種高預傾角角度下其低預傾角 χ 值分布圖($\phi = 40^\circ$)

探究其成因，圖 4.4 是我們將樣品低預傾角設定在 5° ，樣品厚度為 $9\mu\text{m}$ ，直接從公式去模擬出高預傾角 90° 、 88° 、 85° 三個角度，其相位延遲值(ϕ)與光入射角(ϕ)下的變化圖，那麼我們可以從圖上看出，在光入射角(ϕ)為 -50° 時，三條曲線的相位延遲值(ϕ)非常接近，在 50° 時三條曲線的值更是完全重疊在一起，所以其兩個值相除出的 χ 值因而非常相近，進一步我們也可以看出，相位延遲值的變化在入射角度越高下會漸趨平緩，因此為了能更加敏感的求取高預傾角，我們將原先求解的公式(4-2)轉換為公式(4-3)，藉由高入射角那段平緩的趨勢相減出一微小的值，相除之後的結果，相對的就是對原先入射角(ϕ)為 -50° 相差不大的值有放大的效果，因此便可明確的分辨不同高預傾角下的 χ 值，修正了之前可能發生計算錯誤的情況。

$$\left\{ \begin{aligned} \chi_1 &= \frac{\text{Total_Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Total_Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2 &= \frac{\text{Total_Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Total_Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{aligned} \right. \quad (4-2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \chi_1' &= \frac{\text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2' &= \frac{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{aligned} \right. \quad (4-3)$$

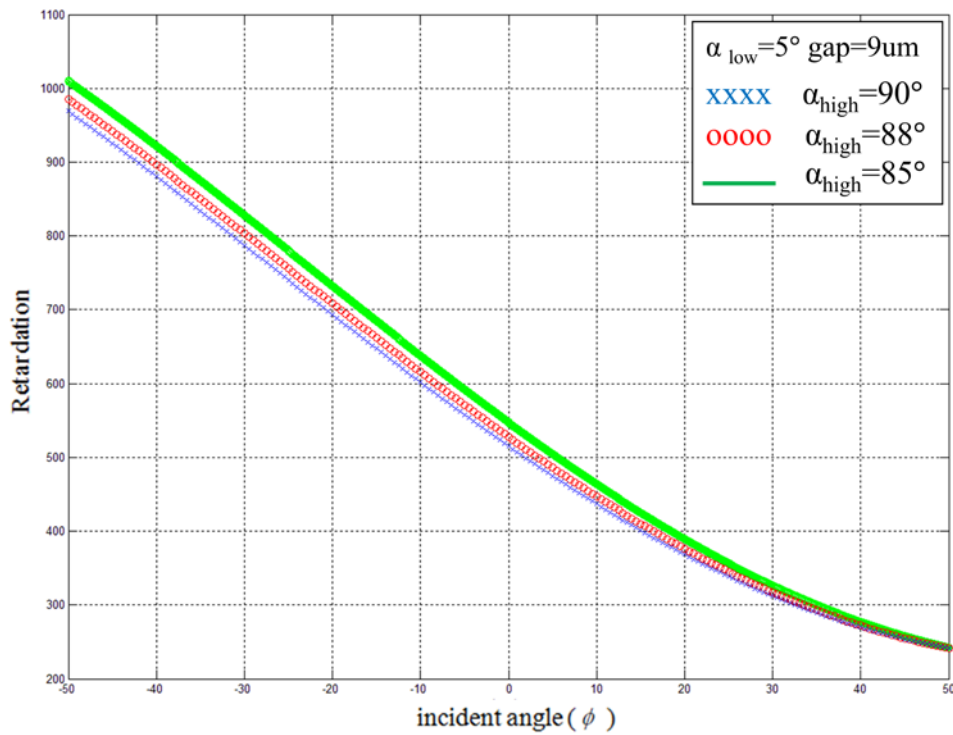


圖 4.4 光入射角與相位延遲值關係圖

在圖 4.5 中，圖下方的曲線為使用公式(4-2)計算出的 χ 值，而圖上方曲線為公式(4-3)求出的 χ 值，放在一起後可明顯的看出，上方放大後的值較下方的值更輕易分辨，因此在計算預傾角下便能更加準確，所以對於預傾角的計算公式，我們就將其修正為公式(4-3)，增加計算的準確度。

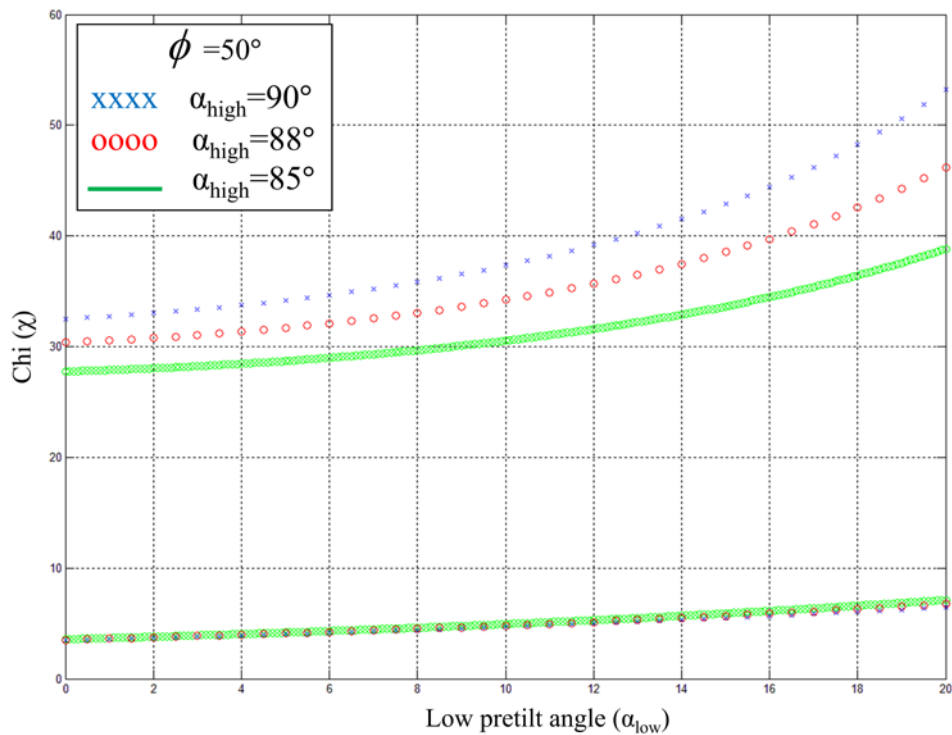


圖 4.5 不同公式下其 χ 值與低預傾角關係圖

(三)高預傾角為 90° 角，以公式(4-3)求其低預傾角

接著，我們將新修正的公式(4-3)同(一)的方法，設定高預傾角為 90° 角，模擬計算其低預傾角求解 χ 值的情形，如圖 4.6 所示；從圖中可以發現在低預傾角為 30° 到 40° 之間會有極值存在，此狀況可能會影響我們求解，因此我們會在後面(3)的小節加以討論，除此之外的部分，在低預傾角為 0° 到 30° 以及 40° 到 90° 之間的情況，我們將其部分放大，分別從圖 4.7 與圖 4.8 進行探討。

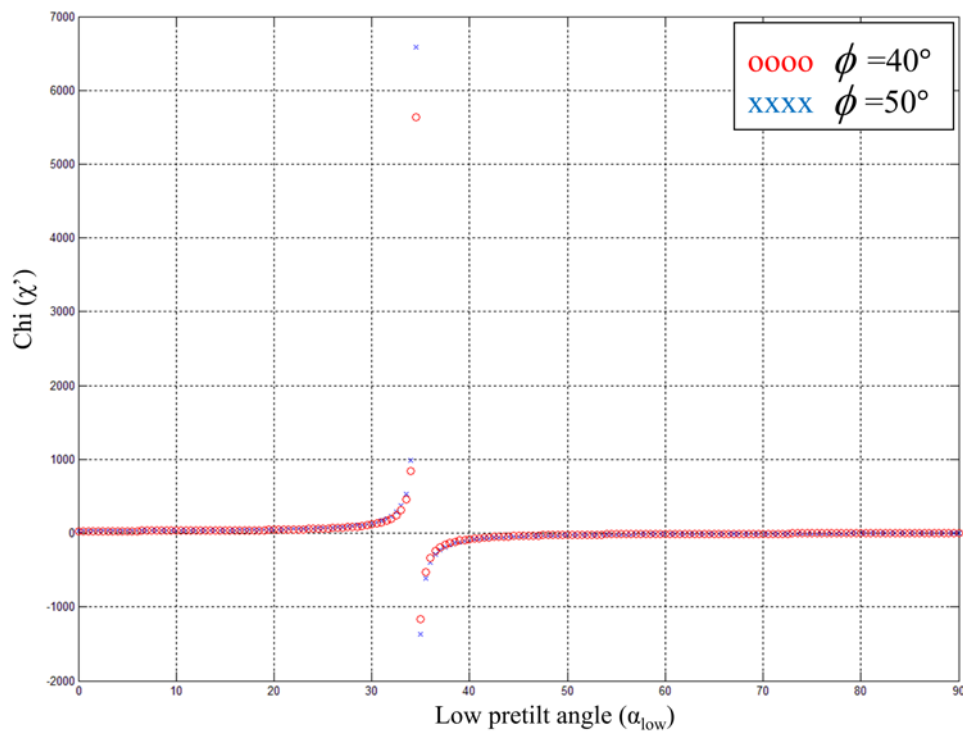


圖 4.6 高預傾角 90° 求其低預傾角之 χ 值關係圖(公式 4-3)

(1) 高預傾角為 90° 角，低預傾角在 0° 到 30° 之間

我們將其 0° 到 30° 角度範圍放大，可以看到其兩曲線並不像圖 4.6 所示的如此接近，其 χ 值在入射角為 40° 和 50° 時依然可清楚分別，如圖 4.7 上所給的四點數值，以表 4.1 所示，其值在預傾角僅差 3° 的情形下，依然有著固定的差距存在，不至於會因為量測相位延遲值的誤差而造成計算錯誤，因此可以說明，在公式(4-3)下，高預傾角固定的情況，低預傾角在 0° 到 30° 的範圍內可準確的求得。

表 4.1 圖 4.7 上四點數值

χ	$\alpha_{\text{low}}=1^\circ$	$\alpha_{\text{low}}=4^\circ$
$\phi=40^\circ$	29.24	29.92
$\phi=50^\circ$	31.94	32.86

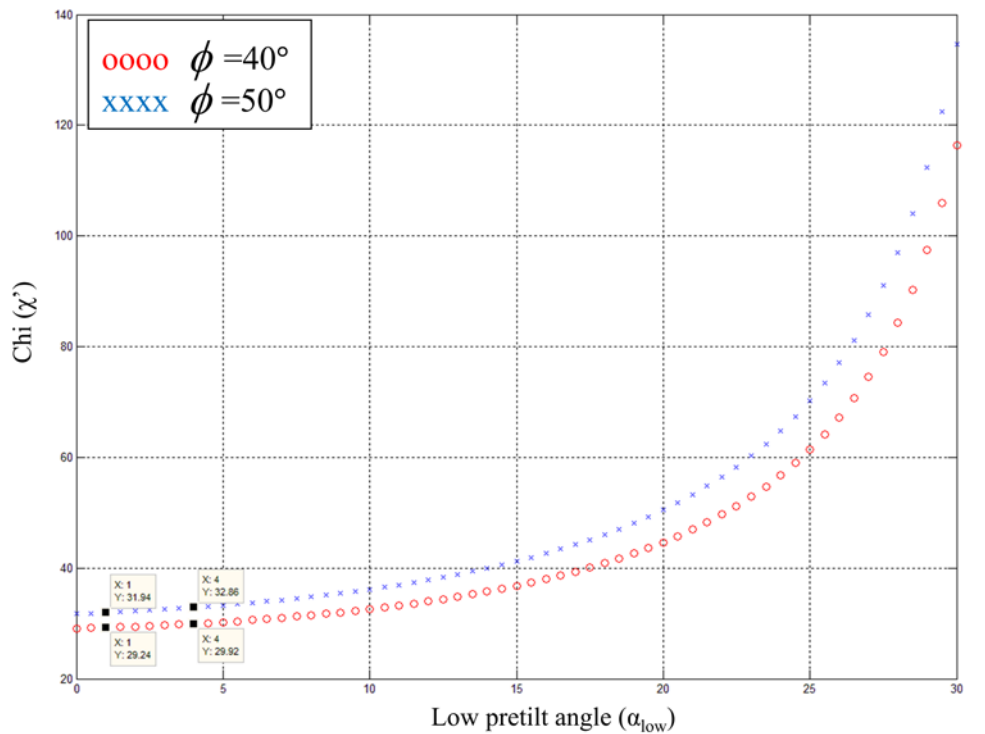


圖 4.7 低預傾角(0°~30°)與 χ 值關係圖

(2) 高預傾角為 90° 角，低預傾角在 40° 到 90° 之間

同樣地，我們將其 40° 到 90° 角度範圍放大，兩條曲線一樣的可輕易分別出來，並從圖 4.8 內的四點數據，如表 4.2 所示，其結果與(1)的情況相同，預傾角僅差 3° 角下，不論是入射角為 40° 或 50° 時的 χ 值都有著一定的差距，因此在此範圍內也可準確求取其預傾角。

表 4.2 圖 4.8 上四點數值

χ	$\alpha_{\text{low}} = 86^\circ$	$\alpha_{\text{low}} = 89^\circ$
$\phi = 40^\circ$	-2.671	-2.283
$\phi = 50^\circ$	-3.825	-3.336

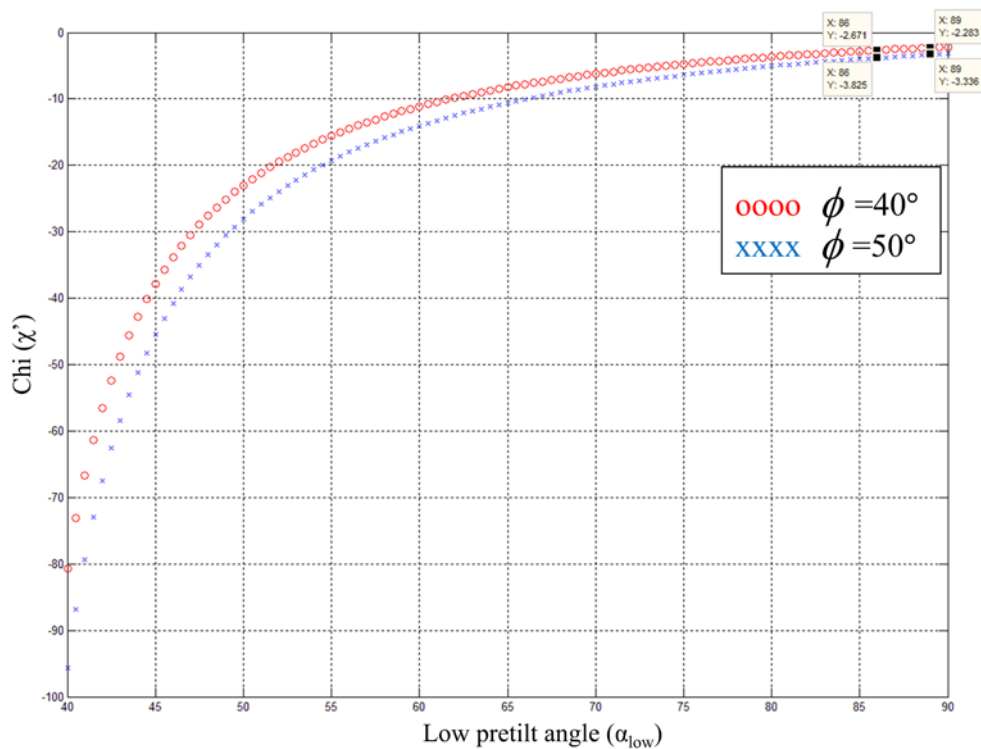


圖 4.8 低預傾角(40°~90°)與 χ 值關係圖

(3) 高預傾角為 90° 角，低預傾角在 30° 到 40° 之間

從圖 4.6 中，我們就可以看到在這個角度範圍內，會有極值的存在，這意謂著在這範圍下，利用我們公式(4-3)去計算，其分母項如式(4-4)將會非常的小趨近於 0，因此我們若用這個數據去計算，由於量測相位延遲值上對於這麼小的數值差其誤差是很大的，所以我們所求得的預

傾角準確度將會很低，因此我們對於公式(4-3)的分母項進行修正，將其從式(4-4)改為式(4-5)，以及對其公式解(4-6)作圖，如圖 4.9 所示，我們會發現其極值位置已經從 30° 到 40° 轉移到 40° 到 50° 之間，所以在我們本來範圍內的角度，已經不再存在極值，便可輕易的從公式去計算出其預傾角，因此我們得知，若是在求值時出現分母項數值差太小趨近於 0 的情況，就將其分母項進行修正，便可計算出此預傾角。

$$\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high}) \quad (4-4)$$

$$\text{Retar}(30, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) \quad (4-5)$$

$$\left. \begin{aligned} \chi_1'' &= \frac{\text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(30, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2'' &= \frac{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(30, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{aligned} \right\} \quad (4-6)$$

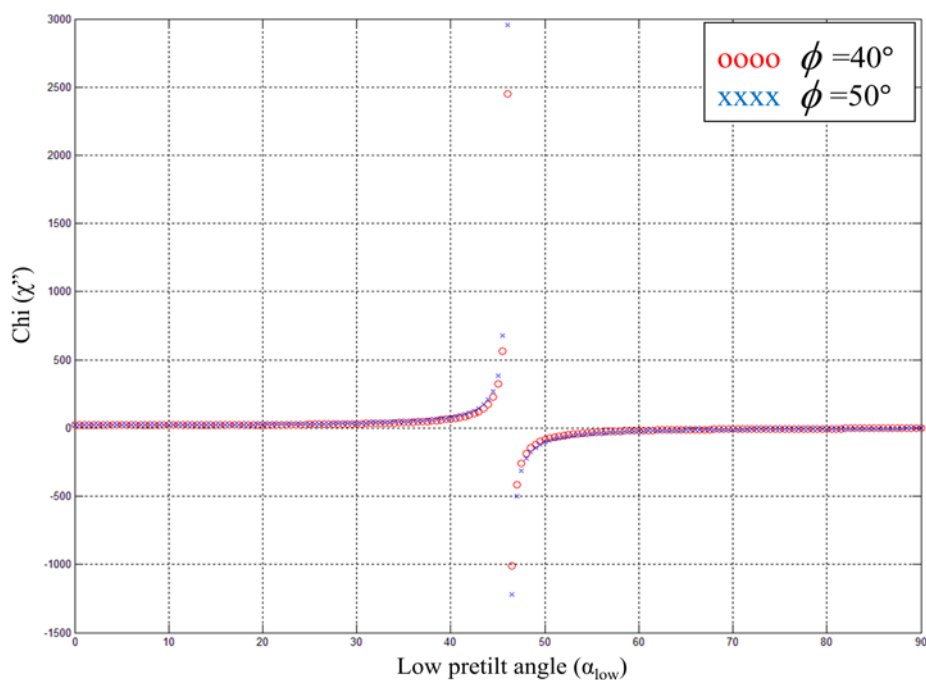


圖 4.9 高預傾角 90° 求其低預傾角之 χ 值關係圖(公式 4-6)

在我們所做的實驗數據內，就有一組數據符合這類情況，也就驗證了我們對其公式所做的修正是正確的，並且可以準確的求出其預傾角。如下表 4.3 我們可以看到在入射角 40° 與 50° 時，其相位延遲值都為 -150nm ，此數值結果無法讓我們求得預傾角，因此我們將分母項改用入射角 30° 與 40° 的值相減，並求得此預傾角於表 4.4，結果是非常準確的，證明了我們推導的準確性。

但是在我們求出預傾角前，我們並不知道其角度的範圍是在這個特定的情形裡面，所以在我們選擇計算公式的時候，應該是先從量測出的數據中，發現有這種趨近於 0 的情況，那我們就該把原先的計算公式(4-3)換成公式(4-6)，除此之外都無須變動，這就能確保我們所求的預傾角都是準確的。

表 4.3 實驗量測之相位延遲值

Incident angle	Sample D_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample D_{VA+P} Phase retardation
-10	608nm	10	336nm
-20	786nm	20	242nm
-30	960nm	30	180nm
-40	1146nm	40	150nm
-50	1336nm	50	150nm

表 4.4 公式計算之預傾角數據

	D_{VA+P} Pretilt Angle
Tilted-Aligned Cell	33.5°
VA Cell	89.3°
Hybrid-Aligned Cell	33.0°/89.8°

4.1.2 實驗數據與量測結果

表 4.5 是我們所做出的樣品，藉由 Zeeman Laser 所量測出的相位延遲值，可以發現我們量測的數據，都是從光入射角(ϕ)-50 度到 50 度的值，是因為我們可能要從量測出的數據關係，去選擇我們較適合的公式去計算，那麼我們可以從下面各樣品的相位延遲值之間的關係，去探討所要代入的公式為何。

表中 A_{VA+P} 、 B_{VA+P} 與 C_{VA+P} 三組數據都是在高入射角 40 度和 50 度時有較平緩的曲線關係，因此我們代入的公式就是(4-3)，而 D_{VA+P} 的情形就是我們有特別討論的發生極值的狀況，所以我們代入的公式就為(4-6)，至於 E_{VA+P} 與 F_{VA+P} ，我們發現其數值曲線平緩的部分，是在入射角 30°~40° 與 10°~20° 的時候，而且會有一個反轉的現象，因此我們的公式就可以考慮把分母改成這區間的值來相減，為了達到相除的 χ

值最大化，以減少量測誤差產生的影響，計算出來的結果可以較準確，所以在我們的公式中，其實是很有彈性的，我們可以藉由數值之間的關係，去改變我們的公式分母項或分子項所取的值，以達到計算準確度的最佳化，這也就是我們需要量測這麼多角度下的數值的原因。

表 4.5 A_{VA+P} ~ F_{VA+P} 實驗量測之相位延遲值

Incident angle	Sample A_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample A_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample B_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample B_{VA+P} Phase retardation
-10	936nm	10	690nm	-10	929nm	10	665nm
-20	1072nm	20	586nm	-20	1079nm	20	553nm
-30	1210nm	30	502nm	-30	1267nm	30	467nm
-40	1352nm	40	440nm	-40	1389nm	40	401nm
-50	1484nm	50	396nm	-50	1543nm	50	359nm

Incident angle	Sample C_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample C_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample D_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample D_{VA+P} Phase retardation
-10	1103nm	10	659nm	-10	608nm	10	336nm
-20	1357nm	20	499nm	-20	786nm	20	242nm
-30	1655nm	30	375nm	-30	960nm	30	180nm
-40	1947nm	40	293nm	-40	1146nm	40	150nm
-50	2241nm	50	269nm	-50	1336nm	50	150nm

Incident angle	Sample E_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample E_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample F_{VA+P} Phase retardation	Incident angle	Sample F_{VA+P} Phase retardation
-10	534nm	10	286nm	-10	200nm	10	56nm
-20	706nm	20	196nm	-20	328nm	20	44nm
-30	886nm	30	136nm	-30	488nm	30	68nm
-40	1080nm	40	110nm	-40	666nm	40	130nm
-50	1280nm	50	120nm	-50	868nm	50	224nm

從實際計算出的結果表 4.6 看出，其垂直配向(VA cell)的部分用相位延遲極值法量測，製作出來的樣品相當穩定角度差異不大，因此我們就把垂直配向的預傾角全部當作 89.3 度，而傾斜配向樣品 (Tilted-Aligned Cell) 的部分，我們是使用晶體旋轉法來量測，那可以發現，其量測出來的角度，不論是傾斜配向或者是垂直配向，都與混合配向(Hybrid-Aligned Cell)的樣品下，使用我們的公式所求出的角度，其值對照下都非常的接近，所以可以驗證利用本論文的公式來計算，求得的混合配向高低預傾角都是非常準確的。而其中 A_{VA+P} 與 E_{VA+P} 這兩組樣品的低預傾角部分差距都稍微比較大，我們認為的原因為其低預傾角的部分是用 POSS 去控制的調變式配向膜，由於 POSS 的濃度或者是 POSS 在配向膜中的均勻度，對於角度的影響非常大，所以即使是在同樣製程下所作出的樣品，仍然可能產生誤差，造成角度的不一致性，因此才會有這種在低角度下量測誤差較大的情況發生。

表 4.6 傾斜配向與混合配向預傾角量測結果

	A_{VA+P} Pretilt Angle	B_{VA+P} Pretilt Angle	C_{VA+P} Pretilt Angle	D_{VA+P} Pretilt Angle	E_{VA+P} Pretilt Angle	F_{VA+P} Pretilt Angle
Tilted-Aligned Cell	1.7°	10.9°	25.6°	33.5°	43.8°	70.9°
VA Cell	89.3°	89.3°	89.3°	89.3°	89.3°	89.3°
Hybrid-Aligned Cell	3.5° /	10.5° /	27.9° /	33.0° /	41.3° /	71.0° /
	89.8°	89.0°	89.2°	89.8°	87.8°	89.1°

4.2 調變式配向膜+水平配向膜(AL-58)

4.2.1 公式討論與修正

(一) 設定低預傾角為 1.7° 時，求其高預傾角

接著，我們從調變式配向膜+水平配向膜這類樣品下去討論；由於其水平配向膜所組合出的樣品，其預傾角都很穩定的約為 1.7°，所以我們將其中低預傾角那一面的角度固定為 1.7°，利用公式(4.3)下去計算，對其高預傾角模擬作圖，探討其求值的情形。

從圖 4.10 可見，在光入射角(ϕ)為 40° 與 50° 兩條曲線下，其高預傾角(α_{high})在 20° 到 40° 之間都會有一個較平緩的曲線趨勢，而在其他的部分其 χ 值都是可輕易分別，因而都可用公式(4-3)準確的求取預傾角，因此我們就針對低預傾角為 1.7°，高預傾角為 20° 到 40° 去做進一

步的討論。

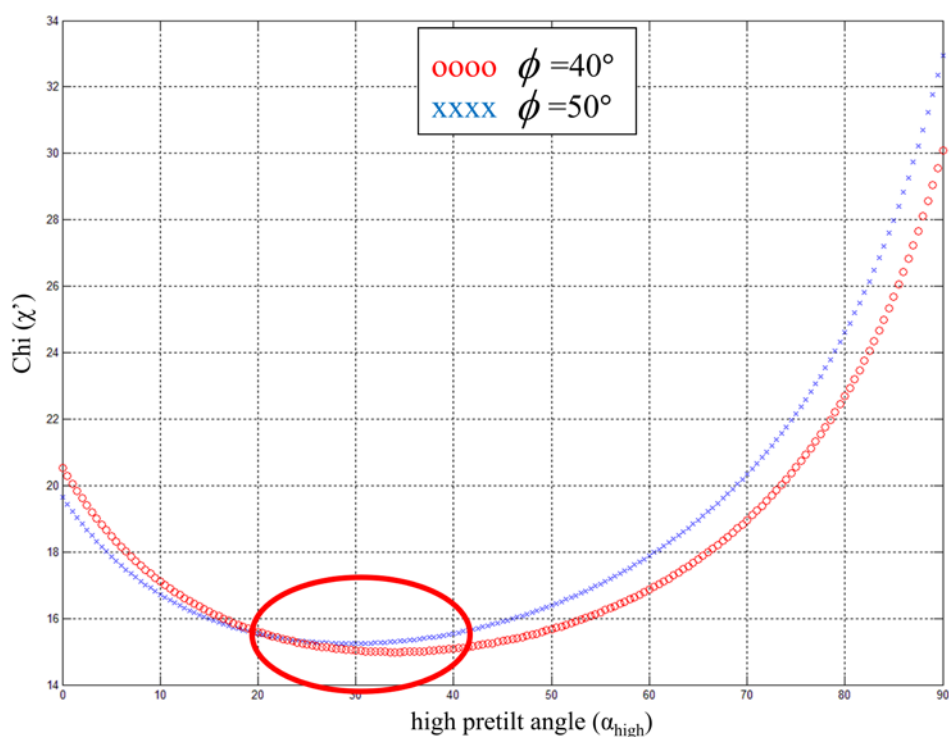


圖 4.10 低預傾角 1.7° 求其高預傾角之 χ 值關係圖(公式 4-3)

(二)低預傾角為 1.68° ，高預傾角為 20° 到 40°

我們將高預傾角(α_{high})為 20° 到 40° 這個範圍的數值放大，其圖 4.11 中兩條曲線各四點的數值，我們可以從表 4.7 中看到，其預傾角在相差 3° 情況下， χ 值僅僅只相差了 0.02，這微小的差距很有可能是因為量測相位延遲值的誤差而產生，結果因此造成預傾角計算上的錯誤，所以在這個範圍內用公式(4-3)去計算是不可行的，必須對此公式加以修正。

表 4.7 圖 4.11 八點數據

χ	$\alpha_{\text{high}} = 27^\circ$	$\alpha_{\text{high}} = 28^\circ$	$\alpha_{\text{high}} = 29^\circ$	$\alpha_{\text{high}} = 30^\circ$
$\phi = 40^\circ$	15.13	15.09	15.06	15.03
$\phi = 50^\circ$	15.26	15.25	15.24	15.24

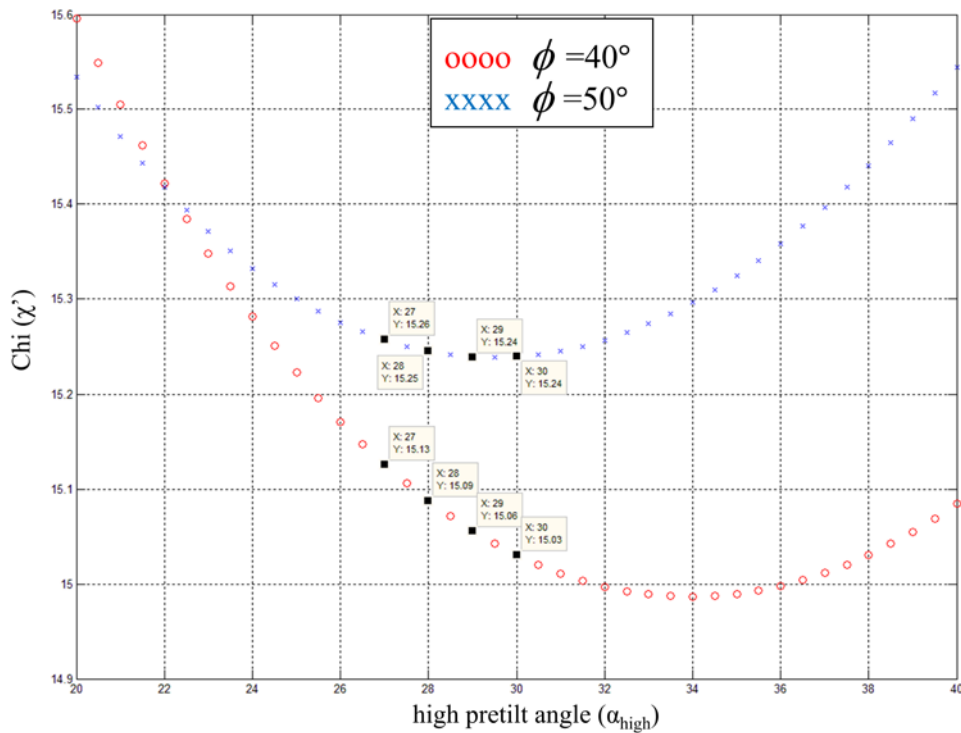


圖 4.11 高預傾角(20°~40°)與 χ 值關係圖(公式 4-3)

圖 4.12 是我們將樣品低預傾角設定在 1.7° ，樣品厚度為 $9\mu\text{m}$ ，直接從公式去模擬出高預傾角為 27° 、 30° 、 33° 三個角度，其相位延遲值 (ϕ) 與光入射角 (ϕ) 下的變化圖，可以看見的是在光入射角 (ϕ) 為 -50° 時，三條曲線的相位延遲值 (ϕ) 非常接近，在 40° 到 50° 三條曲線是接近平行的，所以其公式(4-3)分母項相減出來的值也是非常相近，才會造成

其 χ 值變化不大，進一步我們也可以看出，和之前圖 4.4 相反的是，相位延遲值的變化在入射角度越低的情況下會漸趨平緩，因此為了能更加敏感的求取這些角度下的 χ 值，我們可以將原先求解的公式(4-3)轉換為公式(4-7)，和之前一樣的方式，藉由低入射角那段平緩的趨勢相減出一微小的值，再用高入射角的 χ 值去除以此值，就可以使三條曲線的除完之後的值有著較大的變化，因此便可明確的分辨這些角度下的 χ 值，修正了之前可能發生計算錯誤的情況。

$$\left. \begin{aligned} \chi_1' &= \frac{\text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2' &= \frac{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{aligned} \right\} \quad (4-3)$$

$$\left. \begin{aligned} \chi_1''' &= \frac{\text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2''' &= \frac{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{aligned} \right\} \quad (4-7)$$

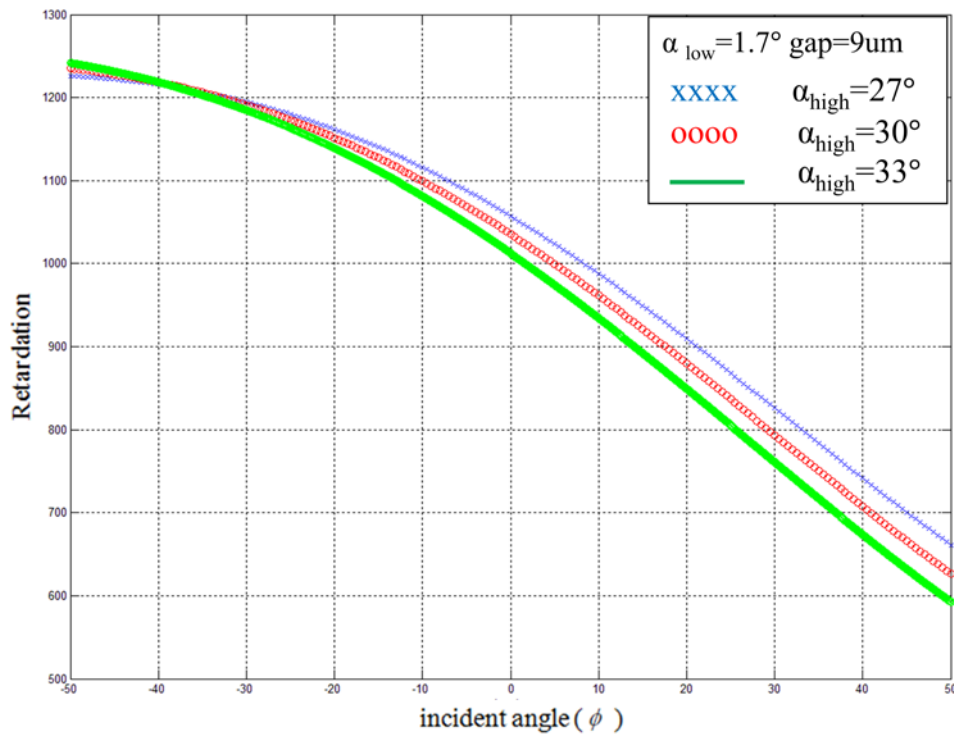


圖 4.12 光入射角與相位延遲值關係圖

同樣地，我們將公式(4-3)與公式(4-7)兩求解的模擬圖形放在一起，如圖 4.13 所示，上方的曲線為使用公式(4-3)計算出的 χ 值，以及圖下方曲線為公式(4-7)求出的 χ 值，放在一起後就可明顯的看出，下方求出的值較上方的值更輕易分辨，我們再將下方曲線的圖放大為圖 4.14 來看，從圖中兩條曲線各四個點的值如表 4.8 所示，其預傾角在相差 3° 情況下， χ 值從原本的只相差了 0.02 變成 15.75，對於相位延遲值量測上的誤差所造成的影響極度的縮小，因此在計算預傾角下便能更加準確，所以對於此範圍內的預傾角計算公式，我們就將其修正為公式(4-7)，增加計算的準確度。

表 4.8 圖 4.14 八點數值

χ	$\alpha_{\text{high}} = 27^\circ$	$\alpha_{\text{high}} = 28^\circ$	$\alpha_{\text{high}} = 29^\circ$	$\alpha_{\text{high}} = 30^\circ$
$\phi = 40^\circ$	-70.33	-57.52	-48.47	-41.75
$\phi = 50^\circ$	-62.71	-51.17	-43.02	-36.96

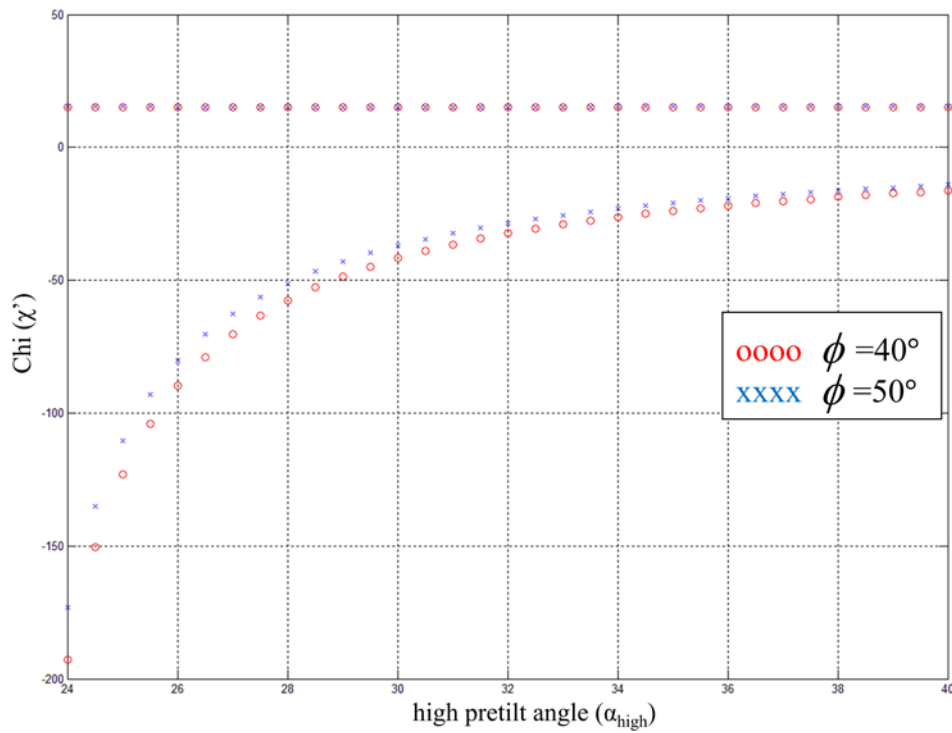


圖 4.13 不同公式下其 χ 值與高預傾角關係圖

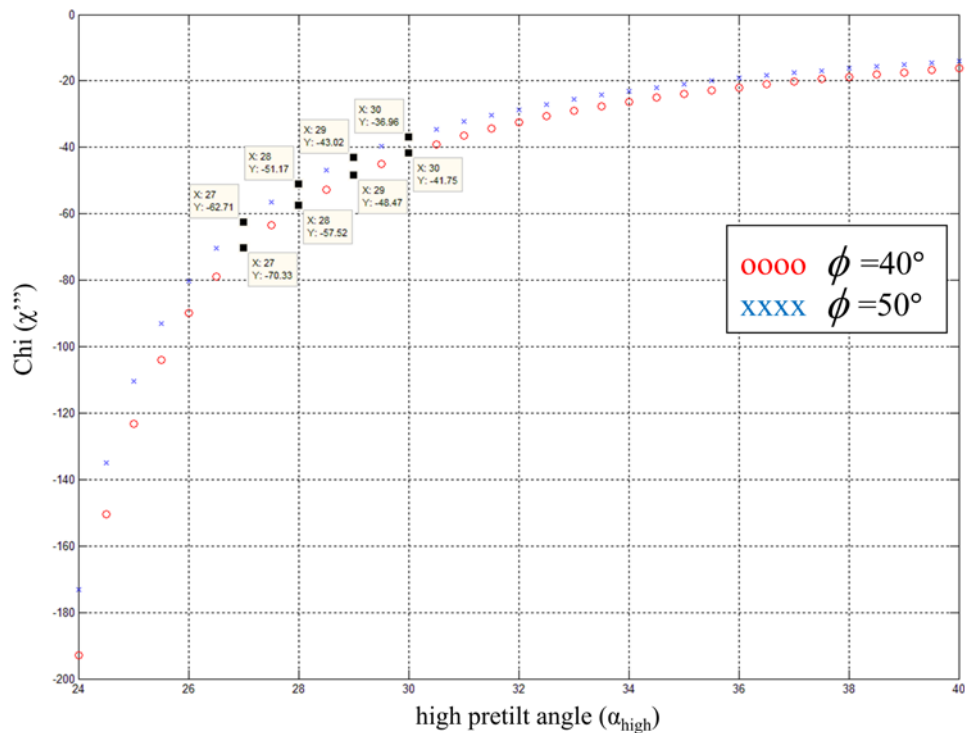


圖 4.14 高預傾角(20°~40°)與 χ 值關係圖(公式 4-7)

我們在這類樣品下所做的實驗數據，也剛好有一組數據符合這種情況，正好可證明我們對其公式的修正是正確的，並且確定此公式可以準確的求出其預傾角。如下表 4.9 我們可以看到在光入射角-40°與-50°時其相位延遲值相減的值，會比入射角 40°與 50°相減的值小很多，因此我們將分母項改用入射角-40°與-50°的值相減，並求得此預傾角於表 4.10，結果是非常相近的，證明了我們推導的準確性。

但是相同的，在我們求出預傾角前，我們並不知道其角度的範圍是在這個特定的情形裡面，所以在我們選擇計算公式的時候，應該是先從量測出的數據中，發現其相位延遲值在低入射角的時候是較高入射角時來的接近，那我們就該把原先的計算公式(4-3)換成公式(4-7)，

這就能確保我們所求的預傾角都是準確的。

表 4.9 實驗量測之相位延遲值

Incident angle	Sample A_{AL+P} Phase retardation	Incident angle	Sample A_{AL+P} Phase retardation
-10	1725nm	10	1513nm
-20	1805nm	20	1383nm
-30	1865nm	30	1243nm
-40	1907nm	40	1101nm
-50	1933nm	50	969nm

表 4.10 公式計算之預傾角數據

	A_{AL+P} Pretilt Angle
Tilted-Aligned Cell	28.7°
Homogeneous Cell	1.7°
Hybrid-Aligned Cell	1.8° / 29.6°

(三)任意高預傾角，求其低預傾角

同樣地，在低預傾角固定，高預傾角的量測公式已修正之後，我們換將低預傾角設定在 1.7°、3.7°、5.7° 三個不同角度時，看高預傾角在 0° 到 90° 之間的變化下，光入射角(ϕ)為 50° 與 40° 時用公式(4-3)求取 χ 值的情形。於是我們可從圖 4.15 與圖 4.16 發現，當低預傾角為 50°

到 70° 之間時，其 χ 值在低預傾角不同的情況下卻是非常的接近，所以在量測相位延遲值(φ)時發生的誤差，由於 χ 值差異太小，會很容易造成求出的低預傾角是錯誤的，影響到我們求取預傾角的準確度，因此我們必須討論造成這結果的原因，並對公式加以修正。

$$\left\{ \begin{aligned} \chi_1' &= \frac{\text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2' &= \frac{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{aligned} \right. \quad (4-3)$$

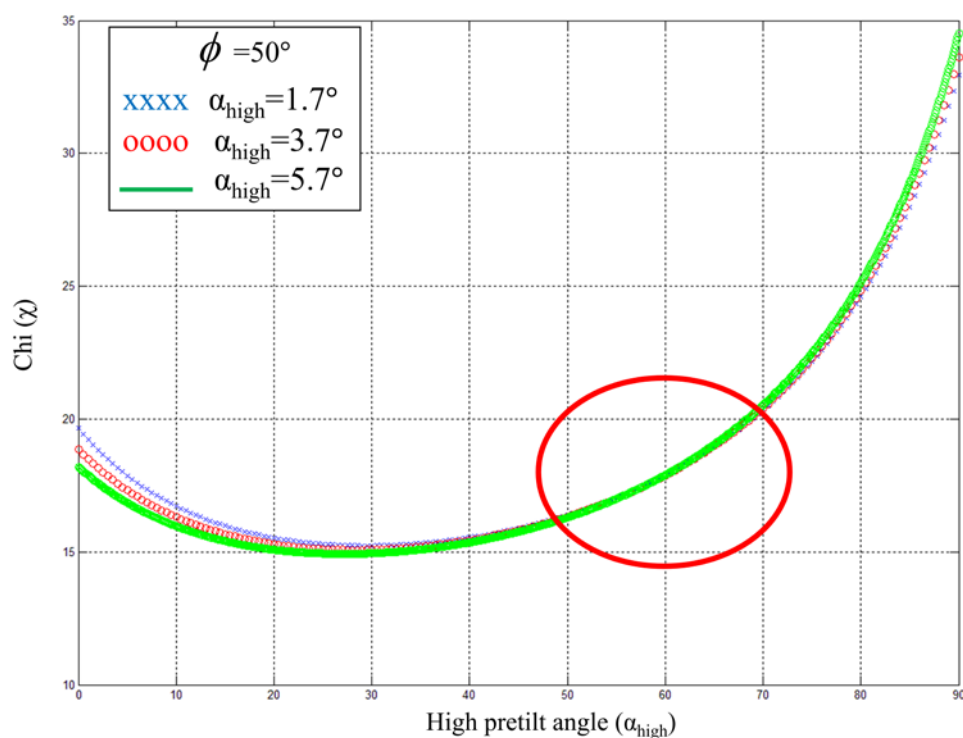


圖 4.15 三種低預傾角角度下其高預傾角 χ 值分布圖($\phi=50^\circ$)

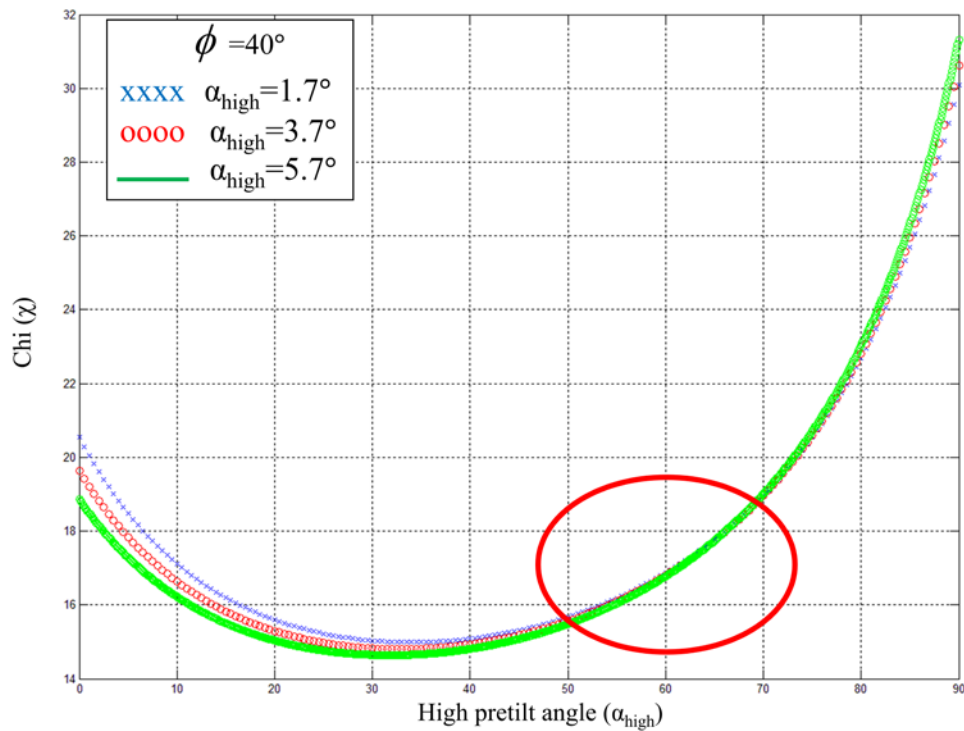


圖 4.16 三種低預傾角角度下其高預傾角 χ 值分布圖($\phi=40^\circ$)

那為了解決這個問題，我們先從理論公式模擬光入射角(ϕ)與相位延遲值(φ)的圖去找出造成問題的原因，圖 4.17 就是我們將樣品低預傾角設定在 60° ，樣品厚度為 $9\mu\text{m}$ ，直接從公式去模擬出高預傾角 1.7° 、 3.7° 、 5.7° 三個角度，其相位延遲值(φ)與光入射角(ϕ)下的變化圖。那麼我們可以從圖上看出，在光入射角(ϕ)為 -50° 時，三條曲線的相位延遲值(φ)完全重疊在一起，在 40° 到 50° 三條曲線是接近平行的，所以其公式(4-3)分母項相減出來的值也是非常相近，因而兩個值相除出的 χ 值幾乎相同；同樣的我們也可以利用公式(4-7)來計算，雖然在光入射角為 50° 時，相位延遲值仍然非常接近，以及在 -40° 到 -50° 三條曲線是重疊再一起的，不過這個計算結果還是會比用公式(4-3)來計算的 χ

值較容易分別，從圖 4.18 就可以明顯看出，下面曲線在公式(4-7)計算下的 χ 值比上面區線(4-3)計算出的值來的容易區別，不過由於這相位延遲值與光入射角圖的趨勢幾乎是線性的，所以仍就沒有非常顯著的改善，因此在這個區域內的預傾角計算，應該將多組數據代入不同公式進行運算，藉由計算出的結果互相驗證，才能確定計算出的預傾角值是準確的。

$$\left. \begin{aligned} \chi_1''' &= \frac{\text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2''' &= \frac{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{aligned} \right\} (4-7)$$

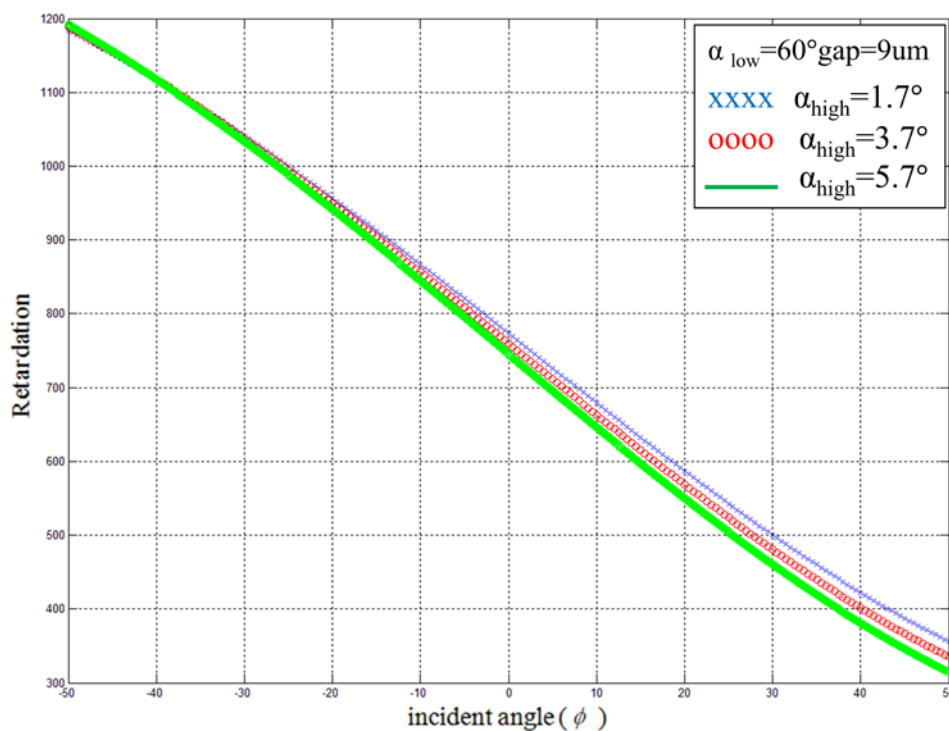


圖 4.17 光入射角與相位延遲值關係圖

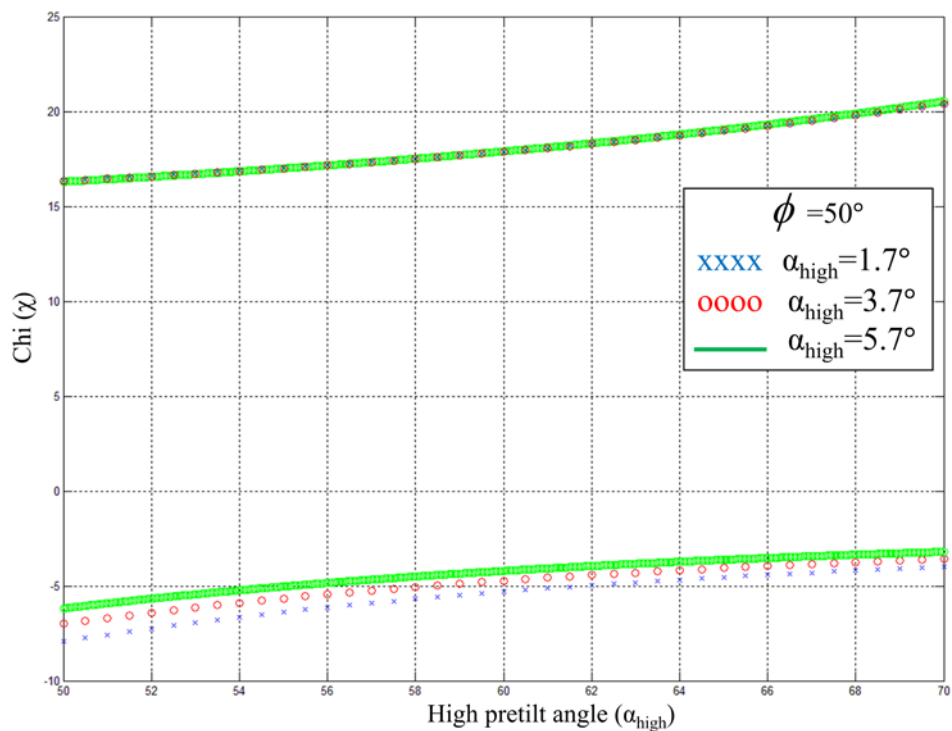


圖 4.18 不同公式下其 χ 值與高預傾角關係圖

4.2.2 實驗數據與量測結果

同 4.1.2 小節的敘述，我們可以從數值間的關係，去討論所計算的公式。

從表 4.11 中， A_{AL+P} 與 B_{AL+P} 就是我們所討論的特殊情形，在低入射角 -40 度到 -50 度之間是曲線最平緩的部分，因此將公式從(4-3)改為(4-7)去計算，而在 C_{AL+P} 和 D_{AL+P} 幾乎是呈現線性關係，找不到其較平緩的趨勢，因此可隨意改變其公式的分子分母項去計算，相互驗證其計算後的結果，確認其預傾角值的可信度，至於 E_{AL+P} 的部分，就是在高預傾角 40 度和 50 度之間平緩的曲線趨勢，所以代入(4-3)計算即可。

表 4.11 $A_{AL+P} \sim E_{AL+P}$ 實驗量測之相位延遲值

Incident angle	Sample A_{AL+P} Phase retardation	Incident angle	Sample A_{AL+P} Phase retardation	Incident angle	Sample B_{AL+P} Phase retardation	Incident angle	Sample B_{AL+P} Phase retardation
-10	1725nm	10	1513nm	-10	1796nm	10	1566nm
-20	1805nm	20	1383nm	-20	1882nm	20	1424nm
-30	1865nm	30	1243nm	-30	1950nm	30	1282nm
-40	1907nm	40	1101nm	-40	1994nm	40	1140nm
-50	1933nm	50	969nm	-50	2026nm	50	990nm

Incident angle	Sample C_{AL+P} Phase retardation	Incident angle	Sample C_{AL+P} Phase retardation	Incident angle	Sample D_{AL+P} Phase retardation	Incident angle	Sample D_{AL+P} Phase retardation
-10	2208nm	10	1816nm	-10	1496nm	10	1178nm
-20	2386nm	20	1602nm	-20	1640nm	20	1014nm
-30	2536nm	30	1394nm	-30	1776nm	30	860nm
-40	2652nm	40	1192nm	-40	1896nm	40	724nm
-50	2730nm	50	1010nm	-50	1996nm	50	600nm

Incident angle	Sample E_{AL+P} Phase retardation	Incident angle	Sample E_{AL+P} Phase retardation
-10	1334nm	10	1028nm
-20	1488nm	20	880nm
-30	1640nm	30	746nm
-40	1784nm	40	626nm
-50	1912nm	50	534nm

表 4.12 為實際量測出的結果，水平配向樣品(Homogeneous Cell)部分，也是用相位延遲極值法計算出，其樣品製作同垂直配向相當穩定，將其角度皆以 1.7 度表示，傾斜配向(Tilted-Aligned Cell)以晶體旋

轉法量測出，可以看到混合配向(Hybrid-Aligned Cell)樣品在我們公式計算下，其角度值差異也都相當接近，所以驗證了公式的可信度。同樣的可以發現，在 B_{AL+P} 與 E_{AL+P} 兩組樣品下，高預傾角的部分誤差也稍微比較大，所以和之前的討論一樣，我們認為是由於 POSS 製程上的不穩定所造成，因為兩種樣品量測出的值，較大的誤差正好都出現在調變式配向膜的那一邊，因此我們的討論方向應該是正確的，而非我們量測公式所造成的錯誤。

表 4.12 傾斜配向與混合配向預傾角量測結果

	A_{AL+P} Pretilt Angle	B_{AL+P} Pretilt Angle	C_{AL+P} Pretilt Angle	D_{AL+P} Pretilt Angle	E_{AL+P} Pretilt Angle
Tilted-Aligned Cell	28.7°	33.0°	45.1°	58.3°	70.0°
Homogeneous Cell	1.7°	1.7°	1.7°	1.7°	1.7°
Hybrid-Aligned Cell	1.8° /	2.1° /	2.3° /	1.8° /	0.8° /
	29.6°	30.9°	46.3°	57.6°	71.5°

4.3 計算公式統整

經由上述的幾種特定角度下的模擬推導後，我們可以發現在選擇 χ 值公式的計算是有一些規則存在的，可以從量測出的 φ 值數據關係，選用最適當的計算式，達到最準確的計算量測結果，因此我們在這一

小節中做最後的統整，這邊將入射角從-50 度到 50 度所量測的十組數據，以 φ_n 表示， $n = 1, 2, 3, \dots, 10$ 。

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi_1 = \frac{\varphi_1 \text{ or } \varphi_{10}}{\varphi_{n-1} - \varphi_n} \\ \chi_2 = \frac{\varphi_2 \text{ or } \varphi_9}{\varphi_{n-1} - \varphi_n} \end{array} \right. \quad (4-8)$$

(一) 找出 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)_{\min}$

首先，在量測出的相位延遲值中，找出 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)_{\min}$ 的地方，以此 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)$ 作為分母，其目的是讓 χ 值放大，減少量測數據的誤差造成預傾角計算上的誤差，而分子則依 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)$ 的相對位置去選擇 φ_1 (φ_2) 或 φ_{10} (φ_9)，若 φ_{n-1} 與 φ_n 是入射角 10 度到 50 度的值，分子則選擇 φ_1 (φ_2)，相反的若是 -50 度到 -10 度的值則選 φ_{10} (φ_9) 當作分子，以此規則選取公式進行計算。

(二) 出現極值 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)_{\min} \approx 0$

在找出 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)_{\min}$ 的時候，若發生 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)_{\min} \approx 0$ 的情況時，則表示在 χ 值的計算上會有極值的情形產生，因此在這個時候，我們會將分母的 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)$ 改為 $(\varphi_{n-2} - \varphi_{n-1})$ ，而分子的部分同(一)的部分選取，即可進行計算。

(三) 線性曲線無明顯趨勢

若在量測的數據中，找不到明顯的 $(\varphi_{n-1} - \varphi_n)_{\min}$ 時，則表示此曲線

是呈現一個接近線性的情形，在這個時候，無法有準確的選擇去計算 χ 值，因此我們會將多組數據代入運算，藉由計算出的結果互相驗證，確定計算出的預傾角值是準確的。

4.4 混合配向樣品(Hybrid-Aligned Cell)

表 4.13 是我們一組任意混合預傾角的樣品，其量測出來的相位延遲值，那麼我們可以從其數據中看出，此組數據是在高入射角下有較緩的趨勢，並且沒有極值的情況產生，所以我們就將此組數據，代入式(4-3)去計算，所得到的結果如表 4.14 所示，其混合配向 (Hybrid-Aligned Cell) 預傾角為 $27.9^\circ/70.3^\circ$ ，與其對照組傾斜配向 (Tilted-Aligned Cell) 的樣品，所量測出的數據 $28.7^\circ/70.0^\circ$ 相當符合，驗證了我們的計算可行性以及公式擁有相當高的準確度。

表 4.13 實驗量測之相位延遲值

Incident angle	Sample A_{hy} Phase retardation	Incident angle	Sample A_{hy} Phase retardation
-10	750nm	10	444nm
-20	922nm	20	320nm
-30	1090nm	30	218nm
-40	1254nm	40	144nm
-50	1402nm	50	92nm

表 4.14 公式計算之預傾角數據

	Sample A_{hy} Pretilt Angle
Tilted-Aligned Cell	28.7°
Tilted-Aligned Cell	70.0°
Hybrid-Aligned Cell	27.9°/70.3°

4.5 液晶盒的間距計算與量測

理論上來說，若我們已從公式求得其預傾角，即可將預傾角代回公式中，便可求得液晶盒的間距(cell gap)大小(d)，因此我們也將所求得的預傾角數據代回算出這些液晶盒間距的值，如表 4.15 所示。

表 4.15 預傾角代入公式求得液晶盒間距數值

	A_{VA+P}	B_{VA+P}	C_{VA+P}	D_{VA+P}	E_{VA+P}	F_{VA+P}
Cell gap(d)	8.69	8.47	8.68	8.26	9.60	8.57
	A_{AL+P}	B_{AL+P}	C_{AL+P}	D_{AL+P}	E_{AL+P}	
Cell gap(d)	8.03	8.46	8.57	8.65	8.85	

(um)

結果我們發現，其算出的液晶盒間距幾乎都稍小於我們所用的間隙物(spacer)大小 9um，正常來說其液晶盒間距應該略大於間隙物的大小，這種情況是不合理的，所以我們懷疑此間隙物的大小是否不到 9um，為了驗證這個想法的正確性，我們將此間隙物噴灑在一片乾淨的玻璃上，利用偏光顯微鏡下去拍攝觀察，希望能利用照片上的比例尺看出

此間隙物大小，此照片如圖 4.19 與圖 4.20 所示，在圖上的比例尺對照下，此間隙物大小明顯的大於 9 μm ，所以我們所懷疑的是錯誤的，另有其他原因存在。

既然和間隙物大小無關，我們進而懷疑是量測的過程所造成的結果，接著去進行驗證。我們組成一片樣品，其中只在兩片乾淨的玻璃中噴灑了間隙物，並未塗佈配向膜和灌入液晶，利用光學干涉方法進行液晶盒間距的量測，其量測出五點的數值如表 4.16，其值與我們公式所計算出的值相符，因此應該是量測過程中所造成的，緊接著我們將原本在量測相位延遲值和液晶盒間距時，樣品用夾置的方法固定，改用黏置的方式再去做量測，結果就發現，此液晶盒間距量測的五點數值如表 4.17，其值就符合樣品間距所應該有的大小，因此我們發現此誤差的造成是因為量測時夾子所造成的應力，而使得液晶盒間距的縮小，雖然用光學干涉法量測液晶樣品間距仍有誤差存在，不過從量測的五點數據上還是可以看出趨勢，夾置所量測出的數據就是會略小於黏置方法的結果，因此我們還是可以確定固定液晶樣品的方法，是會影響液晶間距的量測，以致於造成我們計算出的間距大小不合乎理論上該有的結果。

不過由於液晶盒間距(d)在我們量測預傾角的公式中，都是被相除掉的，並不會影響我們預傾角量測，只是間接造成了相位延遲值的縮

小，然而若我們想從預傾角去推算此液晶盒的間距，那麼我們就應該設計一款新的模具去放置液晶盒，不會對液晶盒造成應力的情況下再去進行測量，此測量出來的預傾角值代回計算後，所求出的樣品厚度就會是準確的值。

表 4.16 夾置樣品量測間距數值

	1	2	3	4	5
Cell gap(d)	8.60	8.67	8.71	8.20	8.98

(um)

表 4.17 黏置樣品量測間距數值

	1	2	3	4	5
Cell gap(d)	9.59	9.91	9.17	10.12	9.77

(um)

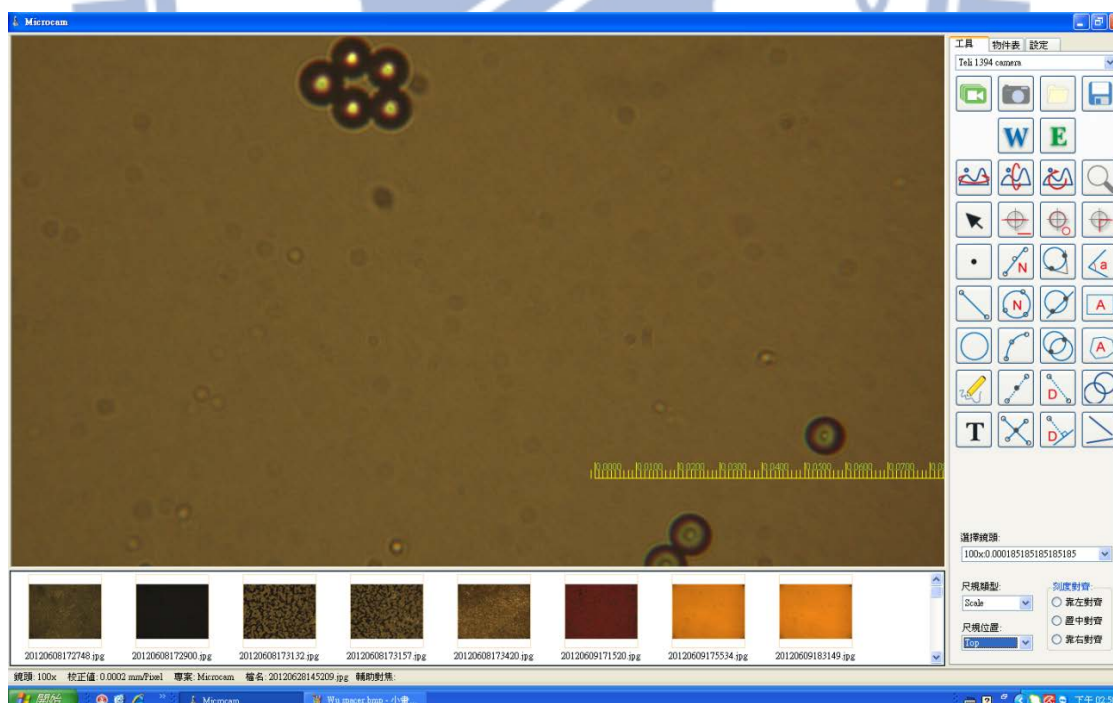


圖 4.19 偏光顯微鏡下間隙物之照片

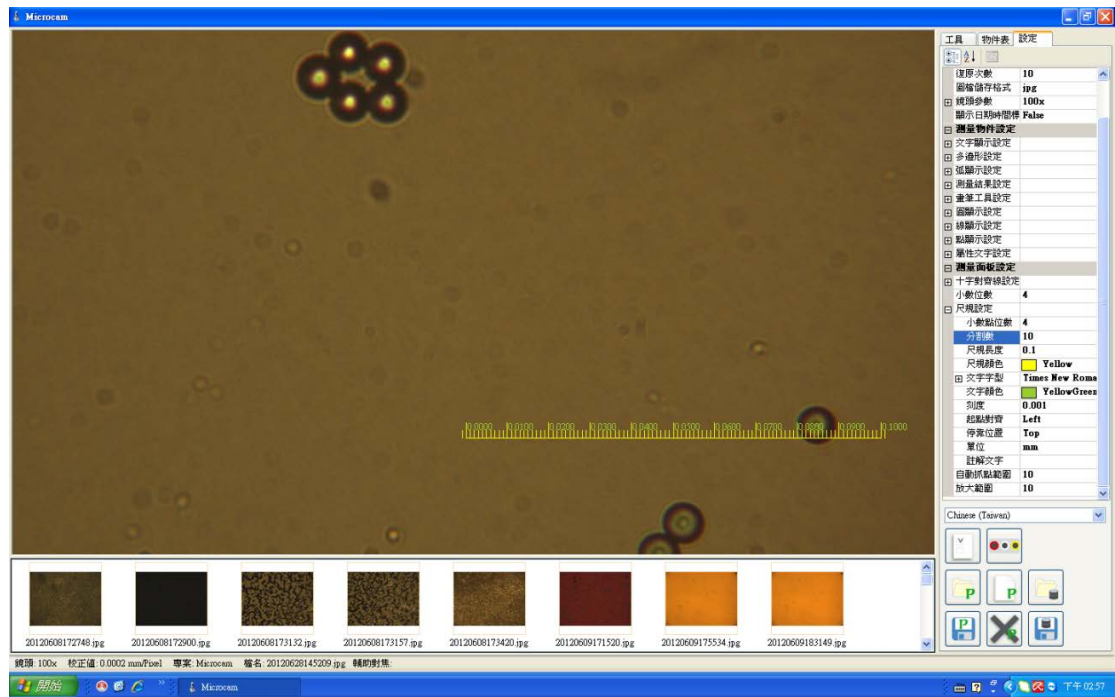


圖 4.20 偏光顯微鏡下間隙物之照片

第五章 結論與未來展望

在我們本篇的論文研究中，我們從晶體旋轉法量測傾斜配向的液晶樣品預傾角公式當作基礎，首度推導出一個新的計算公式(3-1)，藉由量測出的樣品相位延遲數據代入公式求出 χ 值(3-2)，取聯立方程後便能同時計算出混合配向的液晶樣品之高低預傾角，並從各種特定的角度混合情況作模擬推導，發現量測上可能發生的問題，進而修正我們原先的公式，以達到在各種角度混合下，皆可準確的量測出其預傾角。

$$\varphi_{total}(\phi) = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \sum_{\alpha=\alpha_{low}}^{\alpha_{high}} \left[\frac{(n_e^2 - n_o^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \phi}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha} + \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}} \right] \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \phi}{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \phi} \quad (3-1)$$

$$\chi(\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high}) = \frac{Total_Retar(-\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(\phi, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \quad (3-2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \chi_1 &= \frac{Total_Retar(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2 &= \frac{Total_Retar(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{aligned} \right. \quad (3-3)$$

在公式模擬推導中，我們先從設定高預傾角為 90 度去對低預傾角的量測作模擬，結果發現在此種情況下，皆可準確的量測出其預傾角，之後再去看在各種低預傾角下，量測高預傾角是否準確，卻發現低預傾角在 20 度角以下時，在量測高預傾角上會發生困難，推論出其原因，

進而去改變我們的公式從(4-2)改為(4-3)，便可改善此種情況。

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi_1 = \frac{Total_Retar(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2 = \frac{Total_Retar(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Total_Retar(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{array} \right. \quad (4-2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi_1' = \frac{Retar(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Retar(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - Retar(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2' = \frac{Retar(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Retar(40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - Retar(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{array} \right. \quad (4-3)$$

之後對公式(4-3)再去模擬其高預傾角固定下求低預傾角的情況，發現在 30 度到 40 度之間會有極限值存在而無法計算，因此在這種情形下，我們會將公式再由(4-3)改為(4-6)，使極限值位置產生位移，因此便可求出在該角度區間內的預傾角。

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi_1'' = \frac{Retar(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Retar(30, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - Retar(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2'' = \frac{Retar(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{Retar(30, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - Retar(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{array} \right. \quad (4-6)$$

另外，同樣在公式(4-3)下換將低預傾角設定為 1.7 度，模擬求其高預傾角的情況，發現在 20 度到 40 度時，曲線趨於平緩 χ 值變化過小，因此量測上誤差，便會造成無法準確求出預傾角的值，所以我們會將公式從(4-3)改成(4-7)便可改善此情況，那麼在各種特定的角度下，我們都已對其公式作特定的修正，因此在不同情況下，我們都有相對應

的公式能去計算，再與實驗得到的數據作比較之後，證明這些公式，確實能準確地計算出混合配向液晶盒的預傾角。

$$\left\{ \begin{array}{l} \chi_1''' = \frac{\text{Retar}(50, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \\ \chi_2''' = \frac{\text{Retar}(40, \alpha_{low}, \alpha_{high})}{\text{Retar}(-40, \alpha_{low}, \alpha_{high}) - \text{Retar}(-50, \alpha_{low}, \alpha_{high})} \end{array} \right. \quad (4-7)$$

我們的計算公式的使用上是非常彈性的，這也就是為什麼我們要量測多組入射角下的相位延遲值，對於量測出來的數據關係，可以藉由我們的公式統整，從公式的選擇規則去確定我們的 χ 值計算公式，目的是使其 χ 值最大化，並且略過可能發生錯誤的計算式，以減少量測誤差的影響，達到最準確的量測結果。

最後對於任意混合配向的液晶樣品，雖然我們並不知道其高低預傾角的組合為哪種情形，但我們可以從量測出的相位延遲值的交互關係，而推斷出我們要用的公式，在我們的實驗數據中，其結果也符合我們的預期，因此可驗證我們所提出的這套新的計算方法，是可準確的求出其混合配向樣品之高低預傾角。

在本論文的研究中，是使用 POSS 去製作此混合樣品，不過 POSS 摻雜的配向膜還是沒有已被廣泛使用的水平或垂直配向膜穩定，才會造成我們的實驗中，有些樣品所量測出的數據會有誤差較大的情況；因此若是我們改用水平與垂直配向膜組合成混合配向樣品，藉由施予

不同的電壓，達到不同角度混合的混合樣品，再去進行同樣的實驗量測計算，由於此樣品的穩定度會相對於 POSS 的樣品高的許多，就可再次驗證我們的公式準確性，並且確定本論文中預傾角的較大誤差，確實是 POSS 的不穩定所造成，這是未來可再深入研究的部分。

而得知預傾角後，理論上只要把其值代回公式(3-1)中，便可求出其液晶盒間距，而在我們的實驗結果下，我們發現其量測時固定液晶盒的方式對間距影響很大，因此若是想藉由此種方法進而求得液晶盒的間距，必須再重新設計一款新的模具，在量測下能讓液晶盒穩固的放置，又不會對液晶盒施予應力，而使得液晶盒的間距也能準確從預傾角的代算求出，這也是未來可以再進一步去研究的。

參考文獻

- [1] O. Lehmann, Z. Physik. Chem., 4, 462,1889.
- [2] R. Williams, J. Chem. Phys., 39, 384,1963.
- [3] G. H. Zannoni, and L. A. Barton, Proc. IEEE, 56, 1162,1968.
- [4] 田民波,林怡欣, TFT 液晶顯示原理與技術, 五南圖書出版公司,2008
- [5] I. C. Khoo and F. Simoni, Physics of Liquid Crystalline Materials, Philadelphia, 1988.
- [6] P. C. Yeh and C. Gu, Optics of Liquid Crystal Displays, New York, 1997.
- [7] S. Y. Yeung, F. C. Xie, H. S. Kwok, J. Wan, O. Tsui, J. Appl. Phys. 99, 124506, 2006.
- [8] J. B. Kim, K. C. Kim, H. J. Ahn, B. H. Hwang, J. T. Kim, H. K. Bail, Applied Physics 91, 023507, 2007.
- [9] S. J. Hwang, S. C. Jeng, I. M. Hsieh, Optics Express 18(16), 16507-16512, 2010.
- [10] T. J. Scheffer and J. Nehring, J. Appl. Phys. 48, 1783-1792, 1977.
- [11] Y. W. Li, Jacob Y. L. Ho, S. Y. Yeung, and H. S. Kwok, Journal of Display Technology 4(1), 13-17, 2008.
- [12] K. H. Chen, W. Y. Chang, J. H. Chen, Optics Express 17(16), 14143-14149, 2009.
- [13] Grant R. Fowles, Introduction to Modern Optics, 2nd ed., New York, 1975.
- [14] K. H. Yang, J. Appl. Phys. 84, 4780, 1988.

- [15] S. J. Hwang, S. T. Lin, C. H. Lai, *Optics Communications* 260, 614–620, 2006.
- [16] S. J. Hwang, M. H. Hsu, *Journal of the SID* 14/11, 1039-1043, 2006.
- [17] Agilent 5529A Dynamic Calibrator Data Sheet, Agilent Technologies, U.S.A., 2001.

