

國立交通大學

影像與生醫光電研究所

碩士論文

用三角波法量測液晶盒內離子濃度及其討論分析

Measurement and Analysis of Ionic Concentrations in Liquid Crystal
Cells by Triangular-Wave Method

研究生：林禹任

指導教授：楊界雄 教授

中華民國一百年七月

用三角波法量測液晶盒內離子濃度及其討論分析

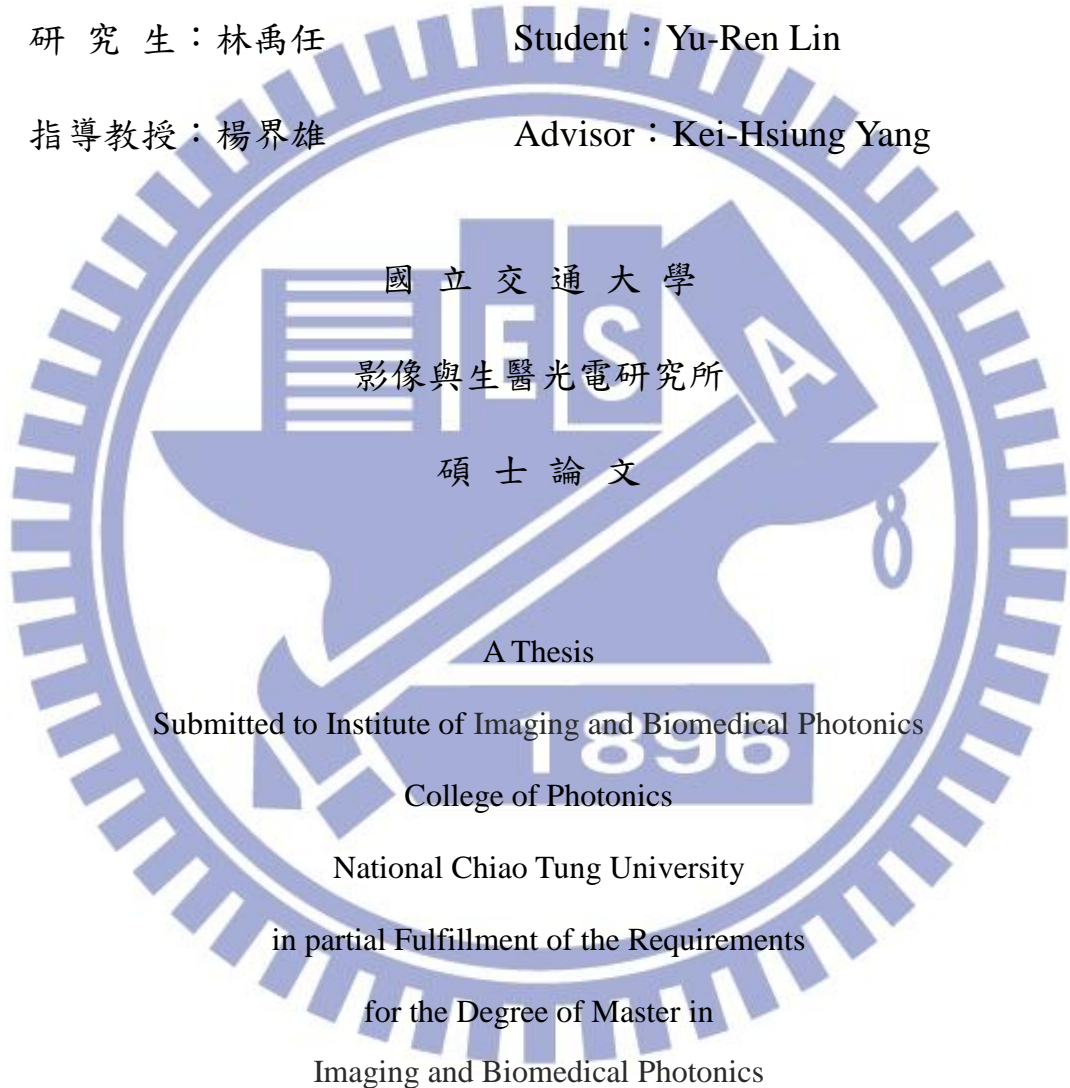
Measurement and Analysis of Ionic Concentrations in Liquid Crystal
Cells by Triangular-Wave Method

研究生：林禹任

Student : Yu-Ren Lin

指導教授：楊界雄

Advisor : Kei-Hsiung Yang



Submitted to Institute of Imaging and Biomedical Photonics
College of Photonics
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master in
Imaging and Biomedical Photonics

July 2011

Tainan, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇一年七月

國立交通大學

論文口試委員會審定書

本校影像與生醫光電研究所碩士班林禹任君

所提論文用三角波法量測液晶盒內離子濃度及其討論分析

合於碩士資格標準、業經本委員會評審認可。

口試委員：

許家榮

楊昇斌

鄭協忠

指導教授：

楊昇斌

所長：

陳信宏

院長：

陳信宏

中華民國 100 年 7 月 8 日

摘要

輸入三角電壓波量測液晶盒中離子總電荷量的概念，先後由日本東北大學的 K. Ono 先生和 J. Nakanowatari 先生以及 Toyo 公司的 M. Inoue 先生所提出，再利用量測之離子電荷密度的多寡來觀測其對於液晶顯示的影響。

本論文中之液晶盒皆為奇美提供之扭曲型液晶盒，我們設計一電路來放大量測的電流訊號，並利用類似的三角波量測法量測液晶盒中的離子電流。

我們在實驗中觀察到三角波法下所獲得之離子電流曲線和 Toyo 發表的文獻中所報導的結果有所不同，為了瞭解本論文量測到得離子電流機制，本論文引用楊界雄教授所發表的鐵電性液晶層中高、低解離率離子的概念，並且對楊教授發表公式稍做修改，修改成符合本實驗條件的公式，最後利用修改的公式來對照且分析本實驗中所觀測的離子電流物理機制。

利用上述物理模型能夠很清楚的解釋本論文中，不同溫度下三角波量測法所獲得的離子電流機制，並利用此物理模型來估算出扭曲型液晶盒中的高、低解離率離子的遷移率、不同溫度下低解離率離子的平衡濃度以及離子遷移時所需的活化能。

本論文也量測直接在 ITO 電極表面上做配向動作的扭曲型液晶盒，並用以照 UV 光與沒照 UV 光的做比較，發現照 UV 光後產生了許多高、低解離率的離子，不過照 UV 光後高、低解離率離子產生機制的研究，將不在本論文中討論。

另外利用 Toyo 機台作量測分析時，量測液晶盒中離子電荷量的方法，所使用的是操作者人為判斷來得到液晶盒中離子電荷密度的多寡。這樣的判別方式難免不夠客觀，為了客觀地分析數據，避免不同操作者主觀操作下所造成之誤差，本論文利用數學軟體 Matlab，針對量測離子電荷密度寫了一套自動化的計算方式。

Abstract

Triangular voltage waveforms have been used by Ono and Nakanowatari and Inoue to measure the ion currents of ferroelectric and nematic liquid crystal cells, respectively. In this thesis, we also used similar method with more sensitive circuits for low-level signals to measure ionic currents in TN test cells supplied by a TFT-LCD-panel-maker at different temperatures.

Our measured results had substantial differences from that published in Inoue's paper. In order to understand our experimental results, we used modified models of ionic generation and transport equations published for EPD x-ray imager and ferroelectric liquid crystal cells. We have compared our experimental results with numerical computations based on our new interpretation and obtained a good agreement between them. We used the facts that the measured ionic currents consisted of ions from both high-(HIR) and low-ionization-rate (LIR) impurities with different temporal behaviors for the determinations of ion concentration and mobility for HIR impurities and mobility, ion-recombination rate, and equilibrium ion concentration for LIR impurities within the TN cell. We have determined the ionizing activation energy of LIR impurities and also, for the first time, the mobility activation energy (in the range of 0.15 to 0.16 eV) for ions of LIR impurities within different TN cells.

We have also made measurements on a TN cell aligned by rubbed ITO layers on glass substrates before and after subjected to uv-irradiation. The measured results showed negligibly small ionic currents prior to uv-irradiation. After uv-irradiation, the measured ionic currents increased by several orders of magnitude with comparable contributions from both uv-induced HIR and LIR impurities. Further investigation of observed phenomena is not a subject of this thesis.

Furthermore, Inoue used intuitive manual base-line subtraction methods to obtain data of ionic current versus time to derive ion concentrations or ion densities (a sum of contributions from both HIR and LIR impurities). The results were subjected to variations from different manual operators so that they were useful only for relative comparisons and references. To remove subjective uncertainties, we have also developed a new numerical method implemented as Matlab programs to analyze our data for objective derivations of ionic currents with improved accuracy. We believe that our method of analysis can avoid unnecessary subjective errors as practiced from the teaching of Inoue's paper or suggested by Toyo Corporation that has sold similar products to global LCD industries.

致謝

兩年的時光飛也似得過去，終於到了要離開碩士的階段，很高興能加入楊界雄老師實驗室這樣一個大家庭，讓我在碩士研究的兩年裡獲益匪淺。

首先對於楊界雄老師的指導懷抱著感恩的心，感謝老師對於我在做研究上的方向引導，讓我從迷茫的碩士研究中得到一盞明燈，也從中享受做研究的樂趣。除此之外，我也從老師的身上感受並學習做研究應有的熱誠與態度，更從老師平時的言談中，得到許多人生的道理以及對於做人處事的不同觀念，也學習到西方教育與東方教育下不同的處事思維。

感謝奇美電子韋忠光協理、謝志勇經理、徐旭寬副理、張孟潔專案副理以及廖炳輝工程師，感謝你們提供液晶樣品以及研究上的指導，就如同老師說的：「沒有好的樣品就沒有好的研究成果！」，在此表示衷心的感謝。

感謝鄭協昌老師讓我架設我自己研究以外的其它量測系統，使我從中設計了許多實驗載具，體驗不同研究設備。也感謝裴廷漢博士給予我數學軟體程式設計上的各種幫助。

另外也謝謝本實驗室的信旭在我有物理觀念上的問題時，能幫我解決疑惑；謝謝偉翔在 Matlab 軟體上的協助，讓我更加熟悉此軟體的程式撰寫；謝謝智豪在我有數學計算上的難題時，幫我順利解決種種難題。還有謝謝學弟妹：聖雅、偉彥、皇明以及菀君，提供研究上光學、電學、材料上的幫助，也謝謝他們的加入讓實驗室更像一個大家庭相處更融洽。

也感謝隔壁實驗室的同學們：杰倫學長、子洋、唐維、俊歲、建宏以及學弟尚伯、瀚翔、權恩、建宏、岱樺，謝謝你們在各方面的協助。

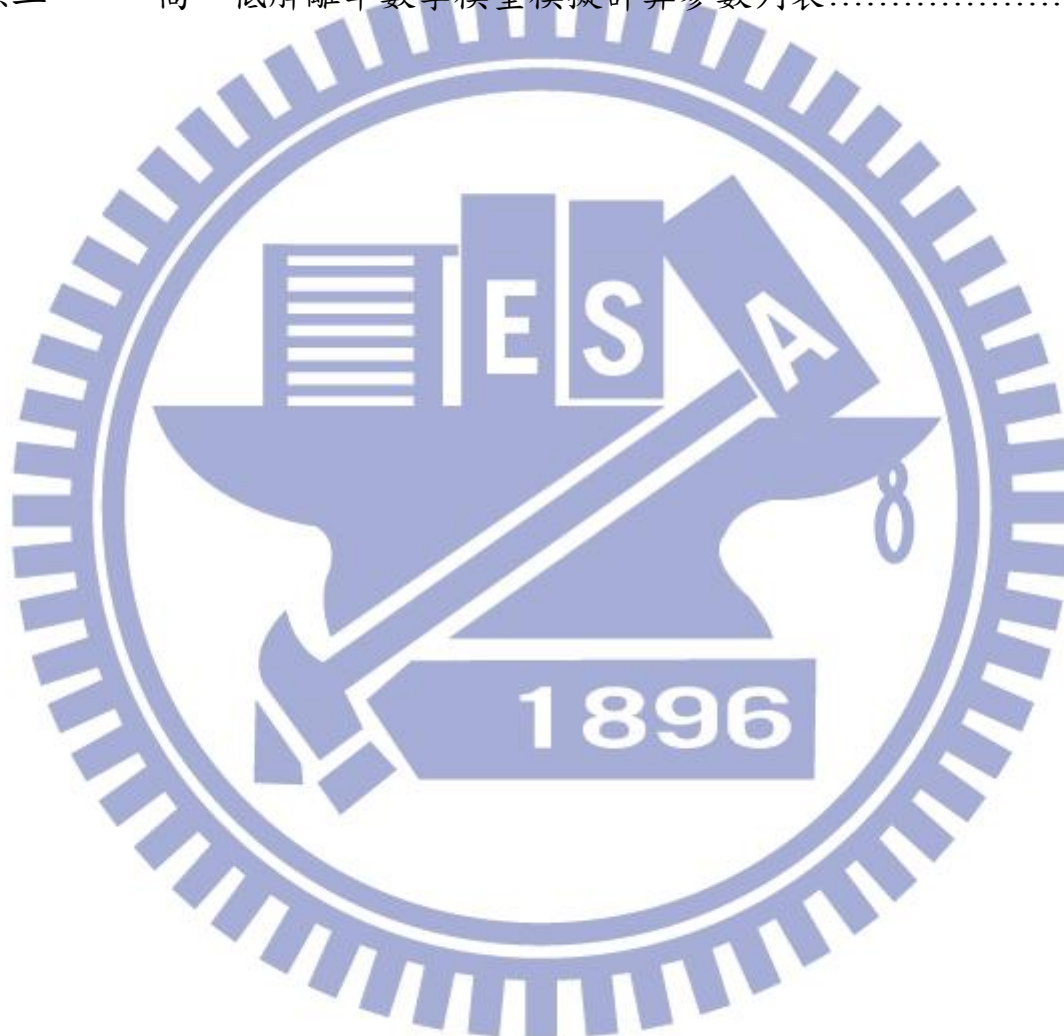
最後感謝我的父母：林萬枝先生和黃麗雲女士，感謝你們無條件支持我繼續念碩士班，在心理上給予我鼓勵以及處事觀，在實務上提供自家機械設備，讓我需要設計實驗器具時得到我最大的幫助，讓我擁有實務的機械加工底子，進而讓我設計出可用的實驗器具，幫助實驗室解決硬體上的載具問題……謝謝！



目 錄

中文提要	.....	i
英文提要	.....	ii
致謝	.....	iii
目錄	.....	v
表目錄	.....	vii
圖目錄	.....	ix
符號說明	.....	xii
一、	緒論	
1.1	離子效應對液晶顯示器的影響	
1.1.1	電壓保持率(VHR).....	1
1.1.2	影像殘留(Image sticking).....	1
1.2	電學量測離子濃度方法.....	2
1.2.1	電壓保持率量測法.....	2
1.2.2	暫態電流(Transient current)量測法.....	3
1.2.3	三角波波形量測法.....	4
1.3	論文研究重點以及目的.....	6
二、	實驗方法	
2.1	電路架構.....	7
2.2	實驗系統架構.....	8
2.3	離子濃度取值方法.....	9
2.4	電路校正、可靠度測試.....	11
2.5	實驗樣品、實驗條件.....	13
三、	實驗結果綜合討論與分析	
3.1	三角波電流曲線對溫度的影響.....	14
3.2	離子電流的擷取流程.....	21
3.3	液晶層中離子高、低解離率的概念.....	24
3.3.1	高解離率離子.....	24
3.3.2	低解離率離子.....	25
3.3.3	高、低解離率離子濃度造成的離子電流.....	27
四、	三角波波形量測離子電流數學模型.....	28
4.1	三角波波形量測下高解離率離子電流之數學模型.....	29
4.2	三角波波形量測下低解離率離子電流之數學模型.....	30

五、	高、低解離率數學模型與實際量測的離子電流比較討論.....	31
5.1	LC-1 液晶盒之討論分析.....	32
5.2	LC-3 液晶盒之討論分析.....	37
5.3	LC-2 液晶盒之討論分析.....	40
5.4	LC-4 液晶盒之討論分析.....	43
六、	結論與未來展望.....	47
參考文獻	.....	48
附錄一	液晶盒相關參數列表.....	51
附錄二	高、低解離率數學模型模擬計算參數列表.....	52



表目錄

表 2.4.1 可靠度測試所使用電壓溫度以及液晶條件

表 2.4.2 室溫(25°C)離子量測比較表

表 2.4.3 高溫(60°C)離子量測比較表

表 2.5.1 實驗電壓、溫度以及液晶條件

表 2.5.2 實驗中所使用的儀器廠牌以及型號

表 3.1.1 公式 3.1.1~公式 3.1.5 的變數物理意義對照表

表 3.1.2 LC-1 不同溫度下的離子電荷密度

表 3.1.6 LC-2 不同溫度下的離子電荷密度

表 3.1.7 LC-3 不同溫度下的離子電荷密度

表 3.1.8 LC-4 不同溫度下的離子電荷密度

表 3.3.1.1 公式 3.3.1.2 和公式 3.3.1.3 中參數的物理意義

表 3.3.2.1 公式 3.3.2.2 和公式 3.3.2.3 中各參數物理意義

表 3.3.2.2 公式 3.3.2.4~ 公式 3.3.2.8 方程式中所有參數之物理意義

表 4.1 公式 4.1 方程式中所有參數之物理意義

表 5.1.1 LC-1 模型模擬參數

表 5.1.2 LC-1 不同溫度之遷移率對照表

表 5.1.3 不同溫度互相計算的 E_{mobility}

表 5.1.4 LC-1 在 25°C、40°C、60°C 下，不加電壓之平衡濃度

表 5.2.1 LC-3 模型模擬參數

表 5.2.2 LC-3 不同溫度之遷移率對照表

表 5.2.3 LC-3 不同溫度互相計算的 E_{mobility}

表 5.2.3 LC-3 在 25°C、40°C、60°C 下，不加電壓之平衡濃度

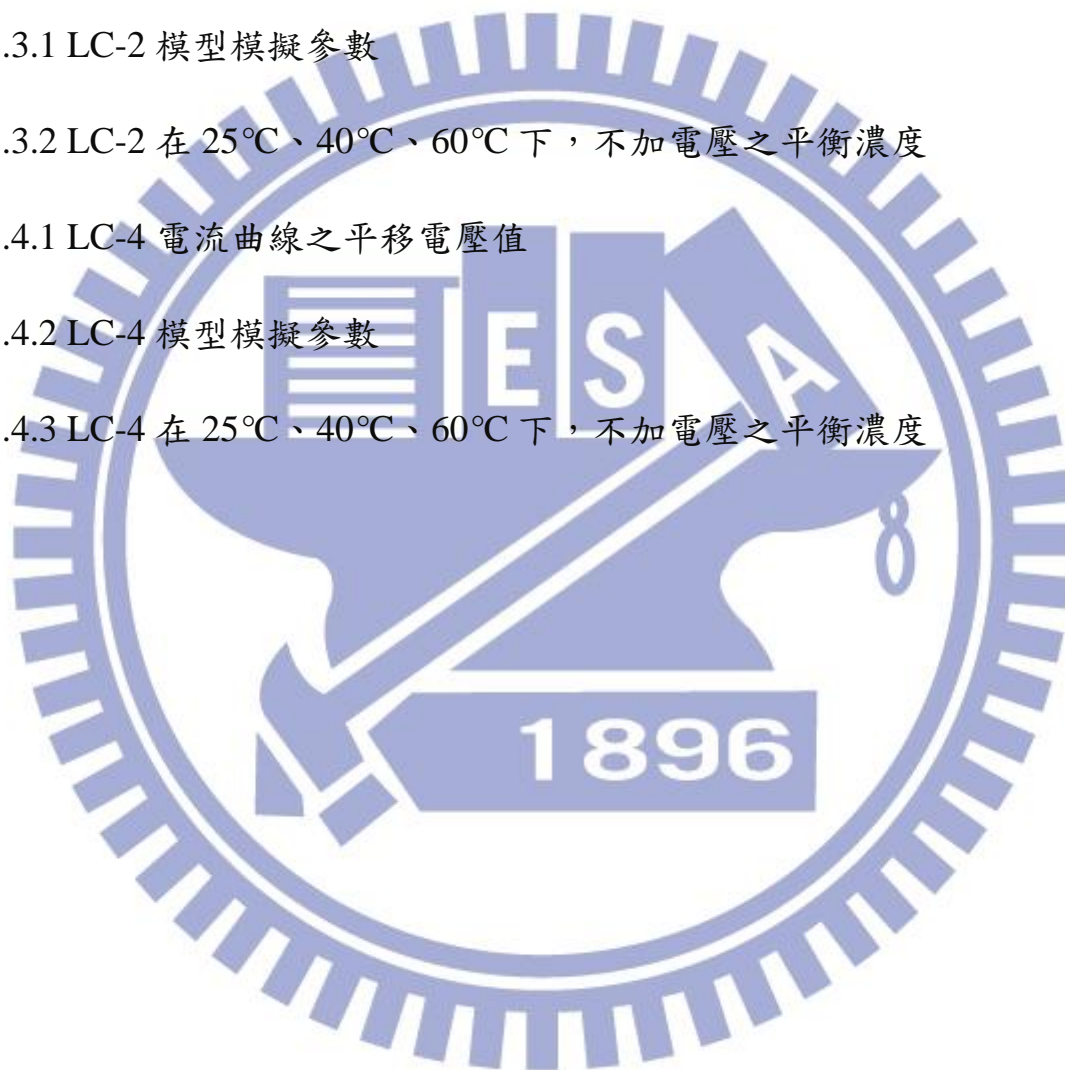
表 5.3.1 LC-2 模型模擬參數

表 5.3.2 LC-2 在 25°C、40°C、60°C 下，不加電壓之平衡濃度

表 5.4.1 LC-4 電流曲線之平移電壓值

表 5.4.2 LC-4 模型模擬參數

表 5.4.3 LC-4 在 25°C、40°C、60°C 下，不加電壓之平衡濃度



圖目錄

圖 1.2.1.1 VHR 電路架構示意圖

圖 1.2.1.2 VHR 量測結果示意圖

圖 1.2.2.1 暫態電流量測電路示意圖

圖 1.2.2.2 暫態電流時間對電流示意圖

圖 1.2.3.1 量測的電壓(時間)對電流示意圖

圖 2.1.1 電流轉電壓放大器電路架構

圖 2.2.1 實驗系統架構

圖 2.3.1 半周期下(.5V~5V)的時間對電流圖

圖 2.3.2 量測離子濃度的 Matlab 程式撰寫流程

圖 3.1.1 LC-1 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

圖 3.1.2 LC-2 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

圖 3.1.3 LC-3 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

圖 3.1.4 LC-4 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

圖 3.1.5 LC-5 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

圖 3.2.1 擷取離子電流步驟一示意圖

圖 3.2.2 擷取離子電流步驟二示意圖

圖 3.2.3 擷取離子電流步驟三示意圖

圖 3.2.4 擷取離子電流步驟四示意圖

圖 5.1.1 LC-1 三種溫度下實驗與模型之電流曲線比較圖

圖 5.1.2 LC-1 遷移率之溫度效應模擬與量測比較圖

圖 5.1.3 25°C LC-1 量測與模型分析

圖 5.1.4 40°C LC-1 量測與模型分析

圖 5.1.5 60°C LC-1 量測與模型分析

圖 5.2.1 LC-3 三種溫度下實驗與模型之電流曲線比較圖

圖 5.2.2 LC-3 遷移率之溫度效應模擬與量測比較圖

圖 5.2.3 25°C LC-3 量測與模型分析

圖 5.2.4 40°C LC-3 量測與模型分析

圖 5.2.5 60°C LC-3 量測與模型分析

圖 5.3.1 LC-2 25°C 實驗與模型比較

圖 5.3.2 40°C LC-2 實驗與模型比較

圖 5.3.3 60°C LC-2 實驗與模型比較

圖 5.3.4 60°C LC-2 遷移率溫度效應實驗與模型比較

圖 5.4.1 LC-4 三種溫度下實驗與模型之電流曲線比較圖

圖 5.4.2 LC-4 三種溫度下實驗數據平移與模型之電流曲線比較圖

圖 5.4.3 25°C LC-4 數據(平移前)

圖 5.4.4 25°C LC-4 數據(平移後)

圖 5.4.5 40°C LC-4 數據(平移前)

圖 5.4.6 40°C LC-4 數據(平移後)

圖 5.4.7 60°C LC-4 數據



符號說明

ϵ_{\perp} : 垂直介電常數

ϵ_{\parallel} : 平行介電常數

N : 莫耳數/立方公分

h : Onsager 理論中惰性場下的因子

F : Onsager 理論中惰性場下的因子

μ_p : 永久偶極矩

α_{\parallel} : 沿分子軸方向上的極化度

α_{\perp} : 垂直於分子軸方向上的極化度

k : Boltzmann constant (eV/K)

T : 溫度 (K)

S : 有序參數(Order parameter)

θ : 永久偶極矩和分子長軸之間的夾角

T_c : 液晶澄清溫度 (K)

r : 材料常數

K_{11} : splay 形變之彈性常數 (pN)

K_{22} : twist 形變之彈性常數 (pN)

K_{33} : bend 形變之彈性常數 (pN)

n_H : 提供移動電流的高解離率離子濃度 ($1/m^3$)

μ_H ：高解離度離子在液晶層中的遷移率 ($\text{m}^2/(\text{V}*\text{sec})$)

E ：外加電場值 (V/m)

R ：電壓對時間的斜率 (V/t)

d ：液晶層的厚度 (μm)

J_H ：高解離率離子造成的電流密度 (A/m^2)

q ：一個電子帶的電量 (C)

n_w ：提供移動電流的低解離率離子濃度 ($1/\text{m}^3$)

β ：低解離率中性分子之解離速率 ($1/\text{sec}$)

α ：低解離率離子之合成速率 (m^3/sec)

μ_w ：低解離度離子在液晶層中的遷移率 ($\text{m}^2/(\text{V}*\text{sec})$)

J_w ：低解離率離子造成的電流密度 (A/m^2)

U_0 ：不加電場時，低解離率離子之活化能 (eV)

$\Delta U(E)$ ：外加電場下，離子位能增加量 (eV)

x_0 ：離子位能最大時與電性相反的離子之間的距離 (m)

ε ：介電常數

$V(t)$ ：外加電壓 (V)

t ：外加電壓施加時間 (sec)

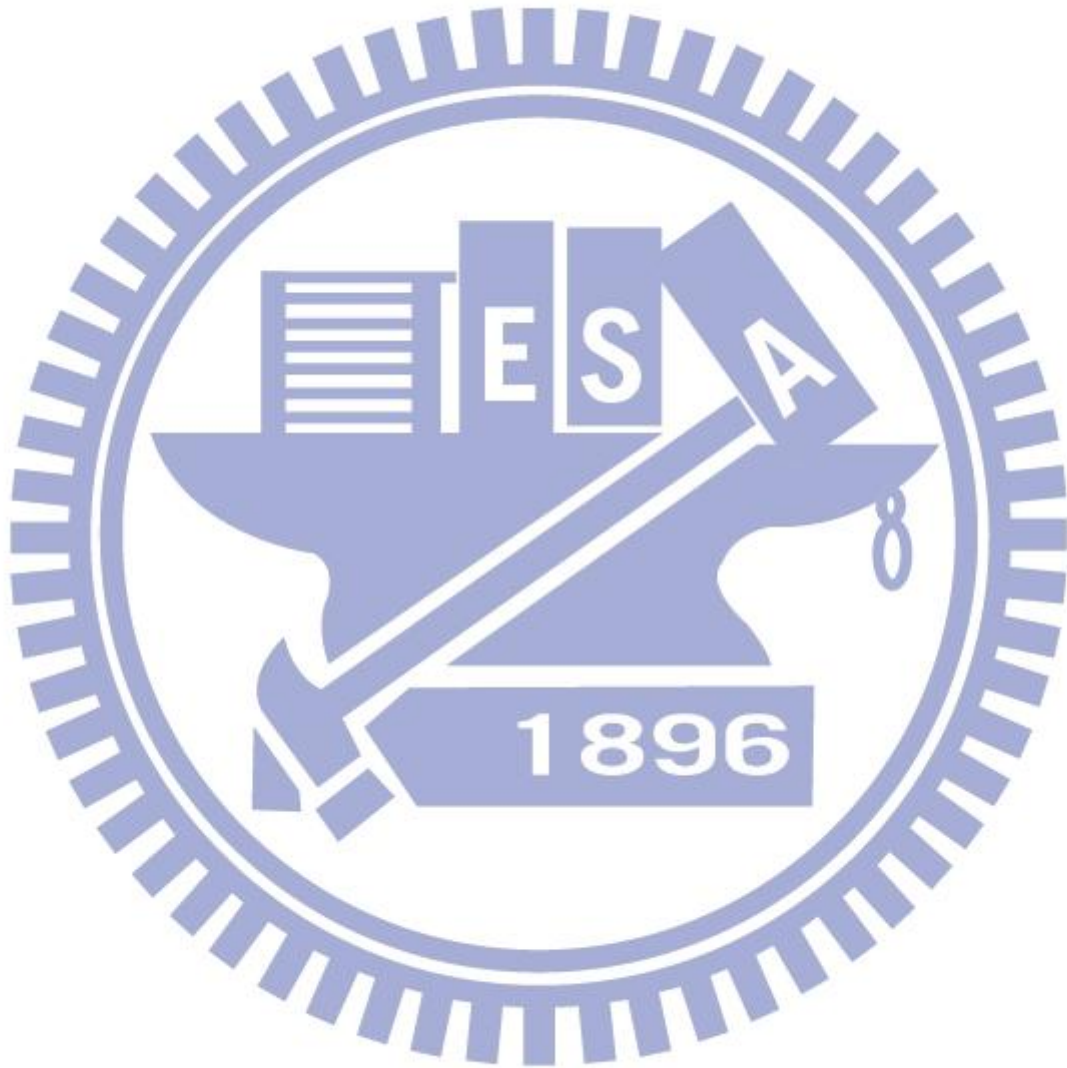
n_{H0} ：沒加電壓時，LC cell 中高解離率離子的離子濃度 ($1/\text{m}^3$)

I_H ：高解離率離子造成的電流 (A)

I_w ：低解離率離子造成的電流 (A)

I_{total} ：高、低解離率離子造成的總電流 (A)

$E_{mobility}$ ：離子遷移率所需之活化能



一、緒論

1.1 離子效應對液晶顯示器的影響

1.1.1 電壓保持率 (Voltage Holding Ratio; 簡稱 VHR)[1]

一般在高階的液晶顯示器，都是使用主動陣列來做驅動，這樣的驅動方式所擁有的好處是可以讓掃描畫素的時間很短，而且在同等大小的顯示器下，主動陣列會比被動陣列顯示器顯示的畫面更亮、更銳利，而且有更短的反應時間。不過也因為掃描畫素的時間很短，也代表每一個畫素的充電時間也變短，所以當畫素不被選擇、不再充電時，畫素將會放電，在開路的情況下，畫素的電壓會下降，這樣的電壓表現會反映在液晶顯示器的光學表現上，如果 VHR 比較高顯示的畫面將會更均勻。在低頻驅動時離子電荷會被吸附到液晶層與配向層之間的界面，形成內建電場造成遮蔽效應 (Screening Effect)，如此一來 VHR 會降低。

1.1.2 影像殘留(Image Sticking effect)[2]

利用液晶顯示器欣賞節目時，最容易因為離子效應而被消費者察覺的現象應該屬影像殘留了。當液晶顯示器長時間顯示一個畫面時，在停止外加的電場後，液晶顯示器上可能會有部分的畫面殘留，這種現象就稱為影像殘留。此現象是因為離子沿液晶傾角(tilt angle)往液晶盒上、下電極方向移動，最後離子到達配向層(Alignment Layer)而停止，當離子聚集的量足以影

響驅動液晶電壓時，會造成液晶盒穿透率改變。此時如果作畫面的切換，而離子又沒有辦法馬上離開液晶和配向層邊界的話，顯示畫面將會看到因為離子聚集處產生的內建電場造成此處的穿透率和其它區域的穿透率不同，消費者就會在下一個畫面上看到前一個畫面的部分殘留畫面，這就是形成影像殘留的原因。

1.2 電學量測離子濃度方法

1.2.1 電壓保持率量測法[1]

電路架構如圖 1.2.1.1 所示，其中 V_g 是給開關的訊號，當施加 V_g 時 V_s 的電壓會形成閉迴路，此時 V_s 的電壓變會對液晶(LC)充電，當 V_g 變成零時， V_s 會形成開迴路，此時 V_s 的電壓變無法供給 LC，LC 就會開始做放電的動作。以上整個液晶放電的過程，都可以藉由示波器看 V_{out} 的變化。

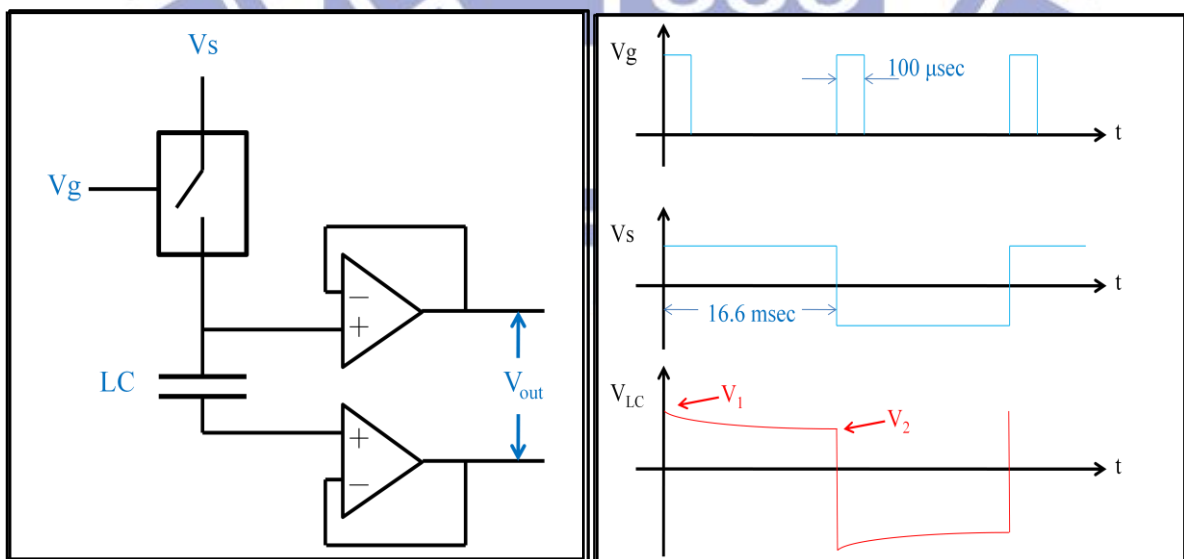


圖 1.2.1.1 VHR 電路架構示意圖

圖 1.2.1.2 VHR 量測結果示意圖

再將 V_{out} 除以放大倍率可以得到 V_{LC} 如圖 1.2.1.2 所示，VHR 的計算公式：

$$VHR = \frac{V_2}{V_1} * 100\% \quad (1.2.1.1)$$

1.2.2 暫態電流(Transient current)量測法[3]、[4]、[5]

量測電路架構如圖 1.2.2.1 所示，所施加的電壓屬於方波，電壓訊號經過 LC 後，變成電流輸出，因為 LC 的電阻很大，所以輸出的電流很小，因此需要一放大電路將出 LC 的電流放大方便作量測。量測時須注意驅動電壓必須小於 LC 的臨界電壓，避免在做離子濃度計算時將 LC 分子轉動造成的電流一併計算進去。

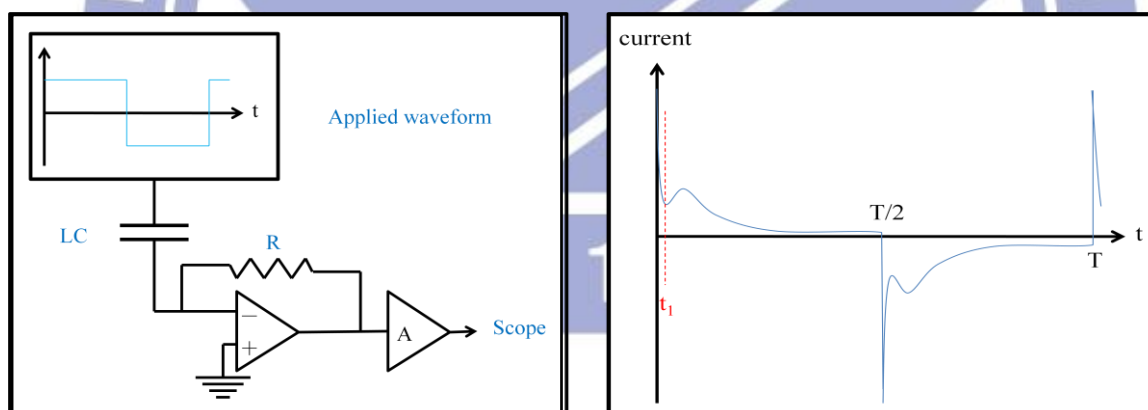


圖 1.2.2.1 暫態電流量測電路示意圖 圖 1.2.2.2 暫態電流時間對電流示意圖

最後得到的時間對電流作圖，如圖 1.2.2.2 所示，圖中在 t_1 到 $T/2$ 的時間內產生的電流峰值則為離子移動所產生的。因此計算離子濃度的方法為對 t_1 到 $T/2$ 的時間內的電流值做積分，也就是 t_1 到 $T/2$ 的時間內電流曲線下的面積大小，積分後的值即為離子濃度。

不過這種方式有些許壞處，第一因為有電壓反轉所以會造成湧現電流

(Rush Current)，如此一來會使得數據分析有誤差。第二如果離子濃度過小，電流對時間作圖中上述的電流峰值會因為訊罩比過小，而被背景的電流雜訊所掩蓋掉，如此一來電流峰值變不易判斷，進而導致無法計算離子濃度。

1.2.3 三角波波形量測法[6]、[7]、[8]、[9]

一般來說如果會產生湧現電流(Rush Current)的量測條件，是因為有電壓反轉造成湧現電流的產生，上述的量測方式都會有電壓反轉的情形發生，如此一來常常會在解析數據時造成人為的誤判，進而使量測的數據有較大的誤差。三角波量測電流沒有電壓反轉的問題，因為施加的三角波是漸變的，除了可以避免電壓反轉造成的湧現電流，而且當使用漸變三角波時，電壓是由低到高，在較低電壓時，離子會先感受到電場而開始移動，當開始移動時外部就可以量測到其增加的電流，當漸變電壓大過液晶轉動的臨界電壓時，此時液晶開始轉動，在量測時就會量測到液晶轉動增加的電流，由上述的關係可以從電流曲線上分辨出離子產生的電流與液晶轉動產生的電流，從離子電流的曲線中就可以計算出液晶盒中離子帶電量的大小。由文獻[9]中我們可以藉由這樣的量測得到其他的液晶盒參數，量測到的電壓或是時間對電流示意圖如圖 1.2.3.1 所示，圖中標記①為離子移動造成的電流，標記②為液晶轉動造成的電流，標記③為量測之液晶盒阻值，標記④為量測液晶盒樣品的垂直電容(C_{\perp})，標記⑤則為液晶盒的平行電容(C_{\parallel})，標

記⑥為量測之液晶盒中離子移動時間。

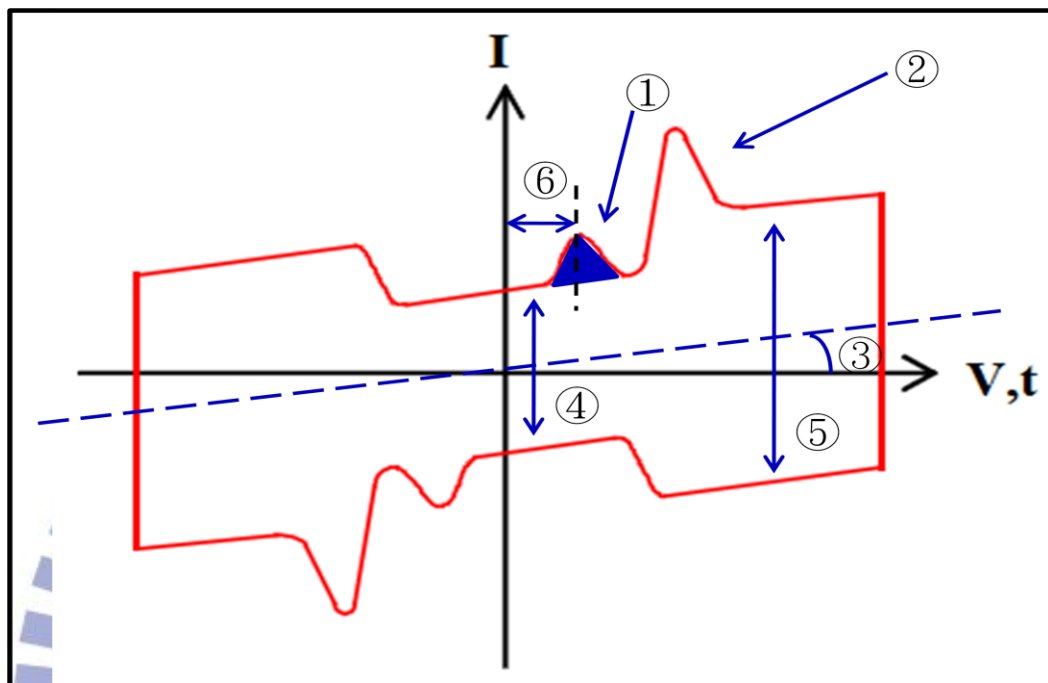


圖 1.2.3.1 量測的電壓(時間)對電流示意圖

1.3 論文研究重點以及目的

由過去文獻探討中可以知道，利用電流來量測液晶中離子濃度的方法有不少，不過因為利用方波量測時會有湧現電流的產生，進而容易造成量測上的誤差，因此本論文中的量測以三角波作電流量測分析。為了能更清楚三角波形電流量測所獲得離子曲線之物理意義，本論文中主要探討三角波量測下離子電流曲線的物理解釋，並利用物理模型來分析量測到的電流曲線所包含的物理意義。進而探討在不同溫度下之三角波形量測，得到的電流曲線圖之物理意義解析，並且分析溫度效應對於電流曲線之變化。



二、實驗方法

2.1 電路架構[13]、[14]

本實驗用的電流轉電壓放大器電路架構如圖 2.1.1 所示，當訊號產生器施加漸變三角波電壓時，液晶會輸出一非常微小的電流 I_{in} ，此電流 I_{in} 會經過一個電流轉電壓放大器線路，以及一個電壓放大器線路，最後變成電壓訊號 V_{out} 輸出由示波器截取。其中紅色虛線所框起來的部分屬於電流轉電壓放大器，可將輸入的電流放大 10^6 倍轉成電壓輸出，其截止頻率為 1.59 赫茲。另外由藍色虛線所框起來的部分，屬於電壓放大器，可將輸入的電壓放大 10 倍輸出，其截止頻率為 3.39 赫茲。由上述可知出液晶的電流 I_{in} 等於示波器量測到的電壓 V_{out} 除以 10^7 ，因此可以得到液晶的電流變化曲線。

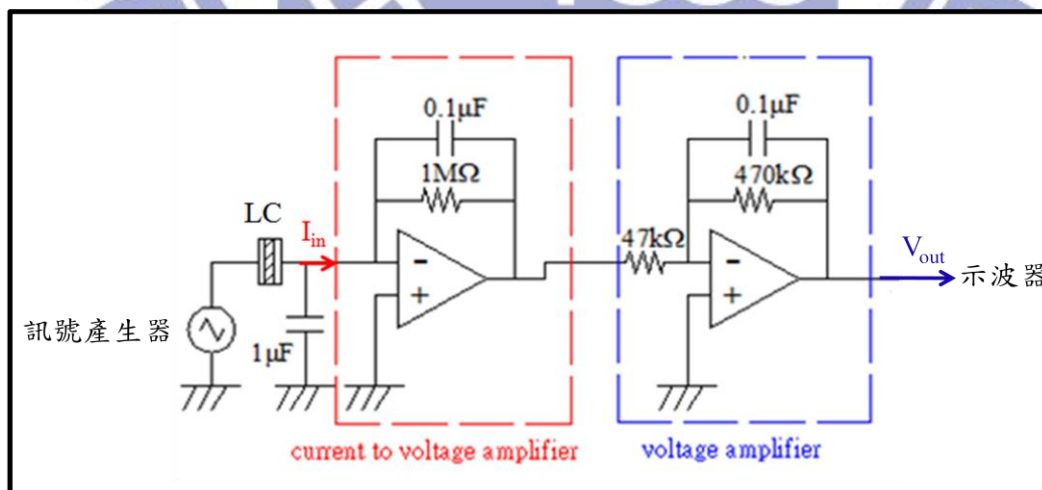


圖 2.1.1 電流轉電壓放大器電路架構

2.2 實驗系統架構

實驗系統架構如圖 2.2.1 所示，在本論文中實驗所用的加熱系統採用的是水循環加熱系統，利用水循環加熱的好處是，可以避免不必要的電流雜訊，由 2.1 可以知道電流的值非常小，因此任何一點雜訊都會造成量測上極大的誤差，因此利用水循環加熱，可以在量測上有更精確的結果，免除不必要的誤差值。

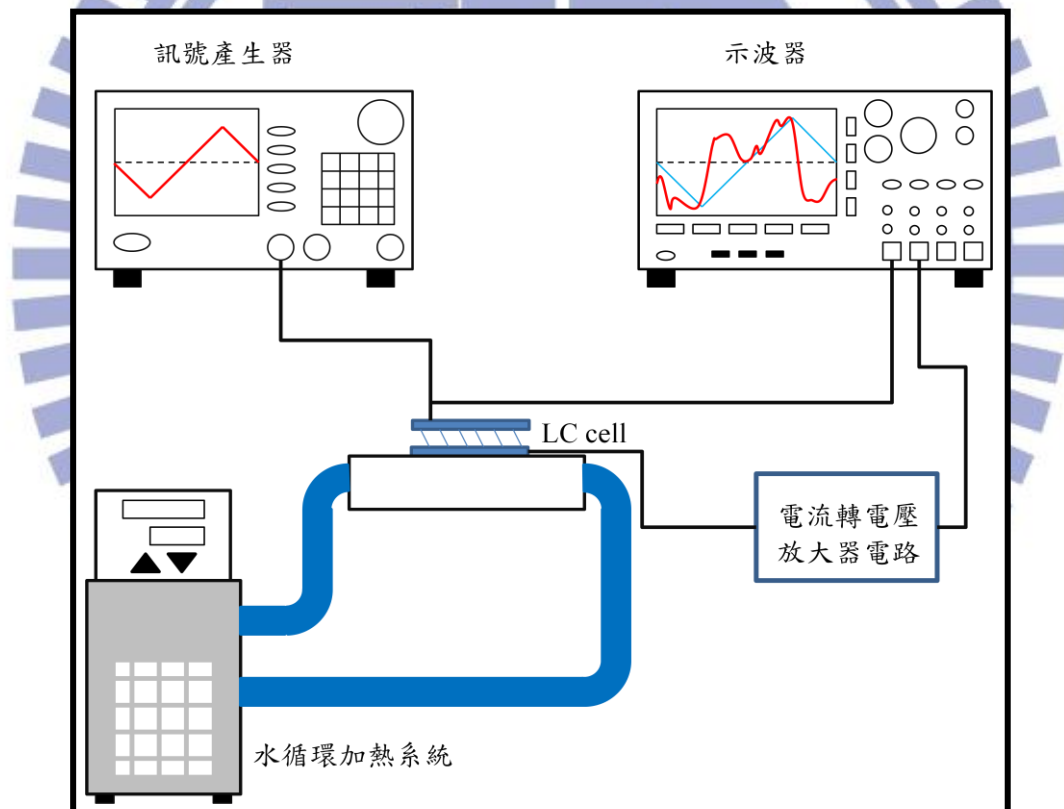


圖 2.2.1 實驗系統架構

2.3 離子總電荷量取值方法[15]

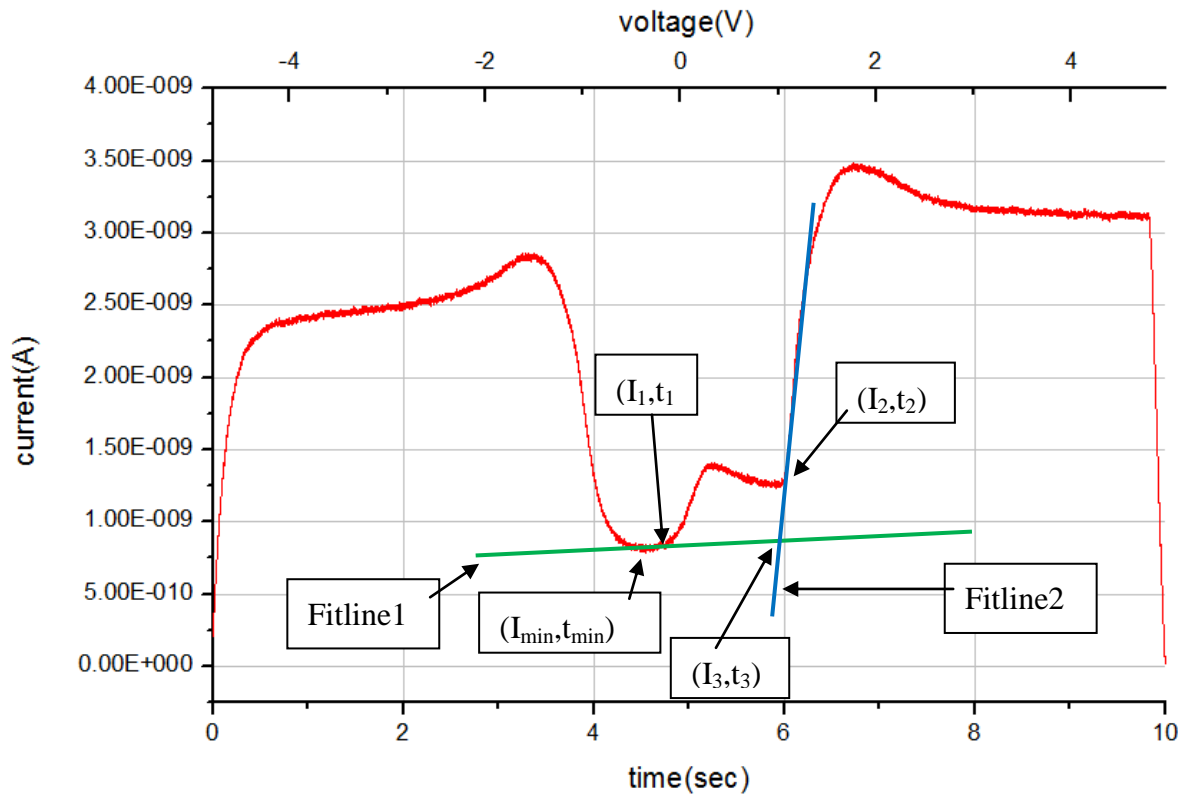


圖 2.3.1 半周期下(-5V~5V)的時間對電流圖

圖 2.3.1 為三角波 .5V~+5V~.5V 的半周期 .5V~+5V 的電流隨時間截取圖，取離子峰值出現前的電流最小值 I_{\min} (步驟 1)，之後在離子開始產生電流前找到 (I_1, t_1) (步驟 2)，對 (I_{\min}, t_{\min}) 到 (I_1, t_1) 之間的點 Fit 可以得到直線 Fitline1 (步驟 3)，在液晶轉動產生的電流區域會呈現線性的部分，找出線性起始之後的點 (I_2, t_2) (步驟 4)，對此點之後線性部分的點進行 Fit 可以得到 Fitline2 (步驟 5)，由直線 Fitline1 和 Fitline2 可以得到一個交點 (I_3, t_3) (步驟 6)，對曲線從 t_1 到 t_2 積分得到 A_1 值，再用 A_1 減去由 (I_1, t_1) 、 $(I_1, 0)$ 、 $(I_2, 0)$ 、 (I_2, t_2) 、 (I_3, t_3) 形成的五邊型面積 A_2 可以得到離子移動造成的電流面積 A_3 ，由基本理論 $Q=I*t$

知道此法計算出來的面積為離子總電荷量。程式撰寫步驟流程如圖 2.3.2：

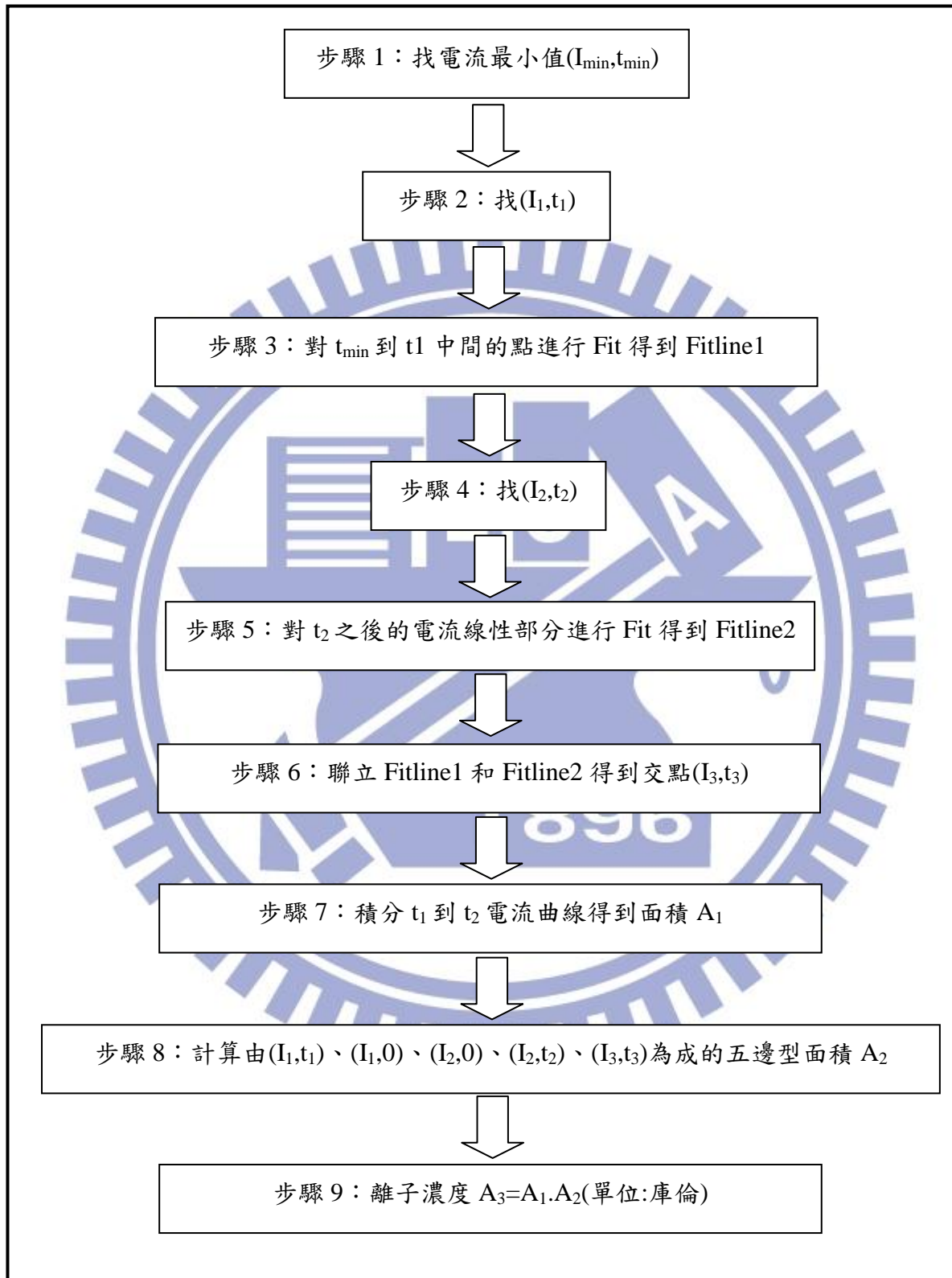


圖 2.3.2 量測離子總電荷量的 Matlab 程式撰寫流程

2.4 電路校正、樣品測試

為了確認本論文中所使用的放大電路之放大倍率，我們先利用一電阻其電阻值約為本論文實驗用之液晶盒電阻(100MΩ)，此時輸入一三角波電壓，將示波器量測到的電壓訊號，除以理想中的電流大小，可以得到放大電路的放大倍率，經由以上分析結果得到本實驗用的放大電路放大倍率為 9.2×10^6 。

為了確定本實驗電路在量測離子總電荷量時為可靠的，本實驗利用 2.1 的電路以及 2.3 所述之取值方式，將量測出的數值與使用 Toyo 機台量測出來的結果作比較，看離子電荷密度變化的趨勢以及量測出來的值是否相同。在本節中，我利用奇美的兩組液晶盒分別為低離子濃度(LC-A)以及高離子濃度(LC-B)，再對這兩組液晶盒分別作室溫(25°C)和高溫(60°C)的量測，本節中所施加的電壓訊號為三角波振幅 5.2 Vpp，頻率為 0.1 赫茲，如表 2.4.1 所示：

表 2.4.1 可靠度測試所使用電壓溫度以及液晶條件

電壓訊號條件	波形：三角波(Ramp.)
	振幅：5.2(Vpp)
	頻率：0.1(Hz)
溫度條件	室溫：25°C
	高溫：60°C
量測液晶盒編號	LC-A(低離子濃度)
	LC-B(高離子濃度)

實驗量測結果以及 Toyo 機台量測結果之比較，如表 2.4.2 以及表 2.4.3

所示：

表 2.4.2 室溫(25 °C)離子量測比較表

液晶編號	本論丈量測的離子量(pC/cm ²)	用 Toyo 機台所測的離子量(pC/cm ²)	誤差(%)
LC-A	23.43	22.54	3.94
LC-B	430.69	431.00	0.07

表 2.4.3 高溫(60 °C)離子量測比較表

液晶編號	本論丈量測的離子量(pC/cm ²)	用 Toyo 機台所測的離子量(pC/cm ²)	誤差(%)
LC-A	93.09	94.86	1.86
LC-B	923.50	1126.00	17.98

由表 2.4.2 以及表 2.4.3，可以本實驗用的實驗電路以及離子總電荷量的計算方式，都和 Toyo 機台量測的結果極為相近，除了高離子濃度外，因為量測高離子濃度時，經由人為判斷相較低離子濃度量測分析容易有誤差，不過比較後發現誤差值皆在許可範圍內，重要的是實驗中液晶樣品量測到的離子總電荷量與 Toyo 機台量測到的趨勢是一致的，因此由上述的關係，推論本實驗裝置在量測上是可行的。

2.5 實驗樣品、實驗條件

為了探討溫度的影響對於量測離子移動所產生的電流變化，本實驗中使用五種液晶盒，分別為 LC-1、LC-2、LC-3、LC-4 以及 LC-5，在利用上述五種液晶盒在以下三種溫度 25°C、40°C 以及 60°C 分別作量測，電壓條件則為三角波波形、振幅 10 伏特、頻率 0.05 赫茲，如表 2.5.1 所示，而表 2.5.2 則為本實驗使用的儀器廠牌及型號。附錄一：各液晶盒參數。

表 2.5.1 實驗電壓、溫度以及液晶條件

電壓訊號條件	波形：三角波(Ramp.) 振幅：10(Vpp) 頻率：0.05(Hz)
量測溫度條件	室溫：25°C 中溫：40°C 高溫：60°C
量測液晶盒編號	LC-1 LC-2 LC-3 LC-4(無配向層，有照 UV 光) LC-5(無配向層，沒照 UV 光)

表 2.5.2 實驗中所使用的儀器廠牌以及型號

儀器	廠牌	型號
訊號產生器	Tektronix	AFG 3021B
示波器	Tectronix	DPO 3014
直流電源供應器	GW Instek	GPS.3303
加熱系統(水循環)	Firstek	Model.B401L

三、實驗結果綜合討論與分析

3.1 三角波電流曲線對溫度的影響

圖 3.1.1 為 LC-1 量測結果電壓對電流作圖曲線，表 3.1.2 為各溫度下對應的離子電荷密度。

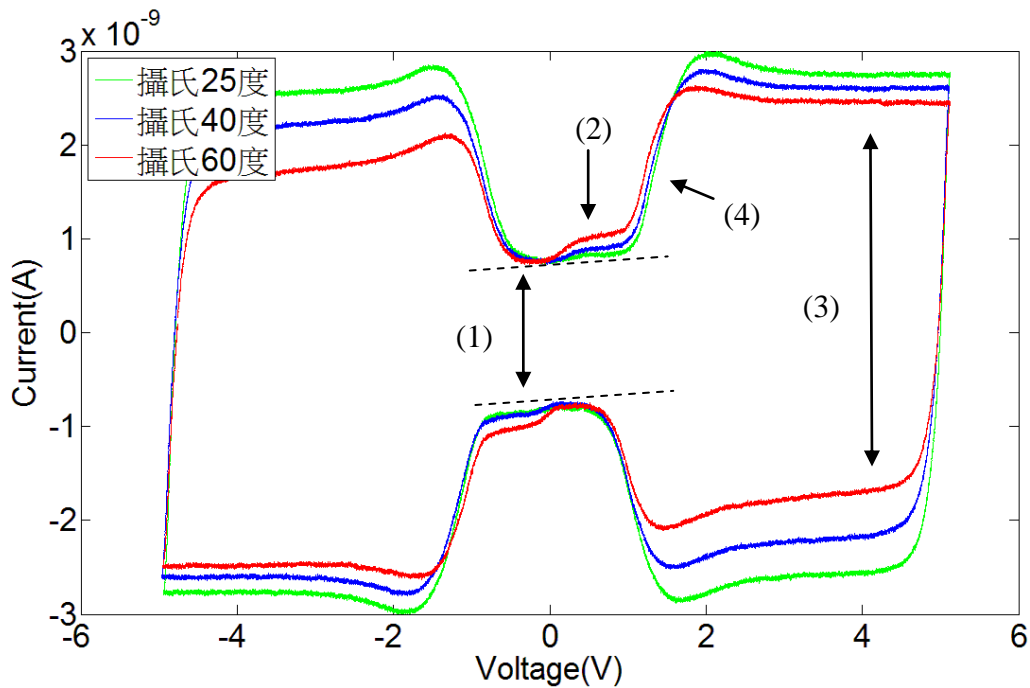


圖 3.1.1 LC-1 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

表 3.1.2 LC-1 不同溫度下的離子電荷密度

溫度	離子電荷密度(pC/cm ²)
25°C	63.19
40°C	97.08
60°C	178.07

圖中箭頭(1)以及(3)處的寬度大小分別與液晶垂直、水平電容值有關，可以發現隨著溫度上升此兩部分的寬度下降，也代表溫度上升時液晶的垂

直、水平電容值下降，液晶的垂直電容值 $C_{\perp} = \epsilon_{\perp} A/d$ ，因此 C_{\perp} 正比於 ϵ_{\perp} ，以及液晶的水平電容值 $C_{\parallel} = \epsilon_{\parallel} A/d$ ， C_{\parallel} 正比於 ϵ_{\parallel} ，由參考文獻[16]中，得知 ϵ_{\perp} 、 ϵ_{\parallel} 與溫度分別有公式 3.1.1 以及公式 3.1.2 的關係，方程式中各參數的物理意義如表 3.1.1 所示：

$$\epsilon_{\perp} = 1 + 4\pi N h F * \left\{ \bar{\alpha} - \frac{1}{3} \Delta\alpha S + F \frac{\mu_p^2}{3kT} \left[1 + \frac{1}{2} (1 - 3\cos^2\theta) S \right] \right\} \quad (3.1.1)$$

$$\epsilon_{\parallel} = 1 + 4\pi N h F * \left\{ \bar{\alpha} - \frac{2}{3} \Delta\alpha S + F \frac{\mu_p^2}{3kT} \left[1 - (1 - 3\cos^2\theta) S \right] \right\} \quad (3.1.2)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_{\parallel} + 2\alpha_{\perp}}{3} \quad (3.1.3)$$

$$\Delta\alpha = \alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp} \quad (3.1.4)$$

$$S = \left(1 - \frac{T}{T_c} \right)^r \quad (3.1.5)$$

表 3.1.1 公式 3.1.1~公式 3.1.5 的變數物理意義對照表

公式 3.1.1 到公式 3.1.5 中的參數	物理意義
N	莫耳數/立方公分
h	Onsager 理論中惰性場下的因子
F	Onsager 理論中惰性場下的因子
μ_p	永久偶極矩
α_{\parallel}	沿分子軸方向上的極化度
α_{\perp}	垂直於分子軸方向上的極化度
k	Boltzmann constant
T	溫度
S	Order parameter
θ	永久偶極矩和分子長軸之間的夾角
T_c	液晶澄清溫度
r	材料常數

箭頭(2)所指的部分則為離子電荷密度造成的電流曲線，不難發現其值隨溫度升高而增大，這是因為當溫度升高時，液晶層裡的中性分子變成離子

的活化能降低，所以在相同電壓的情況下，可以解離出更多的離子，所以離子電荷密度上升，電流曲線也上升。

另外在圖 3.1.1 中箭頭(4)所指的部分可以看到，當溫度升高時，液晶產生的電流曲線往低電壓的方向產生平移，也代表說當溫度升高時液晶的臨界電壓變小，一般常用的物理解釋可由下列公式公式 3.1.6、公式 3.1.7 以及公式 3.1.8 觀察出[16]、[17]：

$$\frac{1}{K_{11}} * \left(\frac{dK_{11}}{dt} \right) = \frac{2}{S} * \left(\frac{dS}{dt} \right) \quad (3.1.6)$$

$$\Delta \epsilon \propto S \quad (3.1.7)$$

$$V_{th} = \pi * \sqrt{\frac{K_{11}}{\epsilon_0 * \Delta \epsilon}} \quad (3.1.8)$$

將公式 3.1.6 中分別對等號左右兩邊的 K_{11} (splay 形變之液晶彈性係數) 以及 S 作積分，可以得到 K_{11} 正比於 S^2 ，同理 K_{22} (twist 形變之液晶彈性係數) 以及 K_{33} (bend 形變之液晶彈性係數) 正比於 S^2 ，再由公式 3.1.6、公式 3.1.7 以及公式 3.1.8 可以得到下式 V_{th} 與 S 的關係 EQ3.1.9：

$$V_{th} \propto \sqrt{S} \quad (3.1.9)$$

由上式可以觀察出，當溫度升高時，正比符號右邊根號中的數值變小，因此由上述可知當溫度上升時，液晶的臨界電壓變小。

另外因為在液晶轉動造成的電流曲線上，除了液晶本身轉動形成的電流外，還有因為離子移動造成的電流疊加在上頭，直觀來說當溫度升高時，

離子的濃度會升高，進而會使離子電流增加，換言之當溫度越高，疊加在液晶轉動電流上得離子電流會增加，所以也有可能會形成圖 3.1.1 中(4)的現象。

不過無論是從彈性係數 K 的觀點，或是溫度對於離子電流的影響，當溫度升高時會造成圖中(4)的曲線往低電壓移動的情況。

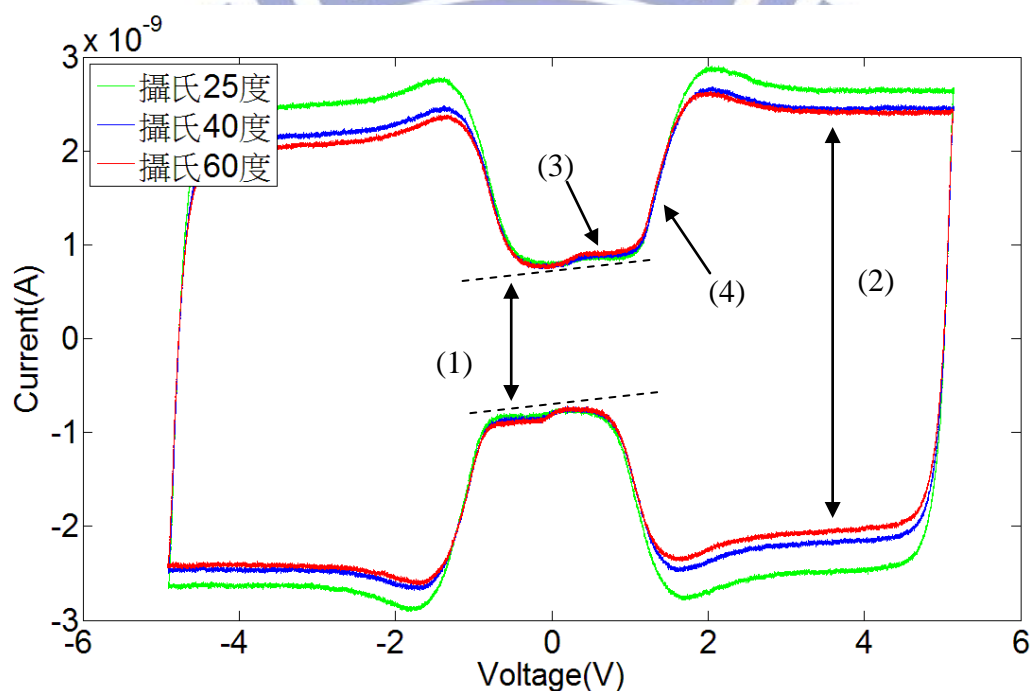


圖 3.1.2 LC-2 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

表 3.1.6 LC-2 不同溫度下的離子電荷密度

溫度	離子電荷密度(pC/cm ²)
25°C	45.29
40°C	74.70
60°C	128.30

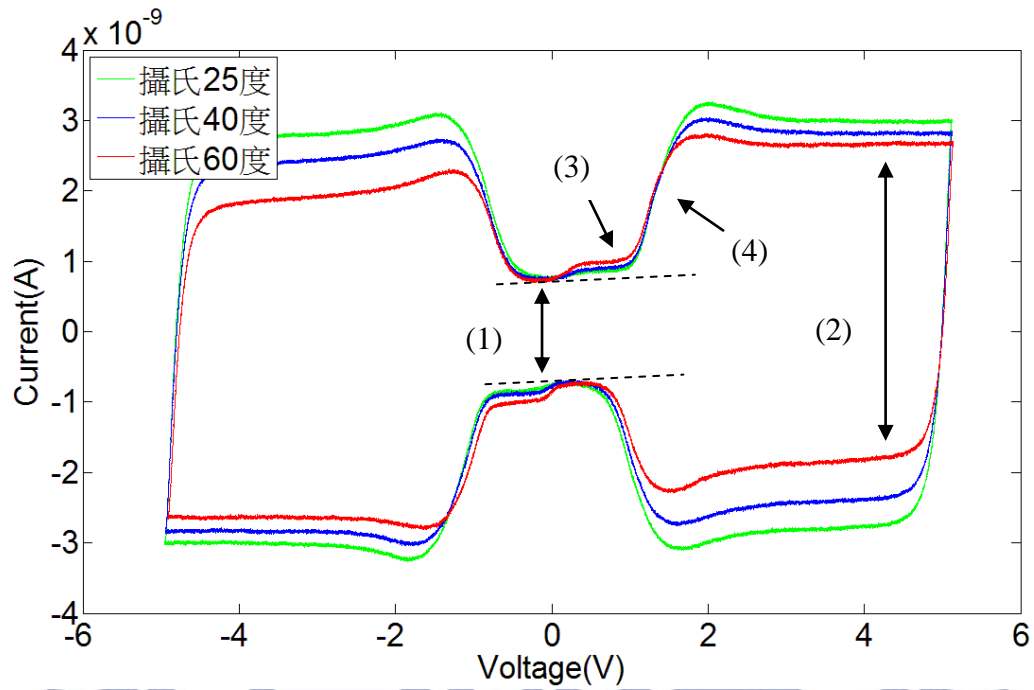


圖 3.1.3 LC-3 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

表 3.1.7 LC-3 不同溫度下的離子電荷密度

溫度	離子電荷密度(pC/cm ²)
25°C	45.52
40°C	118.40
60°C	214.19

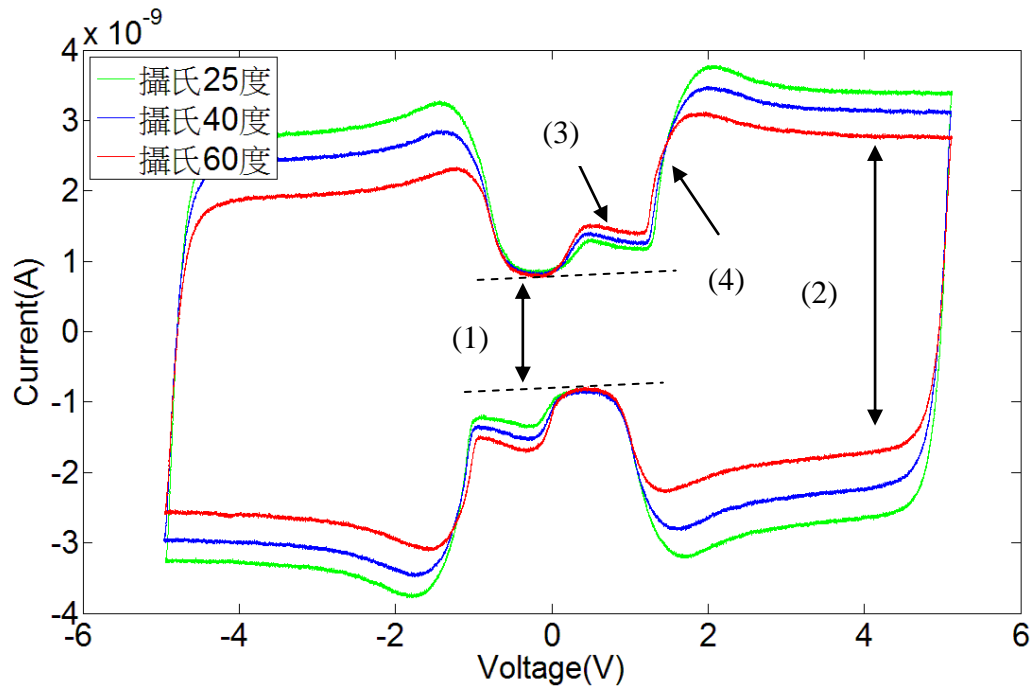


圖 3.1.4 LC-4 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

表 3.1.8 LC-4 不同溫度下的離子電荷密度

溫度	離子電荷密度(pC/cm ²)
25°C	296.93
40°C	434.63
60°C	615.81

在另三片液晶盒：LC-2、LC-3 以及 LC-4 中，也可以觀察到如同 LC-1 中，因為溫度變化產生電流曲線(1)、(2)、(3)以及(4)的現象。而這三片液晶盒中，因為溫度效應的變化之物理解釋都可同理用之前 LC-1 中溫度影響對於電流曲線變化的物理觀點去解釋。

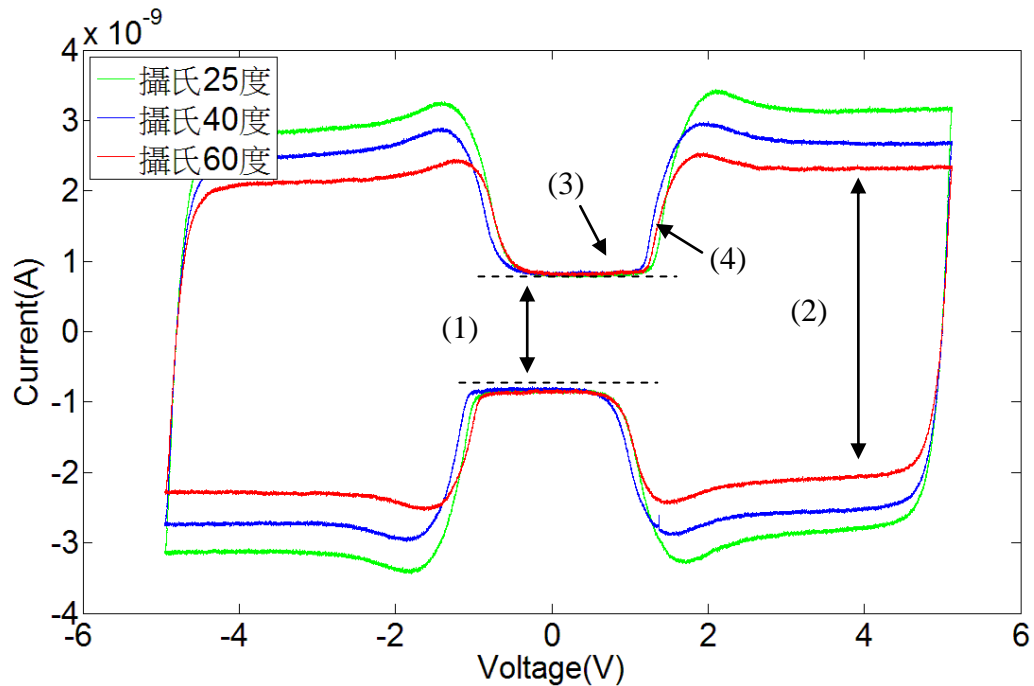


圖 3.1.5 LC-5 在 25°C、40°C 與 60°C 下電壓對電流圖

圖 3.1.5 為 LC-5 液晶盒的電壓對電流圖，從圖形中可以觀察到，(1)、(4) 並不符合之前的預期，因為在 LC-5 液晶盒中，並沒有配相層，而是直接在 ITO 金屬薄膜上做配向，因此會造成裡面的液晶排列為 multi-domains 並非有配向層的 one-domain，所以在垂直電容的部分(1)以及臨界電壓(4)並沒有辦法直接用之前的解釋來做分析，不過在水平電容(2)部分還是可以用這樣的理論來解釋，因為液晶層中的液晶分子都被拉直了，所以總體感受到值為液晶的水平電容，因此還是可以用之前的物理來解釋。

從離子造成的電流段(3)，可以得到 LC-5 中幾乎沒有離子的存在，所以無論是在低或高溫，都沒有離子造成的電流峰值。

3.2 離子電流的擷取流程

為了瞭解液晶盒中離子移動所造成之電流曲線是產生的機制為何，我們必須先把量測到的電壓對電流作圖中的離子部分獨立出來討論，因此需要對量測的數據做離子電流擷取，圖 3.2.1 到圖 3.2.4 為操作的流程與擷取離子電流值的概念：

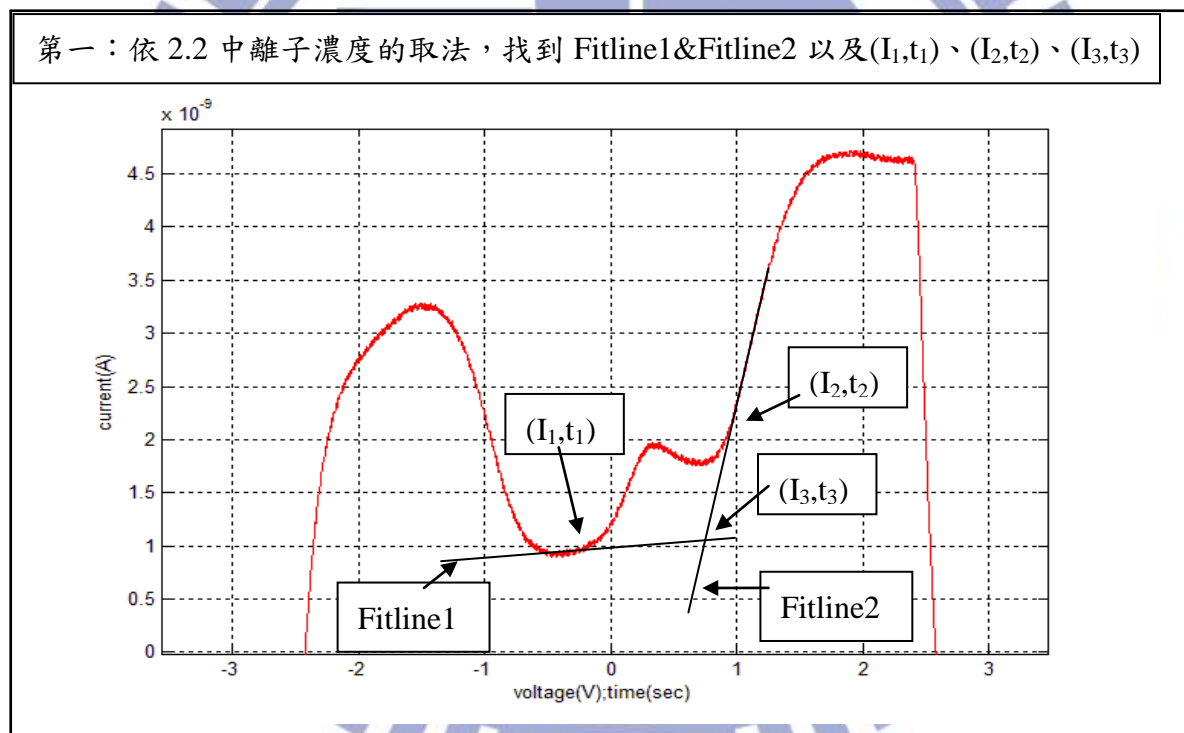


圖 3.2.1 擷取離子電流步驟一示意圖

第二：擷取電流數據中(I_1, t_1)到(I_2, t_2)

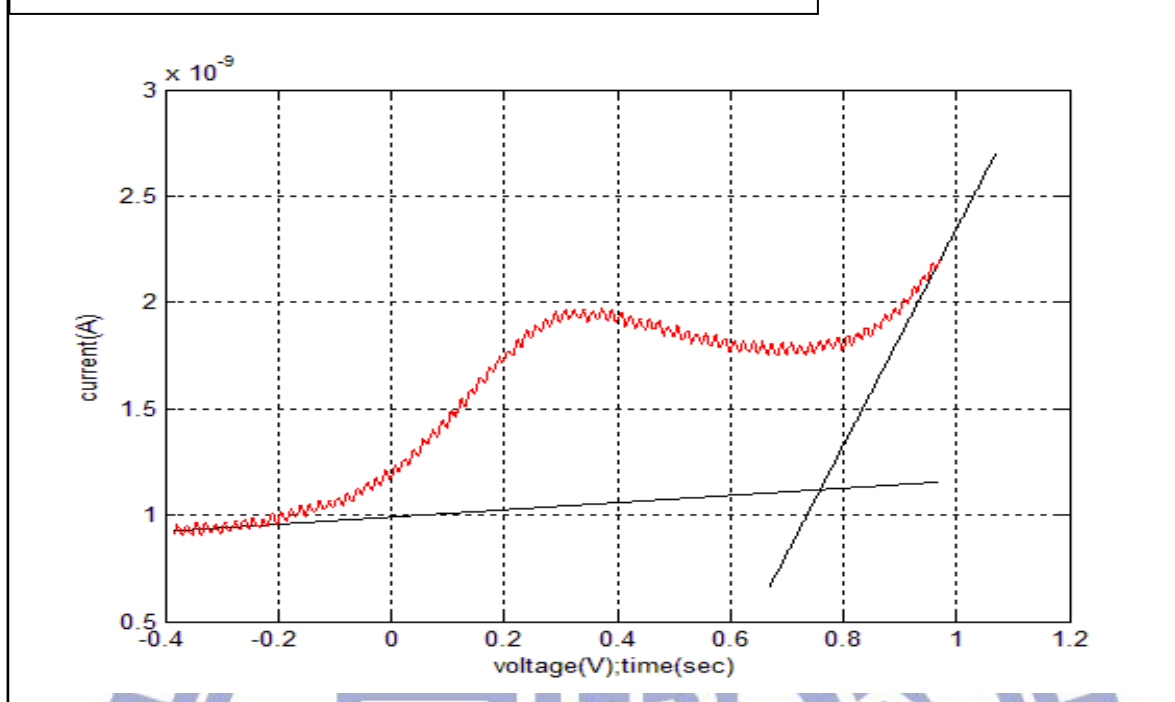


圖 3.2.2 擷取離子電流步驟二示意圖

第三：將離子電流數據減去 Fitline1(扣除液晶垂直電容造成的電流)

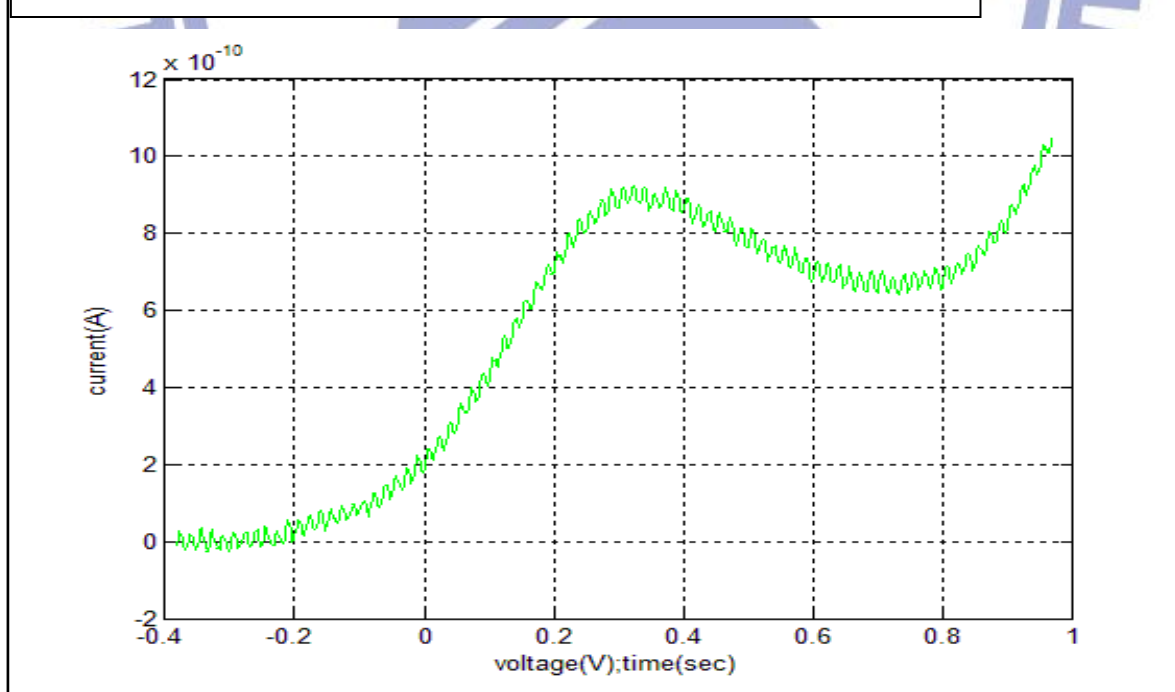


圖 3.2.3 擷取離子電流步驟三示意圖

第四：將離子電流數據取到 t_3

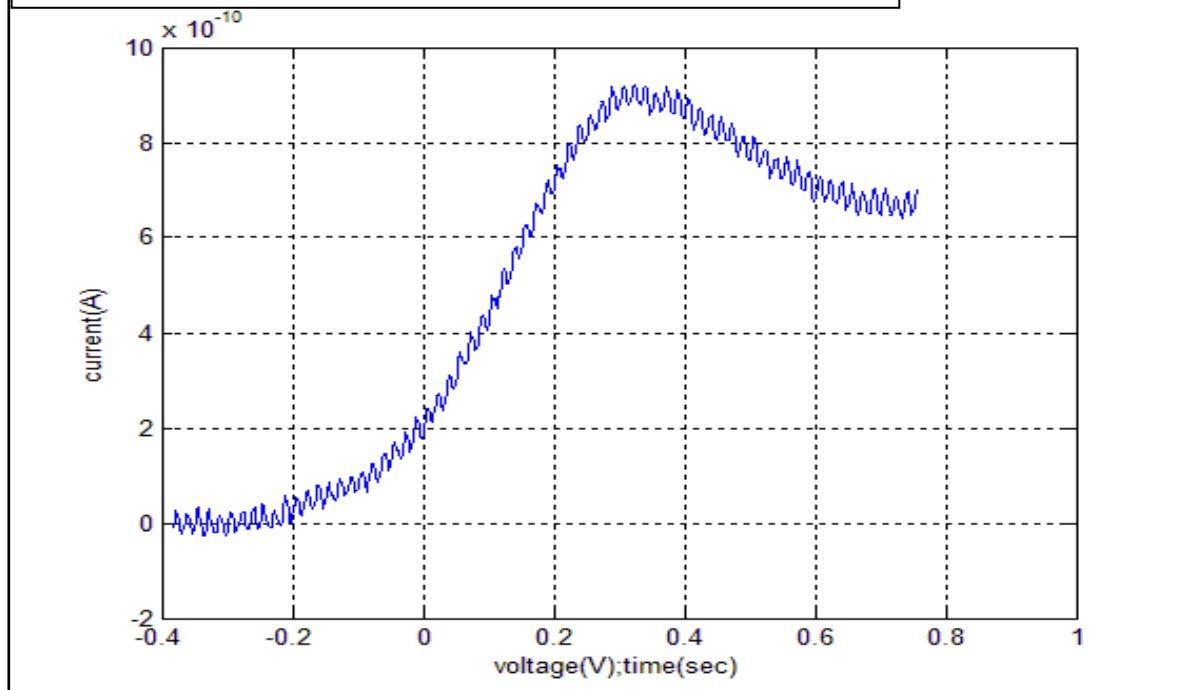


圖 3.2.4 擷取離子電流步驟四示意圖

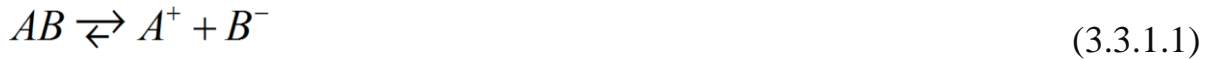
在第四步驟中去除(I_3, t_3)之後的數據，因為(I_3, t_3)是液晶電容形成的背景電流 Fitline1 以及液晶轉動造成的電流 Fitline2 之交點，在這一個交點時間之後的電流數據中，都因為有液晶轉動的電流影響，會造成此段的離子電流都有疊加到液晶轉動之電流數據，而且無法單獨將離子電流取出，因此我們無法觀測純粹的離子電流曲線，所以將其扣除避免影響之後的模擬。

3.3 液晶層中離子高、低解離率的概念

在這一節中，為了解釋液晶中離子的電流現象，引入了參考文獻[10]以及[11]中提到高、低解離率這樣一個中性分子解離速率不同的概念。在這篇參考文獻[10]中，提出了一個對於液晶層中中性分子解離成離子時，有兩種主要的機制：第一是高解離的概念、第二是低解離的概念，接下來將會分別介紹這兩種機制下產生的離子對於量測上得離子電流有何影響。

3.3.1 高解離率離子

在高解離率的觀點中有公式 3.3.1.1 的化學式的關係，在一般情況下中性分子 AB 傾向於解離成 A^+ 和 B^- 的離子型態，所以在這樣的情況下液晶層中的高解離度離子基本上都視為全部皆已解離成 A^+ 和 B^- 的離子型式，因此在推導的方程式公式 3.3.1.2 中，沒有加入 AB 解離成 A^+ 和 B^- 的解離速率，亦沒有加入 A^+ 和 B^- 合成為 AB 的合成率，所以在施加電壓時，只需討論液晶層中的離子多快被消耗完，在此消耗完的意思是 A^+ 和 B^- 離子都被吸附在配向層和液晶層的邊界無法移動，如此一來被吸附在邊界上的離子變無法提供量測上之離子電流。公式 3.3.1.1 表示高解離率的化學式，而公式 3.3.1.2 則表示在高解離率下，提供移動電流的離子變化率方程式，公式 3.3.1.3 為電流密度與帶正電離子的關係式，公式 3.3.1.2 和公式 3.3.1.3 中參數的物理意義如表 3.3.1.1 所示：



$$\frac{dn_H(t)}{dt} = -\frac{\mu_H * E}{d} * n_H(t) \quad (3.3.1.2)$$

$$J_H(t) = q * n_H(t) * \mu_H * E \quad (3.3.1.3)$$

表 3.3.1.1 EQ3.3.1.2 和 EQ3.3.1.3 中參數的物理意義

EQ3.3.1.2,3.3.1.3 中的參數	物理意義
$n_H(t)$	提供移動電流的高解離率離子濃度
μ_H	高解離度離子在液晶層中的遷移率
E	外加電場
d	液晶層的厚度(Cell gap)
$J_H(t)$	高解離率離子造成的電流密度
q	一個電子帶的電量

3.3.2 低解離率離子

不同於 3.3.1 中高解離率的概念，在低解離率離子的情況下，除了考慮離子消耗的速率外，還必須加入中性分子解離成離子的解離速率，以及離子合成為中性分子的合成速率，因此有公式 3.3.2.1 這樣的化學式，公式 3.3.2.2 表示在低解離率情況下，提供電流的移動離子之變化率，以及公式 3.3.2.3 說明低解離率帶正電之離子提供的電流密度大小。表 3.3.2.1 則提供了公式 3.3.2.2 以及公式 3.3.2.3 中各參數的物理意義：



$$\frac{dn_W(t)}{dt} = \beta * N_0 - \alpha * n_W^2(t) - \frac{\mu_W * E}{d} * n_W(t) \quad (3.3.2.2)$$

$$J_W(t) = q * n_W(t) * \mu_W * E \quad (3.3.2.3)$$

表 3.3.2.1 公式 3.3.2.2 和公式 3.3.2.3 中各參數物理意義

公式 3.3.2.2, 公式 3.3.2.3 中的參數	物理意義
$n_w(t)$	提供移動電流的低解離率離子濃度
β	低解離率中性分子之解離速率
α	低解離率離子之合成速率
μ_w	低解離度離子在液晶層中的遷移率
E	外加電場
d	液晶層的厚度(Cell gap)
$J_w(t)$	低解離率離子造成的電流密度
q	一個電子帶的電量

公式 3.3.2.2 中中性分子的解離率 β 與溫度有關，當沒有外加電場時，其值可以寫成公式 3.3.2.4 的型式，

$$\beta = \beta_0 * \exp\left(\frac{-U_0}{k*T}\right) \quad (3.3.2.4)$$

當有外加電場時，正負離子會傾向於被外加電場分開，所以外加電場會增加離子的位能，其增加的量由公式 3.3.2.5 表示：

$$\Delta U(E) = \frac{q^2}{4*\pi*\epsilon*x_0} + q * E * x_0 \quad (3.3.2.5)$$

x_0 表示當離子位能最大時與電性相反的離子之間的距離，其值如公式 3.3.2.6 所示：

$$x_0 = \sqrt{\frac{q}{4*\pi*\epsilon*E}} \quad (3.3.2.6)$$

因此在外加電場的情況下，低解離率之中性離子解離速率 β 有公式 3.3.2.7 的關係：

$$\beta = \beta_0 \exp\left[-\frac{U_0 - \Delta U(E)}{k*T}\right] \quad (3.3.2.7)$$

$$\Delta U(E) = q * \sqrt{\frac{q*E}{\pi*\epsilon}} \quad (3.3.2.8)$$

下表 3.3.2.2 說明公式 3.3.2.4~ 公式 3.3.2.8 方程式中所有參數的物理意義

表 3.3.2.2 公式 3.3.2.4~ 公式 3.3.2.8 方程式中所有參數之物理意義

公式 3.3.2.4, 公式 3.3.2.8 中的參數	物理意義
β	低解離率中性分子之解離速率
U_0	不加電場時，低解離率離子之活化能
k	Boltzmann constant
T	溫度
$\Delta U(E)$	外加電場下，離子位能增加量
x_0	離子位能最大時與電性相反的離子之間的距離
ϵ	介電常數
E	外加電場
q	一個電子帶的電量

3.3.3 高、低解離率離子造成的離子電流

由上面兩小節 3.3.1 以及 3.3.2 中，我們可以得到高、低解離率離子各別產生的電流密度 $J_H(t)$ 和 $J_W(t)$ 對於外加電壓的關係，再由下述公式 3.3.3.1 可以計算出高、低解離率離子對於不同時間下產生的電流大小，也代表不同電壓下電流的變化：

$$I(t) = 2 * J(t) * A \quad (3.3.3.1)$$

公式 3.3.3.1 中的 A 代表量測之液晶盒的面積為 0.9909cm^2 ，而等號右邊乘上兩倍的原因為液晶盒中的離子皆為正、負存在，所以產生的電流為兩倍。

四、三角波量測離子電流數學模型

在參考文獻[10]中所推導的物理模型是以方波量測的條件作為基礎，所以使用的電壓在半週期下可視為一常數，因此如果要探討三角波量測下得離子電流模型，在 3.3 節中所推導的公式勢必要做一個修正。

修正的方式為：將 3.3 中的定電場變成一個隨時間改變的電場模式，由於我們是針對離子電流部分做討論，因此只需討論當電壓為 0V 到+5V 的區段，而此區段的電場可由公式 4.1 表現：

$$E(t) = \frac{dV(t)}{dt} * t * \frac{1}{d} \quad (4.1)$$

表 4.1 公式 4.1 方程式中所有參數之物理意義

公式 4.1 中的參數	物理意義
$V(t)$	外加電壓
t	外加電壓施加的時間
d	液晶層厚度

接下來兩節將從上述的電場隨時間的關係式公式 4.1 出發，分別探討高解離率離子以及低解離率離子在三角波電壓下離子電流的變化關係。並為了簡化模型，在上述的模型推導中，我們將離子的遷移率在不同溫度下視為常數，不過討論分析中會將溫度效應對於遷移率的影響加入考慮，離子合成為中性分子之合成率也視為不隨溫度改變的值。

4.1 三角波波量測下高解離率離子電流之數學模型

首先將公式 3.3.1.2 定電場 E 換成公式 4.1 變電場 E(t) 的型式，可得到公式 4.1.1：

$$\frac{dn_H(t)}{dt} = -\frac{\mu_H * R * t}{d^2} n_H(t) \quad (4.1.1)$$

$$R = \frac{dV(t)}{dt} \quad (4.1.2)$$

解公式 4.1.1 的微分方程式可得公式 4.1.3：

$$n_H(t) = n_{H0} \exp\left(-\frac{\mu_H * R}{d^2} * t^2\right) \quad (4.1.3)$$

再由公式 3.3.3.1、4.1 以及 4.1.3 可以推得高解離度離子所產生的總電流 I_H 對時間的關係式 4.1.4：

$$I_H(t) = 2 * q * n_{H0} * \exp\left(-\frac{\mu_H * R}{d^2} * t^2\right) * \mu_H * R * t * \frac{1}{d} * A \quad (4.1.4)$$

其中 n_{H0} 的物理意義是當沒加電壓時，液晶盒中高解離率離子的離子濃度，R 則表示電壓對時間作圖的斜率大小。

4.2 三角波波形量測下低解離率離子電流之數學模型

在低解離率離子中，和上一節 4.1 一樣將 3.3.2 中所推導的公式其中包含定電場 E 的部分都換成公式 4.1 的時變電場 E(t)，因此可以得到低解離率離子濃度隨時間的變化之微分方程 4.2.1：

$$\frac{dn_W(t)}{dt} = \beta(t) * N_0 - \alpha * n_W^2(t) - \frac{\mu_W * R * t}{d^2} * n_W(t) \quad (4.2.1)$$

$$\beta(t) = \beta_0 * \exp\left(-\frac{U_0 - q * \sqrt{\frac{q * R * t}{\pi * \epsilon * d}}}{k * T}\right) \quad (4.2.2)$$

由於公式 4.2.1 這樣的微分方程式過於複雜，無法直接解此方程式得到低解離率離子濃度隨時間變化的解析解，所以本論文利用 Matlab 中內建指令去做數值運算，並沒有把公式 4.2.1 的解析解求出，只有在不同時間下低解離率離子濃度的數值。再經由公式 4.1 以及 3.3.3.1 可將 4.2.1 代換以將低解離率離子隨外加電壓改變造成的電流算出，如公式 4.2.3：

$$I_W(t) = 2 * q * n_W(t) * \mu_W * E * A \quad (4.2.3)$$

如同高解離率離子電流的推導，此處乘 2 也是代表低解離率的正、負離子移動造成總電流。

最後將 4.1 所推導出高解離率離子的電流加上此節推導出的低解離率離子電流即代表液晶盒中離子所造成的總電流值 $I_{total}(t)$ ：

$$I_{total}(t) = I_H(t) + I_W(t) \quad (4.2.4)$$

五、高、低解離率數學模型與實際量測的離子電流比較討論

在此章節中，將會分成四個部分來分別討論 LC-1、LC-2、LC-3 以及 LC-4 液晶盒中的離子電流物理機制，在順序上將會先討論 LC-1→LC-3→LC-2→LC-4，在此順序的分配是因為 LC-1 與 LC-3 的表現將相似，所以放在一起討論，也有助於之後分析 LC-2。不討論 LC-5 是因為沒有離子電流，因此不獨立出來討論，只會與 LC-4 做比較。

首先，在各部份裡會比較量測之離子電流曲線與本論文中所提出之物理模型，接著將會對於物理模型分析的結果做定性的討論。

為了之後分析方便，在此先推導一個公式，以便後續章節使用，此公式在說明：當外加電壓為零且液晶盒中為平衡狀態時，低解離率離子已在液晶層中解離出多少離子濃度。首先利用公式 4.2.1 以及 4.2.2 中，當處於平衡狀態的情況下，低解離率的離子濃度將不隨時間變化，所以 $dn_w(t)/dt=0$ 。而且電壓為零時，也代表時間(t)為零，所以這兩式會變成下面的公式 5.1：

$$0 = \frac{dn_w(t)}{dt} = \beta_0 N_0 * \exp\left(-\frac{U_0}{kT}\right) - \alpha * n_w^2 \quad (5.1)$$

解公式 5.1 可以得到低解離率之離子在不加電壓以及平衡狀態下的離子濃度 n_w ：

$$n_w = \sqrt{\frac{\beta_0 N_0}{\alpha}} * \sqrt{\exp\frac{-U_0}{kT}} \quad (5.2)$$

5.1 LC-1 液晶盒之討論分析

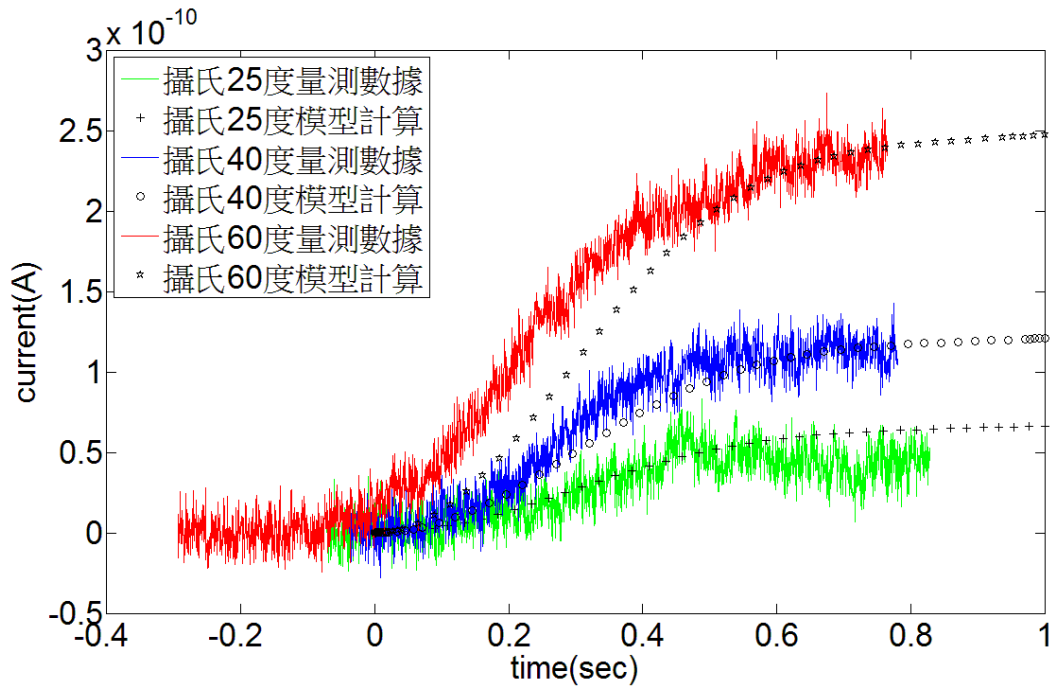


圖 5.1.1 LC-1 三種溫度下實驗與模型之電流曲線比較圖

表 5.1.1 LC-1 模擬參數表

dV/dt	1
d	3.7 μm
ϵ	3.7
μ_H	-----
μ_w	$1.5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$
n_{H0}	$0 / \text{m}^3$
$\beta_0 N_0$	$1.38 \cdot 10^{23} / (\text{s} \cdot \text{m}^3)$
α	$7 \cdot 10^{-20} \text{ m}^3 / \text{s}$
U_0	0.34 eV

由圖 5.1.1 可以發現，模擬得到的離子電流圖形與實際量測有些誤差，尤其在越高溫時情況更是如此，從物理的觀點來看，當溫度升高時，離子遷移率將會增加，所以在模擬中的離子遷移率將不能用相同的數值來做計

算，勢必要隨溫度升高而增加。在上述的前提下，我們將 40°C 和 60°C 所帶的遷移率做改變。表 5.1.2 為不同溫度時所使用的遷移率參數。圖 5.1.2 為加入遷移率與溫度的關係，模擬計算與實際量測圖。

表 5.1.2 LC-1 不同溫度之遷移率對照表

溫度	25°C	40°C	60°C
遷移率	$1.5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/(\text{V*s})$	$2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/(\text{V*s})$	$2.8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/(\text{V*s})$

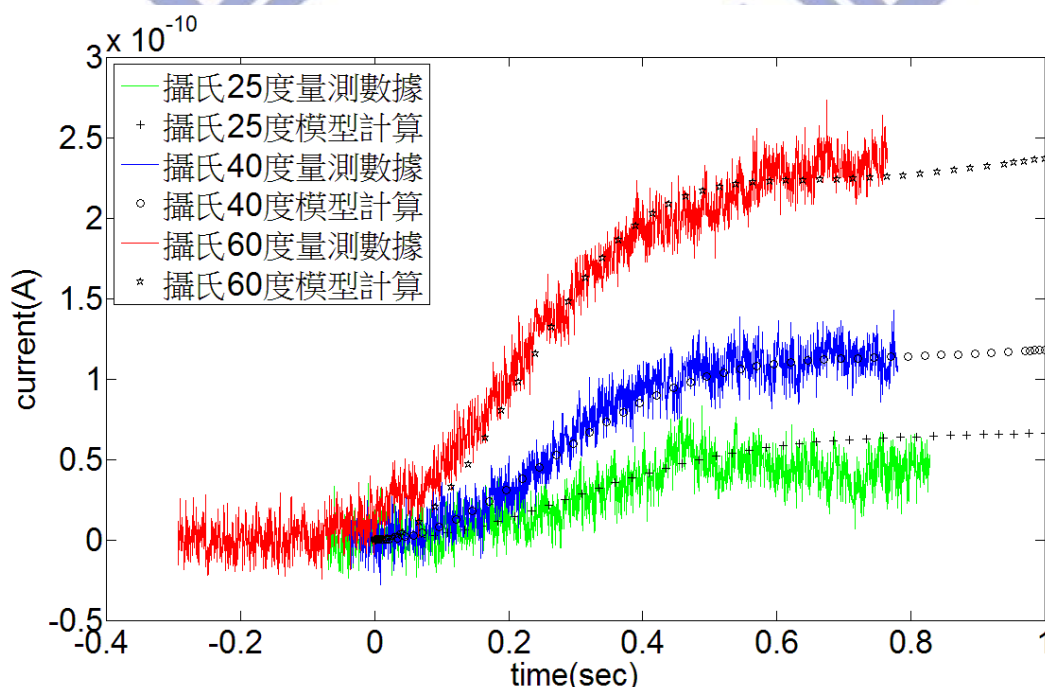


圖 5.1.2 LC-1 遷移率之溫度效應模擬與量測比較圖

從圖 5.1.2 來觀察，先定義離子電流表現的區段，前半段離子電流急速爬升區稱為線性區，後半段斜率較緩和段稱為飽和區。當溫度升高離子遷移率增加時，線性區會往低電壓做移動。為了檢測模擬所使用的離子遷移率數值是否符合物理觀點，由遷移率經驗公式 5.3 可知：當溫度增加時，離

子的遷移率會變大，本論文引入離子遷移率隨溫度關係的經驗公式：

$$\mu = \mu_0 * \exp\left(\frac{-E_{\text{mobility}}}{kT}\right) \quad (5.3)$$

其中 E_{mobility} 代表離子開始遷移時所需要的活化能， k 為 Boltzmann constant， T 為溫度單位為 K。

利用模擬中所使用的已知值 μ 與溫度 T 對應的關係，可以計算出 E_{mobility} ，計算方法如下：

$$\frac{\mu_{T1}}{\mu_{T2}} = \frac{\exp\left(\frac{-E_{\text{mobility}}}{kT_1}\right)}{\exp\left(\frac{-E_{\text{mobility}}}{kT_2}\right)} \quad (5.5)$$

$$E_{\text{mobility}} = \frac{\ln\left(\frac{\mu_{T1}}{\mu_{T2}}\right) * kT_1T_2}{(T_1 - T_2)} \quad (5.6)$$

經由上述計算方式可以得到 E_{mobility} ，基本上只需利用兩組數據即可得到 E_{mobility} ，然而為了比較模擬中所使用的遷移率數據是否符合這樣的經驗公式，因為有三組數據，所以可以兩兩計算出三組 E_{mobility} ，再由三組數據來做比較，如果比較三組 E_{mobility} 的結果相近，代表我們所使用的不同溫度的遷移率數值是符合物理觀點的。下表 5.1.3 為不同溫度互相計算求出的 E_{mobility} 。

表 5.1.3 不同溫度互相計算的 E_{mobility}

溫度	60°C versus 25°C	60°C versus 40°C	40°C versus 25°C
E_{mobility}	0.1523 (eV)	0.1523 (eV)	0.1524 (eV)

從上表的比較，可以驗證模擬計算中所使用的遷移率是符合物理觀點的數值。

接著將討論 LC-1 中高、低離子的表現情況，由圖 5.1.3、圖 5.1.4 以及圖 5.1.5 分別為 LC-1 在 25°C、40°C、60°C 下的模擬電流曲線與實驗曲線之比較，圖中圓形點代表高、低解離率之離子所形成之合成總電流，其於兩條則分別為高、低解離率離子產生之電流，如圖中說明。

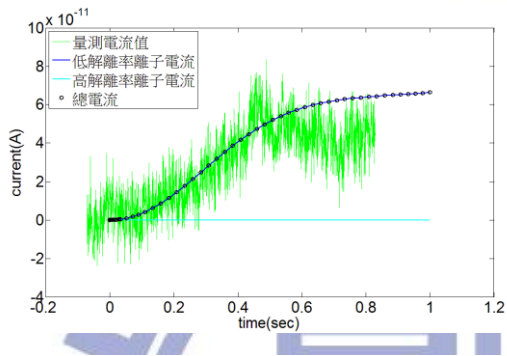


圖 5.1.3 25°C LC-1 量測與模型分析

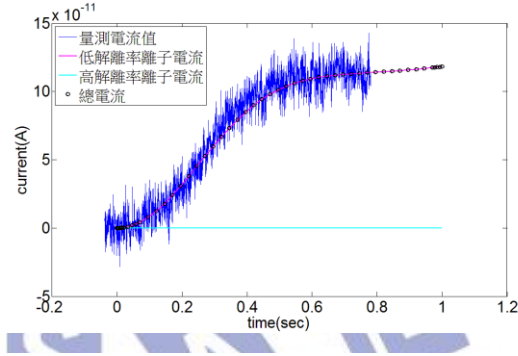


圖 5.1.4 40°C LC-1 量測與模型分析

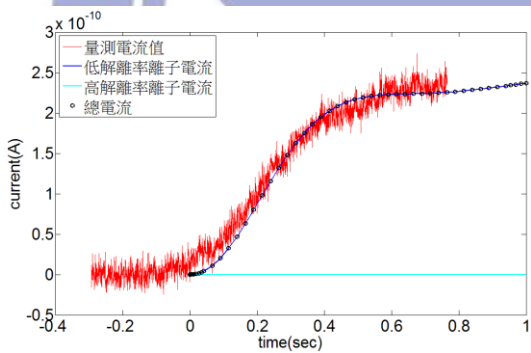


圖 5.1.5 60°C LC-1 量測與模型分析

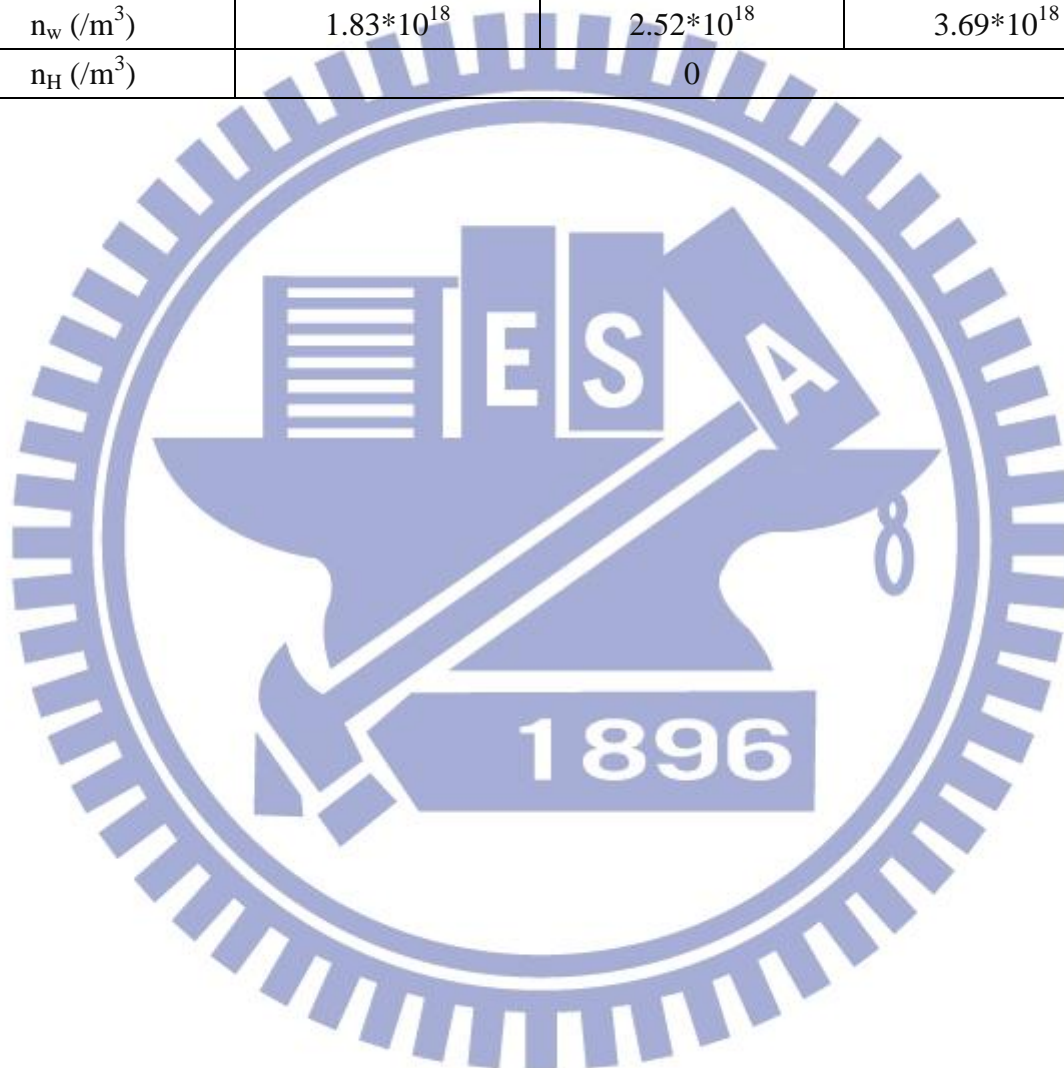
由上面不同溫度下的電流曲線圖中，可以從實驗數據以及模擬電流曲線，得知在 LC-1 液晶盒中，造成量測之離子電流表現主要是由低解離率之離子電流為主要的影響因子，高解離率的離子電流表現行為在此液晶盒中幾乎可以忽略不計。

在平衡不加電壓狀態下的低解離率離子濃度可藉由公式 5.2 計算出，如

表 5.1.4 所示，由下表亦可驗證 LC-1 中的在不同溫度下皆以低解離率離子為主導因子。

表 5.1.4 LC-1 在 25°C、40°C、60°C 下，不加電壓之平衡濃度

LC-1	25°C	40°C	60°C
n_w (/m ³)	1.83×10^{18}	2.52×10^{18}	3.69×10^{18}
n_H (/m ³)	0		



5.2 LC-3 液晶盒之討論分析

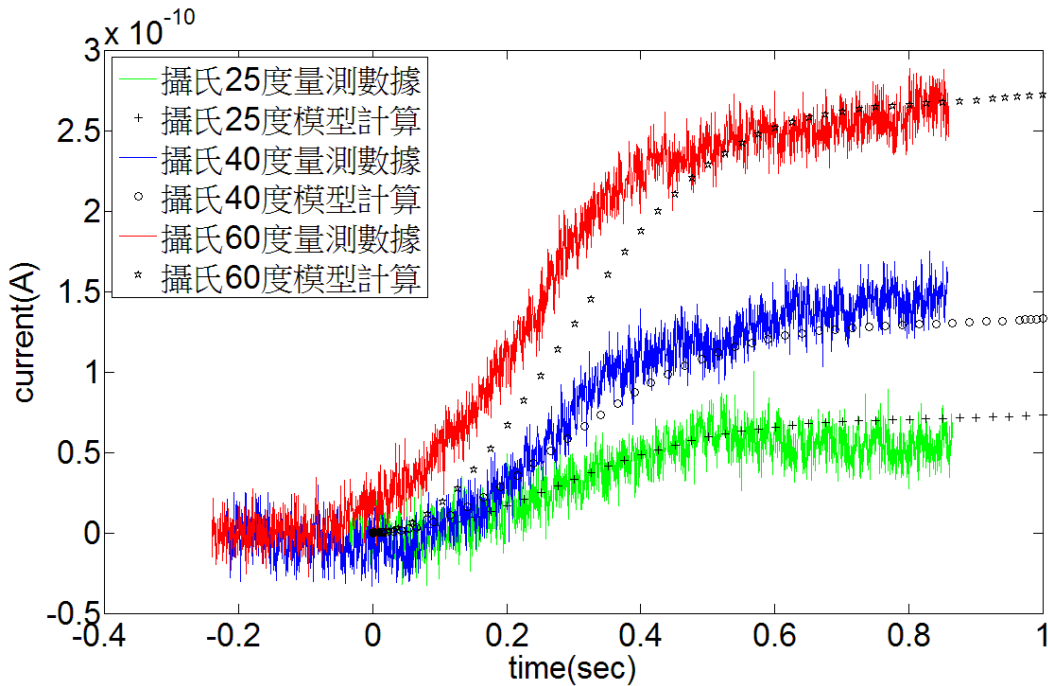


圖 5.2.1 LC-3 三種溫度下實驗與模型之電流曲線比較圖

表 5.2.1 LC-3 模擬參數表

dV/dt	1
d	3.7 μm
ϵ	3.7
μ_H	-----
μ_w	$1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$
n_{H0}	$0/\text{m}^3$
$\beta_0 N_0$	$1.65 \times 10^{23} /(\text{s} \cdot \text{m}^3)$
α	$8 \times 10^{-20} \text{ m}^3/\text{s}$
U_0	0.34 eV

與 5.1 節討論相同，必須要加入遷移率的溫度效應，圖 5.2.2 為加入遷移率之溫度效應後的模擬計算與實驗數據比較，表 5.2.2 為不同溫度下模擬所使用的離子遷移率，表 5.2.3 為不同溫度互相計算求出的 E_{mobility} 。

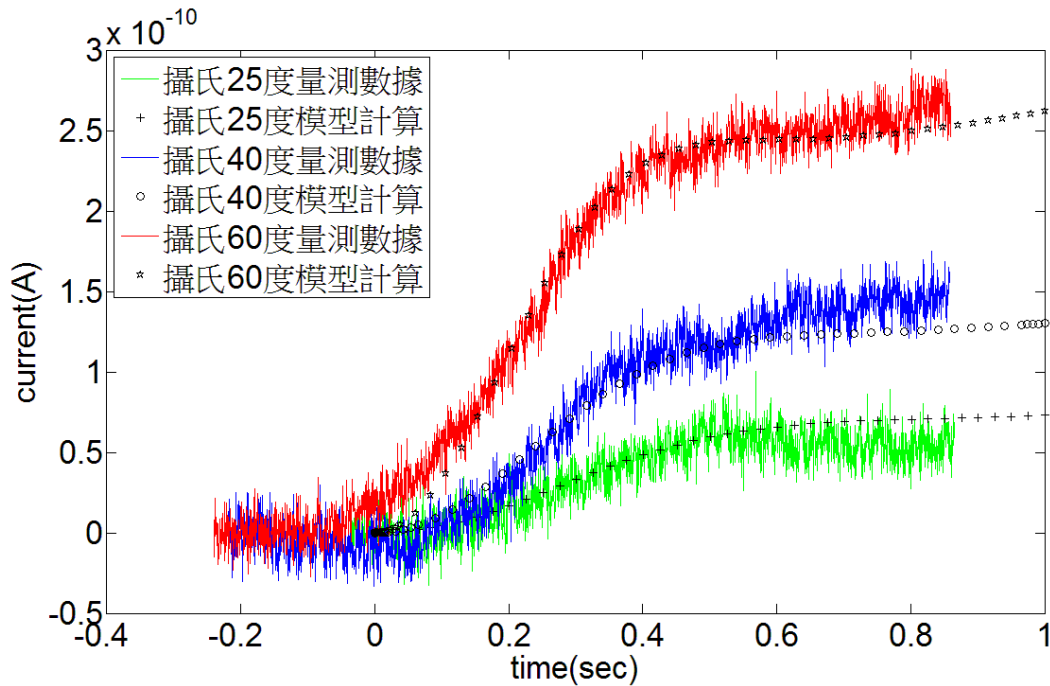


圖 5.2.2 LC-3 遷移率之溫度效應模擬與量測比較圖

表 5.2.2 LC-3 不同溫度之遷移率對照表

溫度	25°C	40°C	60°C
遷移率	$1.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	$2.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	$3.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$

表 5.2.3 LC-3 不同溫度互相計算的 E_{mobility}

溫度	60°C versus 25°C	60°C versus 40°C	40°C versus 25°C
E_{mobility}	0.1619 (eV)	0.1634 (eV)	0.1601 (eV)

藉由上面的比較圖與比較表，也可以驗證溫度升高時遷移率變大，而且物理模型也與數據相當符合，至於 LC-3 的 E_{mobility} 也可以從比較表 5.1.3 發現計算的數值也相當相近，所以模擬在不同溫度計算時所用的離子遷移率也符合物理公式的觀點。

接下來我們將做 LC-3 中高、低解離率離子的解析，圖 5.2.3、5.2.4 以及圖 5.2.5 分別在不同溫度下的物理模型的計算電流與實驗離子電流比較圖。

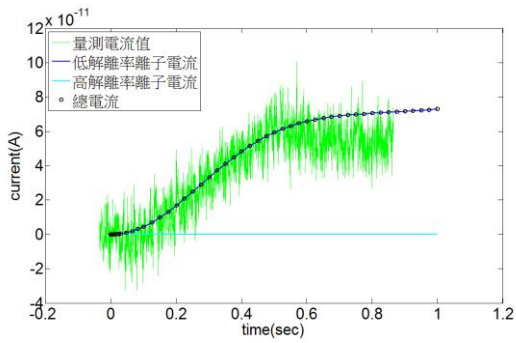


圖 5.2.3 25°C LC-3 量測與模型分析

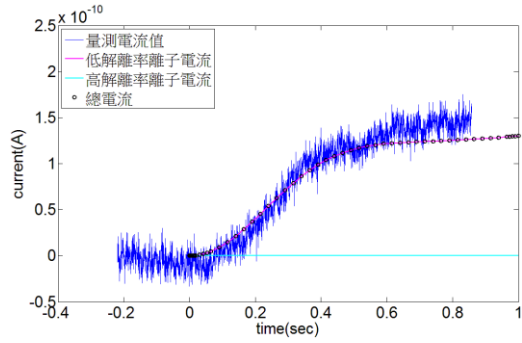


圖 5.2.4 40°C LC-3 量測與模型分析

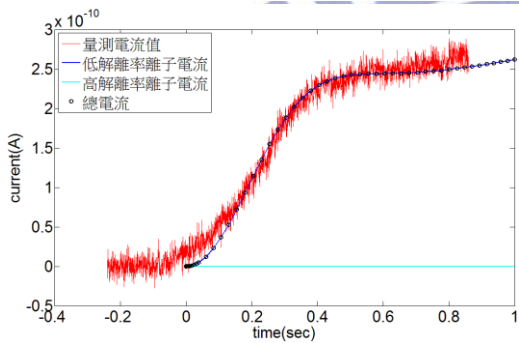


圖 5.2.5 60°C LC-3 量測與模型分析

從上面三張圖和下表 5.2.4 之濃度比較表，也可以得到與 LC-1 相似的分析結果，這兩個液晶盒中都以低解離率離子為主導因子，所以量測的電流表現都為低解離率離子產生的電流形態。

表 5.2.4 LC-3 在 25°C、40°C、60°C 下，不加電壓之平衡濃度

LC-3	25°C	40°C	60°C
n_w (/m ³)	$1.88 * 10^{18}$	$2.58 * 10^{18}$	$3.77 * 10^{18}$
n_H (/m ³)	0		

5.3 LC-2 液晶盒之討論分析

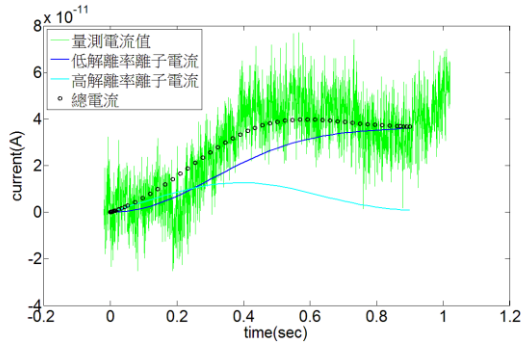


圖 5.3.1 LC-2 25°C 實驗與模型比較

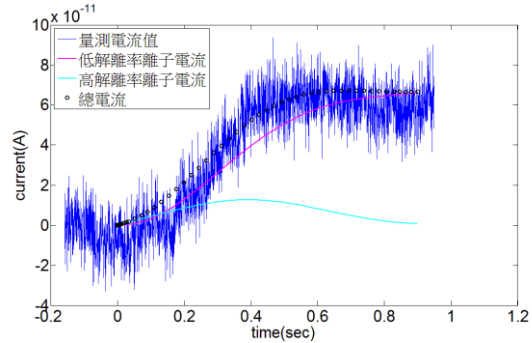


圖 5.3.2 40°C LC-2 實驗與模型比較

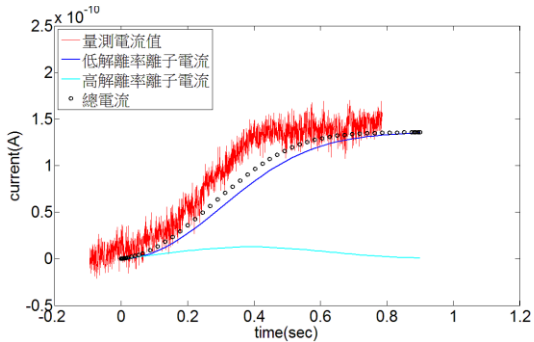


圖 5.3.3 60°C LC-2 實驗與模型比較

表 5.3.1 LC-2 模型模擬參數

dV/dt	1
d	3.7 μm
ε	3.7
μ _H	1.4 * 10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)
μ _w	1.5 * 10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)
n _{H0}	3.5 * 10 ¹⁶ /m ³
β ₀ N ₀	7.5 * 10 ²² /(s*m ³)
α	8 * 10 ⁻²⁰ m ³ /s
U ₀	0.34 eV

從上面得比較圖可以發現在 25°C 和 40°C 時，總電流必須往高電壓移動，而在 60°C 時則必須要往低電壓移動，然而實際觀察圖形，會發現需要移動的離子電流部分應該只高解離率離子電流部分，低解離率離子電流則不需移動，因為都在量測的電流值以下。不過因為本論文中物理模型所用的數學程式尚未完成，沒辦法單獨計算高解離率離子電流需要平移多少電壓值，所以沒辦法精細得去討論高解率離子的電流表現。然而為何要將高解離度

離子電流做移動呢？因為以高解離度離子的物理模型中，我們假設此種高解離率分子在常溫下都已經完全解離了成離子型態了，所以在非第一周期的量測下，液晶中的高解離率離子都會移動到配向層與液晶層界面上，此時必須引入離子捕捉(ion trapping)[12]的概念。

當離子移動到界面時，因為配相層構造的關係，會將這些離子捕捉住，此時離子被捕捉在界面時，需要用較大的電壓將其拉開遠離界面，換言之就是需要施加大於捕捉能障的電壓才能使被捕捉得離子開始移動至另一端的配向層，因為這樣的關係，所以高解離率離子電流沒有馬上從電壓為零之後產生，而是需要從較大的電壓才開始移動。

然而 60°C 需要往低電壓移動的概念則和 5.1、5.2 的概念一樣，溫度越高時離子遷移率則越快，此時我們將高溫的低解離率離子遷移率做改變，改成 2.7×10^{-10} ，再對 60°C 的 LC-2 液晶盒離子電流做比較得到下圖 5.3.4。

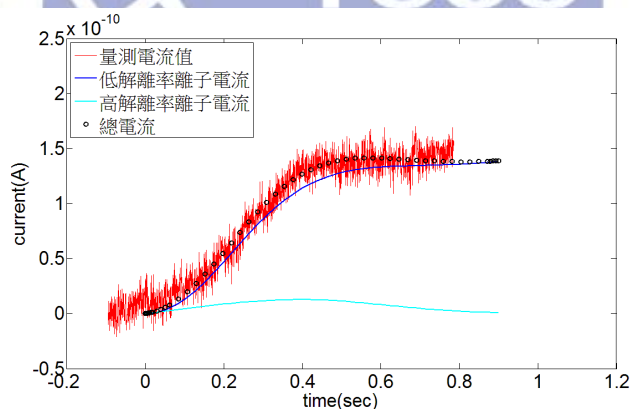


圖 5.3.4 60°C LC-2 遷移率溫度效應實驗與模型比較

而在 LC-2 高溫下的模擬計算中，不需要考慮高解離率離子得捕捉效應，

因為高溫下離子動能較高，離子可以越過界面的離子捕捉能障，所以不需考慮離子捕捉的效應。

接著從上面的比較圖以及下表 5.3.2 之濃度比較，都可以發現隨著溫度升高，高解離率離子對總體電流表現的影響降低，也可以得知 LC-2 液晶盒中是得離子型態是以低解離率離子為主。

表 5.3.2 LC-2 在 25°C、40°C、60°C 下，不加電壓之平衡濃度

LC-2	25°C	40°C	60°C
n_w (/m ³)	4.28×10^{18}	5.88×10^{18}	8.59×10^{18}
n_H (/m ³)		3.5×10^{16}	

5.4 LC-4 液晶盒之討論分析

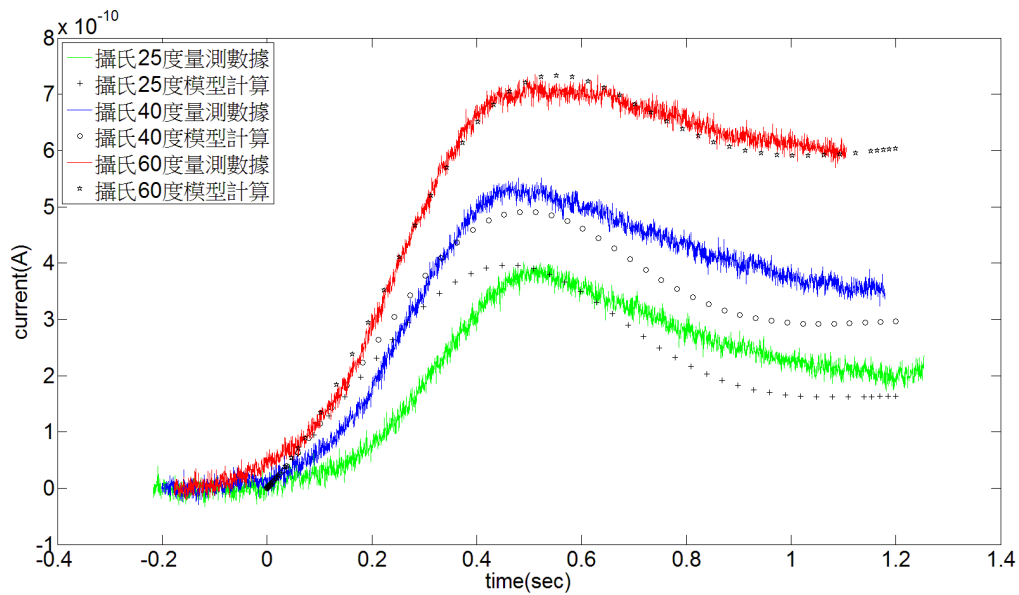


圖 5.4.1 LC-4 三種溫度下實驗與模型之電流曲線比較圖

從圖 5.4.1 可以發現 LC-4 所產生得離子電流曲線與前面三組液晶盒的表現相當不同，接下來將會對這樣的電流曲線圖做定性上的分析討論。

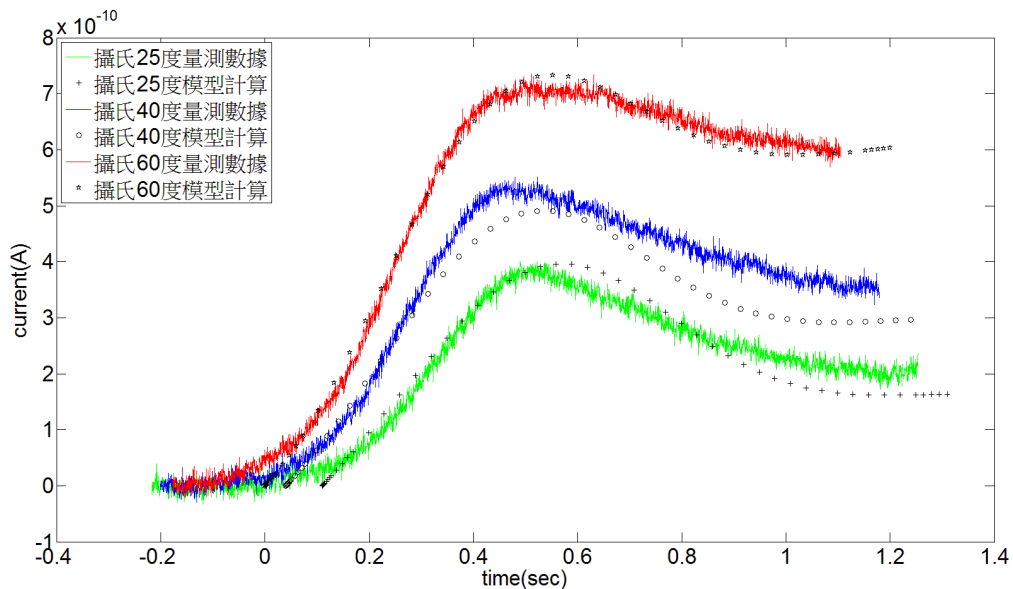


圖 5.4.2 LC-4 三種溫度下實驗數據平移與模型之電流曲線比較圖

表 5.4.1 LC-4 電流曲線之平移電壓值

LC-2	平移電壓值(V)
25°C	0.11
40°C	0.04
60°C	0

這裡需要平移電壓的理由與 LC-2 相同，且由以下的圖形更能看出來，其中圖 5.4.3、圖 5.4.4 分別為 25°C 下，量測與模型計算下的電流曲線，而不同的是圖 5.4.3 為模型計算平移電壓前的電流曲線圖，而圖 5.4.4 則為平移後；圖 5.4.5、圖 5.4.6 則分別為 40°C 下，量測與模型計算下的電流曲線，與 25°C 圖相同圖 5.4.5 為模型計算平移電壓前的電流曲線圖，而圖 5.4.6 則為平移後；圖 5.4.7 為 60°C 下，量測與模型計算下的電流曲線。表 5.4.2 為模型計算所使用之參數。

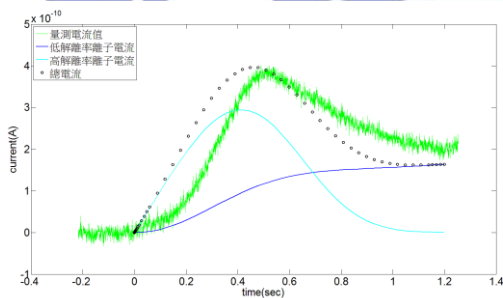


圖 5.4.3 25°C LC-4 數據(平移前)

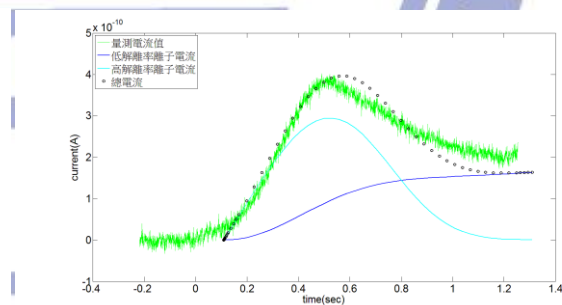


圖 5.4.4 25°C LC-4 數據(平移後)

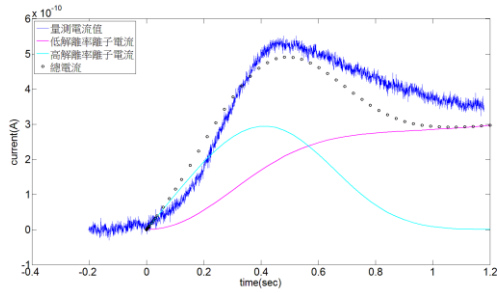


圖 5.4.5 40°C LC-4 數據(平移前)

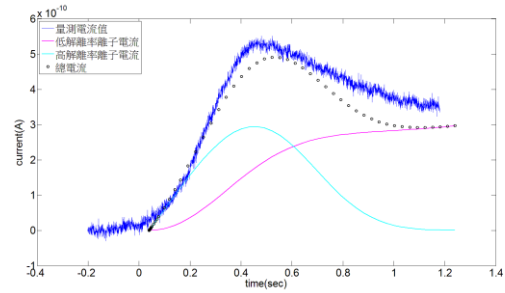


圖 5.4.6 40°C LC-4 數據(平移後)

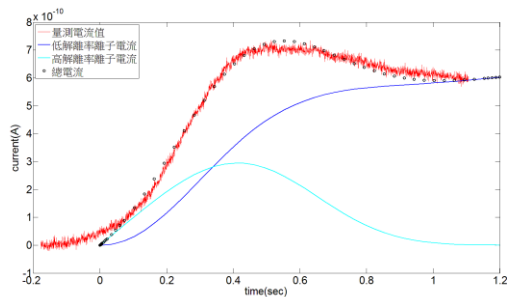


圖 5.4.7 60°C LC-4 數據

表 5.4.2 LC-4 模型模擬參數

dV/dt	1
d	3.7 μm
ε	3.6
μ _H	1.3*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)
μ _W	1.4*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)
n _{H0}	1.4*10 ¹⁸ /m ³
β ₀ N ₀	3.20*10 ²³ /(s*m ³)
α	5*10 ⁻²⁰ m ³ /s
U ₀	0.34 eV

從上面圖 5.4.3 到圖 5.4.8 可一發現，在低溫時，真正需要平移的電流項是高解離率離子的電流，當溫度越高時，會發現高解離率離子電流需要平移的量越少，到了 60°C 幾乎不用做平移就可以達到很好的吻合效果。就如同 LC-2 中討論的一樣，因為數學程式尚未完成，所以無法單獨觀察高解離率離子電流的平移量。

藉由上面的模型分析可以發現，在液晶盒 LC-4 裡，高、低解離率得離

子都存在，在電流表現上溫度較低時，高解離率離子產生之電流也佔有相當大的比例，不過隨著溫度升高，低解離率得離子電流增加，高解離率之離子所產生的電流對於總電流影響也開始下降。由表 5.4.3 也可以觀察出，高、低解離率之離子濃度也較相近，所以高解離率離子在 LC-4 中無法忽略其存在。

也因為 LC-4 的高解離率離子相較於前三片液晶盒佔總體的比例較高，然而因為物理模型計算的低解離率離子電流，不管是在 25°C、40°C 或是 60°C 都小於整體電流值，因此無法單獨觀察低解離率離子電流的表現型態，因此在這一節中不另外討論低解離率離子遷移率對於溫度的變化關係。

表 5.4.3 LC-4 在 25°C、40°C、60°C 下，不加電壓之平衡濃度

LC-4	25°C	40°C	60°C
$n_w (/m^3)$	$3.3*10^{18}$	$4.54*10^{19}$	$6.64*10^{19}$
$n_H (/m^3)$	$8.95*10^{17}$		

另外從 LC-5 之數據來與 LC-4 做比較可以發現，照了 UV 光後，液晶中的離子電荷量會增加，而且同時有高和低解離率的離子產生，不過照 UV 產生離子的機制並不在本論文討論範圍中，因此不予以討論。

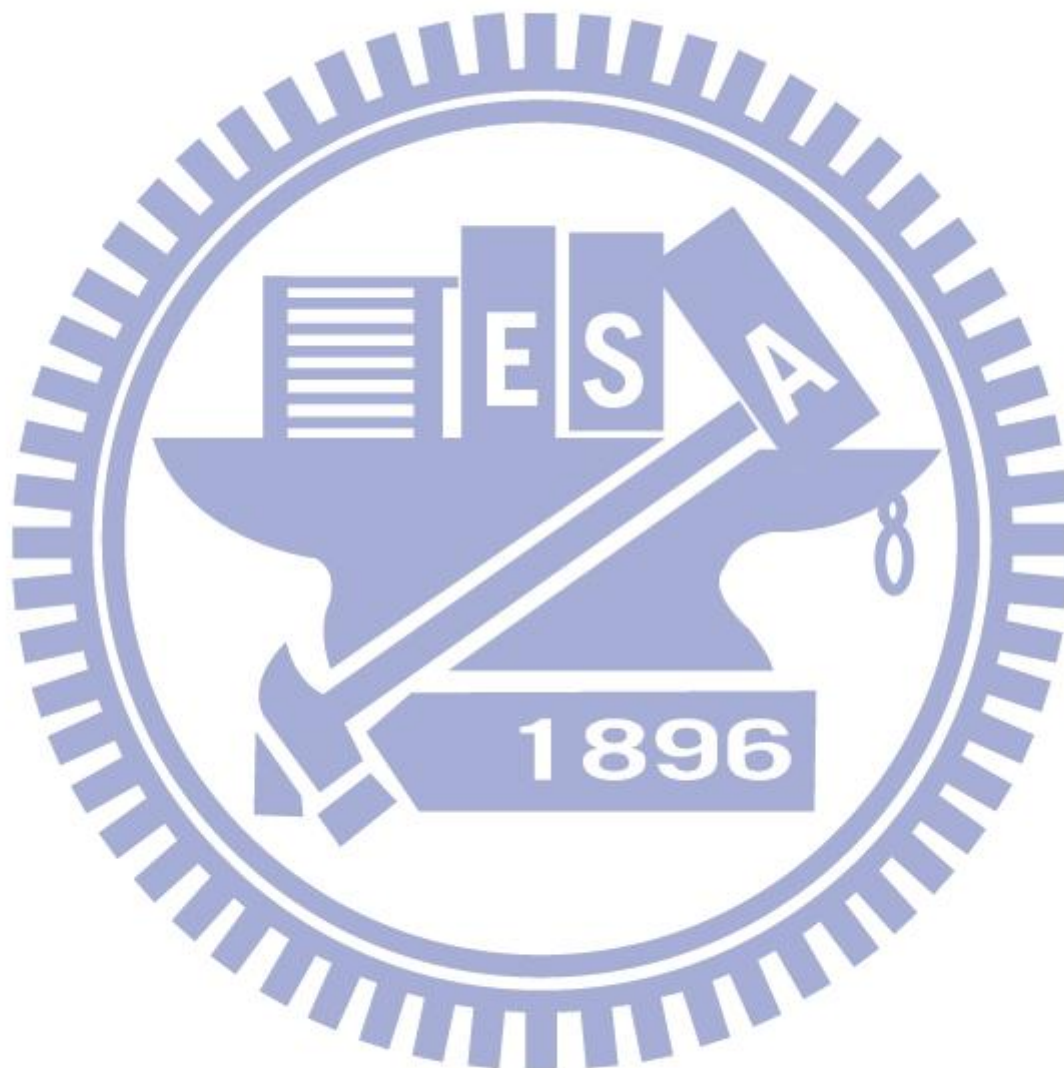
六、結論與未來展望

本論文的創新之處有二，第一是設計和建構一種低價而靈敏的線路其功能可以和市售高價的 Toyo 儀器相比。其次在於首次使用的離子電流模型，可以模擬出在三角波形量測下，高、低解離率的離子在不同電壓下，分別會有如何的電流表現，在往後量測分析時，可以藉由量測到的電流圖形，來推算量測的樣品中高、低解離率所產生的離子各自濃度和各自所佔有的比例。這些結果對於液晶材料的選擇和純化，會有很大幫助。對於液晶顯示器影像殘留問題，已知是由液晶中的雜質離子所造成，但是造成影項殘留的離子種類尚未釐清，透過本論文對液晶內雜質離子種類的分析，再進一步研究之後，或許可以幫助判斷液晶顯示器中影像殘留的原因，是由高解離率或低解離率離子所主導此現象的發生。

從本論文所量測的電流溫度效應，我們可以推算出低解離率液晶離子的活化能和垂直於液晶分子的遷移率的活化能。這兩種活化能對於未來進一步了解液晶材料中低解離率雜質的材料特性會有很大的幫助。

為了簡化計算本論物理模型的數學推導，將許多物理參數做了簡化的假設，未來如果要真正的觀察分析三角波形下的電流變化，第一當數據需要做平移時，需要將高、低解離率做各別平移，如此一來可以更貼近實際的物理情況，而且可以從高解離率離子電流平移的電壓值，計算出離子需要多大的靜電力，才可以脫離界面的離子捕捉效應。第二需要引入其他物

理機制的模型，例如在高離子濃度下，電場隨液晶盒厚度分佈的函數關係式，因為在本論文中假設每個離子都感受到相同的電場大小，因此如果有上述這樣的分佈函數可以各別分析不同位置的離子感受到真正的電場大小。有了上述的物理模型精進，在分析時才能有更貼近實際物理現象的模型。



参考文献

1. K.H. Yang, "Charge retention of twisted nematic liquid-crystal displays", J. Appl.Phys., Vol.67, No.1, pp. 36-39, January 1990
2. G. Stojmenovik, "Ion Transport and Boundary Image Retention in Nematic Liquid Crystal Displays", Universiteit Gent, PhD, 2004
3. T.C. Chieu, K.H. Yang, "Transport Properties of Ions in Ferroelectric Liquid Crystal Cells", J. J. Appl. Phys., Vol.28, No.11, pp. 2240-2246, November 1989
4. A. Sugimura, N. Matsui, Y. Takahashi, H. Sonomura, H. Naito, M. Okuda, "Transient currents in nematic liquid crystals", J. Phys. Review B, Vol.43, No.10, pp. 8272-8776, April 1991
5. K. Ono, J. Nakanowatari, "A Method for the Determination of the Internal Electric Field of Ion-doped Ferroelectric Liquid Crystals", J. J. Appl. Phys., Vol.30, No.11A, pp.2832-2838, August 1991
6. H. Naito, K. Yoshida, M. Okuda, A. Sugimura, "Transient charging current in nematic liquid crystals", J. Appl. Phys. Vol.73, No.3, pp. 1119-1125, February 1993
7. C. Colpaert, B. Maximus, A. De Meyere, "Adequate measuring techniques for ions in liquid crystal layers", J. Liquid Crystals, Vol.21, No.1, pp. 133-142, February 1996
8. M. Inoue, K. Takatoh, S. Kobayashi, "Recent Measurement of Liquid Crystal Material Characteristics", IDW06, pp. 647-650, 2006
9. M. Inoue, "A Novel Measurement Method of Ion Density in TFT-LCD

Panels”, IDW’08, pp. 47-50, 2008

10.M. Inoue, K. Sasaki, T. Kurihara, Y. Kume, “Physical Measuring Method for TFT Liquid Crystal Panel and Physical Property Measuring Apparatus for TFT Liquid Crystal Panel”, U.S. Patent Application Publication, US20090267614A1, October 2009

11.K.H. Yang, “The investigation of image formation in a large-area solid state x-ray receptor with electrophoretic display”, J. Appl. Phys., Vol.54, No.9, September 1983

12.陳伯綸, “Ion-Charge Effects on the Physical Properties of Liquid Crystal Cells”, 國立交通大學, 博士, 民國 89 年 6 月

13.B. Razavi, “類比 CMOS 積體電路設計”, 李泰成, 2 版, 美商麥格羅·希爾國際股份有限公司 台灣分公司, 台北, 2005 年

14.王炳聰, 蔡榮鋒, 李振興, 黃清池, “電子學實習(下)-運算放大器電路”, 2 版, 高立圖書有限公司, 台北, 民國 95-96 年

15.洪維恩, Matlab 7 程式設計, 旗標出版限公司, 台北, 2009 年 10 月

16.王良御, 廖松生, 液晶化學, 科學出版社, 中國, 1988 年

17.田民波, TFT 液晶顯示原理與技術, 五南出版社, 台灣, 2008 年

附錄一

液晶盒相關參數列表

本論文使用的液晶形態：Twist Nematic Liquid Crystal

液晶參數	ϵ_{\perp}	ϵ_{\parallel}	$\Delta\epsilon$	cell gap(μm)	area(cm^2)
LC-1	3.7	13.6	9.9	3.7	0.9909
LC-2	3.6	11.5	7.9	3.7	0.9909
LC-3	3.8	16.2	12.4	3.7	0.9909
LC-4	3.6	16.2	12.6	3.7	0.9909
LC-5	3.6	16.2	12.6	3.7	0.9909

配向層參數	ϵ	膜厚(\AA)
LC-1	3.1	597.6
LC-2	3.1	597.6
LC-3	3.1	597.6
LC-4	X	X
LC-5	X	X

*LC-4、LC-5 為無配向層之液晶盒

UV 光參數	波長	瓦數	照射時間
	365 nm	100 mW/cm ²	780 sec

附錄二

高、低解離率離子電流物理模型

模擬計算參數列表

參數	LC-1	LC-2	LC-3	LC-4
dV/dt	1	1	1	1
d	3.7 μm	3.7 μm	3.7 μm	3.7 μm
ε	3.7	3.6	3.8	3.6
μ_H	-----	1.5*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	-----	1.3*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)
μ_w	25°C 1.5*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	1.4*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	1.7*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	1.4*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)
	40°C 2.0*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	-----	2.3*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	-----
	60°C 2.8*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	2.7*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	3.3*10 ⁻¹⁰ m ² /(V*s)	-----
n_{H0}	0 /m ³	3.5*10 ¹⁶ /m ³	0 /m ³	8.95*10 ¹⁷ /m ³
$\beta_0 N_0$	1.38*10 ²³ /(s*m ³)	7.50*10 ²² /(s*m ³)	1.65*10 ²³ /(s*m ³)	3.2*10 ²³ /(s*m ³)
α	7*10 ⁻²⁰ m ³ /s	7*10 ⁻²¹ m ³ /s	8*10 ⁻²⁰ m ³ /s	5*10 ⁻²⁰ m ³ /s
U_0	0.34 eV	0.34 eV	0.34eV	0.34eV