

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

有機發光二極體之微波響應與光電特性

之模型化

**Responses of Organic Light Emitting Diode to
Microwave and Modulated Electric Signals
and their Modeling**

研究生：戴晟傑

指導教授：陳志隆 教授

中華民國九十四年六月

有激發光二極體之微波響答與光電特性之模型化

**Responses of Organic Light Emitting Diode to Microwave
and Modulated Electric Signals and their Modeling**

研究生：戴晟傑
指導教授：陳志隆

Student: Sheng-Chieh Tai
Advisor: Jyh-Long Chern



Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering
National Chiao Tung University
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in

Electro-Optical Engineering

June 2005

Hsinchu, Taiwan

中華民國九十四年六月


有激發光二極體之微波響答與光電特性之模型化

學生 戴晟傑

指導教授 陳志隆

國立交通大學光電工程研究所碩士班

摘要



近幾年來，有機發光二極體(OLED)在顯示技術應用的發展上相當地快速，然而爲了達到顯示器技術應用的需求，成爲下一代顯示器主流，必須要改善 OLED 的耐用性的問題。所以如果能夠更清楚地瞭解 OLED 的基本的光電特性與模型化，將會對新材料的試驗上將會有很大的助益。本論文主要是嘗試微波、交流電路與直流電路來測量 OLED 的光電特性，並且嘗試建立出 OLED 的等效電路模型與分析 OLED 可靠度的方法。

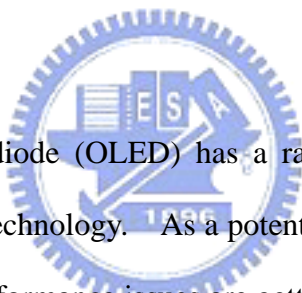
Responses of Organic Light Emitting Diode to Microwave and Modulated Electric Signals and their Modeling

Student : Sheng-Chieh Tai

Adviser : Dr. Jyh-Long Chern

Institute of Electro-Optical Engineering
National Chiao Tung University

Abstract



Organic Light-emitting diode (OLED) has a rapid progress recently since its application in planar display technology. As a potential candidate of next generation display, the endurance and performance issues are getting more attentions and also are urgent to be improved. Therefore, fundamental understandings and appropriate modeling of OLED are necessary and helpful in developing organic materials for the emergent industry. In this thesis, we examined and analyzed the transmission and phase spectrums within the microwave region. Moreover, we examined the electric and luminous responses of OLED driven by alternative current (AC) and directive current (DC) modes, and build up a rough equivalent circuit model of OLED to analyze the endurance of OLED.

誌謝

首先感謝我的父母親，一路走來對我的支持，讓我在求學過程中無後顧之憂。自從進入實驗室以來，受到許多人的照顧，尤其是 陳志隆老師在研究方向與論文撰寫上的指導，讓我受益良多，而且老師總是希望我們可以獨當一面，今後將更加努力，不負老師期望。在一開使進入實驗室時，慈方學姐與萱囊學姐則是帶著我熟悉光學的實驗與技巧。此外也要感謝曹兆璽學長，在生活與研究上都很熱心地提供他的經驗與建言和我們討論，就像一位大哥哥一樣照顧我們，小朱、伊凱與介任也常幫我解惑。當然還有和我一起走過兩年碩士班的森年、家佑、清祥、慧文，與碩一點五就畢業的志雲，在畢業前大家一起拼畢業論文日子真的非常難忘，也非常慶幸自己能遇到這麼優秀的同學。而在這段辛苦日子裡，碩一的學弟妹，建成、奎佐、忠穎、家瑜、夢華、玫君、燃宏總是能夠帶來許多歡樂，讓實驗室每天都充滿朝氣，整個實驗是就像一家人。我能夠順利畢業非常感謝大家的幫忙與扶持，真的是由衷的感謝，希望幾年後個個都是一方的佼佼者。最後則是要感謝我靈性上的導師 悟覺妙天禪師，讓我在心中永遠都有一盞明燈面對一切的挑戰。

目錄

| | |
|--------------------------|-----|
| 中文摘要..... | i |
| 英文摘要..... | ii |
| 誌謝..... | iii |
| 目錄..... | iv |
| 圖目錄..... | vii |
| 表目錄..... | xi |
| 第一章 簡介與歷史..... | 1 |
| 1-1 OLED 基本組成與特性..... | 1 |
| 1-2 異常傳波現象研究之歷史回顧..... | 3 |
| 1-3 OLED 光電模型與參數粹取..... | 5 |
| 第二章 微波響答量測..... | 7 |
| 2-1 異常傳播現象的基本理論..... | 7 |
| 2-1-1 群速度的物理意義與定義..... | 7 |
| 2-1-2 吸收物質與負數群速度的關係..... | 10 |
| 2-1-3 脈衝波在吸收物質中的傳播..... | 13 |
| 2-1-4 實驗分析方法..... | 17 |
| 2-2 OLED 模型化與參數粹取..... | 18 |
| 2-2-1 OLED 發光機制簡介..... | 18 |
| 2-2-2 直流訊號測試..... | 19 |

| | |
|---|-----------|
| 2-2-3 等效電路模型與交流訊號量測..... | 20 |
| 2-2-3-1 小訊號電路模型..... | 20 |
| 2-2-3-2 簡化的 OLED 電路模型..... | 23 |
| | |
| 第三章 微波響答實驗..... | 28 |
| | |
| 3-1 OLED 樣品..... | 28 |
| | |
| 3-2 實驗設備與裝置..... | 30 |
| | |
| 3-3 以 SMA 天線量測樣品在自由空間下的微波響答..... | 31 |
| | |
| 3-4 以拇指形天線量測藍色發光層在自由空間下的微波響答..... | 40 |
| | |
| 3-5 利用探針將微波導入 OLED 樣品的量測實驗..... | 48 |
| | |
| 第四章 微波響答實驗分析與討論..... | 51 |
| | |
| 4-1 OLED 與 ITO 樣品的微波響答實驗分析與討論..... | 52 |
| | |
| 4-2 藍色發光層樣品的微波響答實驗分析與討論..... | 53 |
| | |
| 第五章 OLED 的模型化與參數粹取..... | 55 |
| | |
| 5-1 小訊號電路模型實驗..... | 55 |
| 5-1-1 OLED 樣品的直流量測..... | 55 |
| 5-1-2 OLED 樣品頻率響應..... | 58 |
| 5-1-3 OLED 的方波響應..... | 64 |
| | |
| 5-2 簡化的 OLED 電路模型..... | 67 |
| 5-2-1 綠光 OLED 直流 B-I-V 量測..... | 67 |

| | |
|---|-----------|
| 5-2-2 綠光 OLED 方波響應..... | 76 |
| 5-3 OLED 的模型化與參數粹取分析與討論 | 78 |
| | |
| 第 6 章 總結 | 80 |
| 6-1 結論..... | 80 |
| 6-2 未來工作..... | 81 |
| 參考文獻..... | 82 |
| | |
| 附錄 A：SMA 接頭..... | 86 |
| | |
| 附錄 B：C-Band, X-Band, and Ku-Band Stub Antenna 拇指天線規格 | 87 |
| 附錄 C：SY-10PD 光接收二極體..... | 89 |
| 附錄 D：Light Port 兩孔積分球..... | 90 |
| 附錄 E：Hamamatsu S2387-1010R 光接收二極體..... | 91 |

圖目錄

| | |
|--|----|
| 圖 1.1.1：基本 OLED 的架構示意圖 | 1 |
| 圖 1.1.2：OLED 在臨界電壓時的能量帶圖 | 2 |
| 圖 2.1.1：模擬兩個不同頻率的電磁波合成圖 | 8 |
| 圖 2.1.2：吸收係數與折射率的頻譜圖 | 12 |
| 圖 2.1.3：某一個時刻脈衝在負數群速度物質附近的傳播圖 | 16 |
| 圖 2.2.1：(a) OLED 順向偏壓能帶圖 | 19 |
| (b) OLED 反向偏壓能帶圖 | 19 |
| 圖 2.2.2：OLED 小訊號的等效電路模型 | 22 |
| 圖 2.2.3：OLED 交流量測示意圖 | 22 |
| 圖 2.2.4：ETL 與 HTL 等效電路模型 | 23 |
| 圖 2.2.5： $i(t) - v(t)$ 交流訊號曲線 | 24 |
| 圖 2.2.6： $b(t) - i(t)$ 與 B-I 的交流與直流曲線 | 25 |
| 圖 2.2.7： $v(t)$ 、 $i(t)$ 與 $b(t)$ 對時間的曲線 | 27 |
| 圖 3.1.1：OLED 樣品基本結構 | 28 |
| 圖 3.1.2：OLED 實際樣品照片 | 29 |
| 圖 3.1.3：(a) 透明電極樣品照片 | 30 |
| (b) 有機發光層樣品照片 | 30 |
| 圖 3.2.1：(a) SMA 接頭照片 | 31 |
| (b) 拇指形天線的照片 | 31 |
| 圖 3.3.1：(a) SMA天線 S_{21} 頻譜圖 | 32 |
| (b) SMA 角度分佈的場型圖 | 32 |
| 圖 3.3.2：OLED 微波量測示意圖 | 32 |
| 圖 3.3.3：微波量測實驗架設照片 | 33 |
| 圖 3.3.4：藍、綠、白三種色光的OLED與ITO之 S_{21} 頻譜 | 34 |

| | |
|--|----|
| 圖 3.3.5 : 藍光OLED 13.35GHz到 14.85GHz之 S_{21} 頻譜 | 34 |
| 圖 3.3.6 : 藍光 OLED 脈衝響應 | 35 |
| 圖 3.3.7 綠光OLED 13.5 GHz到 14.2 GHz的 S_{21} 吸收頻譜 | 36 |
| 圖 3.3.8 : 為綠光 OLED 的脈衝響應 | 36 |
| 圖 3.3.9 : 白光OLED 13.5 GHz到 14.5GHz之 S_{21} 頻譜 | 38 |
| 圖 3.3.10 : 白光 OLED 的脈衝響應 | 38 |
| 圖 3.3.11 : 點亮與未點亮的脈衝響應圖 | 39 |
| 圖 3.3.12 : ITO從 13.5 GHz到 14.5GHz之 S_{21} 頻譜 | 39 |
| 圖 3.3.13 : ITO 的脈衝響應 | 40 |
| 圖 3.4.1 : (a) 藍色發層 2D 強度分佈量測實驗架設的示意圖 | 41 |
| (b) 藍色發光層實驗架設照片 | 42 |
| 圖 3.4.2 : 藍色發光層 10~20.05 GHz的 S_{21} 頻譜 | 42 |
| 圖 3.4.3 : (a) 未放置樣品時的的 2D 強度分佈圖 | 43 |
| (b) 藍色發光層樣品的的 2D 強度分佈圖 | 43 |
| 圖 3.4.4 : 以拇指形天線量測到的藍色發光層的 S_{21} 頻譜 | 45 |
| 圖 3.4.5 : 藍色發光層折射率頻譜與 S_{21} 頻譜圖 | 45 |
| 圖 3.4.6 : (a) 藍色發光層的脈衝響應圖 | 47 |
| (b) 藍色發光層的脈衝響應圖 | 47 |
| 圖 3.4.7 : 參考訊號分別減掉超前與延遲脈衝訊號的差值圖 | 48 |
| 圖 3.5.1 : (a) 原 SMA End Launch Jack | 49 |
| (b) 去掉四個角的 SMA End Launch Jack Receptacle 照片 | 49 |
| 圖 3.5.2 : 以 SMA End Launch Jack 為探針的實驗架設圖 | 49 |
| 圖 3.5.3 : 白光 OLED 與不能發光的白光 OLED 的量測頻譜圖 | 50 |
| 圖 4.1 : S_{21} 頻譜與折射率頻譜 | 53 |
| 圖 5.1.1 : (a) 實驗量測架構示意圖 | 56 |
| (b) OLED 直流量測實驗架設照片 | 56 |

| | |
|--|----|
| (c)為偵測器實體照片 | 56 |
| 圖 5.1.2：白光 OLED 的 I-V 曲線圖 | 57 |
| 圖 5.1.3：白光 OLED 的 B-V 曲線圖 | 57 |
| 圖 5.1.4：白光 OLED 的 B-I 曲線圖 | 58 |
| 圖 5.1.5：白光 OLED 頻率響應實驗架構圖 | 59 |
| 圖 5.1.6：白光 OLED 振幅頻率響應 | 59 |
| 圖 5.1.7 白光 OLED 相位頻率響應，頻率範圍從 5 KHz 到 500 | 60 |
| 圖 5.1.8 白光 OLED 電導頻率響應，頻率範圍從 5 KHz 到 500 KHz | 60 |
| 圖 5.1.9：白光 OLED 電容頻率響應，頻率範圍從 5 KHz 到 500 KHz | 61 |
| 圖 5.1.10：OLED 小訊號電路模型 | 62 |
| 圖 5.1.11：PSPICE 模擬軟體中的 OLED 量測電路圖 | 62 |
| 圖 5.1.12：(a) 直流偏壓 5V，白光 OLED 的振幅頻率響應模擬與實驗比較圖 | 63 |
| (b) 直流偏壓 5V，白光 OLED 的相位頻率響應模擬與實驗比較圖 | 63 |
| (c) 直流偏壓 7V，白光 OLED 的振幅頻率響應模擬與實驗比較圖 | 64 |
| (d) 直流偏壓 7V，白光 OLED 的相位頻率響應模擬與實驗比較圖 | 64 |
| 圖 5.1.13：OLED 方波響應量測實驗裝置照片 | 66 |
| 圖 5.1.14：輸入電壓與 OLED 跨壓及亮度波形 | 66 |
| 圖 5.2.1：(a)直流 B-I-V 實驗量測架構示意圖 | 69 |
| (b)實驗系統照片 | 69 |
| (c) 光偵測器照片 | 69 |
| 圖 5.2.2：(a) 第一週期的外加電壓上升部分時 OLED 上的跨壓 | 70 |
| (b) 第一週期的外加電壓下降部分時 OLED 上的跨壓 | 70 |
| 圖 5.2.3：(a) 第一週期的外加電壓上升部分時流經 OLED 的電流 | 70 |
| (b) 第一週期的外加電壓下降部分時流經 OLED 的電流 | 70 |
| 圖 5.2.4：(a) 第一週期的外加電壓上升部分時流經 OLED 發光亮度 | 70 |
| (b) 第一週期的外加電壓下降部分時流經 OLED 的發光亮度 | 70 |

| | |
|---|----|
| 圖 5.2.5 : (a) 第二週期的外加電壓上升部分時 OLED 上的跨壓 | 71 |
| (b) 第二週期的外加電壓下降部分時 OLED 上的跨壓 | 71 |
| 圖 5.2.6 : (a) 第二週期的外加電壓上升部分時流經 OLED 的電流 | 71 |
| (b) 第二週期的外加電壓下降部分時流經 OLED 的電流 | 71 |
| 圖 5.2.7 : (a) 第二週期的外加電壓上升部分時流經 OLED 發光亮度 | 71 |
| (b) 第二週期的外加電壓下降部分時流經 OLED 的發光亮度 | 71 |
| 圖 5.2.8 : (a) 第三週期的外加電壓上升部分時 OLED 上的跨壓 | 72 |
| (b) 第三週期的外加電壓下降部分時 OLED 上的跨壓 | 72 |
| 圖 5.2.9 : (a) 第三週期的外加電壓上升部分時流經 OLED 的電流 | 72 |
| (b) 第三週期的外加電壓下降部分時流經 OLED 的電流 | 72 |
| 圖 5.2.10 : (a) 第三週期的外加電壓上升部分時流經 OLED 發光亮度 | 72 |
| (b) 第三週期的外加電壓下降部分時流經 OLED 的發光亮度 | 72 |
| 圖 5.2.11 : 在三個週期後，一次加到 10 V 後再以每 0.5 秒下降 0.5 V 地降到 0 的 | |
| (a) OLED 跨壓曲線 | 73 |
| (b) 電流曲線 | 73 |
| (c) 亮度曲線 | 73 |
| 圖 5.2.12 : 無法再發光的綠光 OLED 樣品照片 | 74 |
| 圖 5.2.13 : (a) 振幅為 7V 時，綠光 OLED 外加電壓波形圖 | 76 |
| (b) 振幅為 7V 時，綠光 OLED 的電流波形 | 76 |
| (c) 振幅為 7V 時，綠光 OLED 外加電壓與亮度波形圖 | 77 |
| 圖 5.2.14 : (a) Duty circle = 40% 的綠光 OLED 外加電壓波形圖 | 77 |
| (b) Duty circle = 40% 的綠光 OLED 的電流波形 | 77 |
| (c) Duty circle = 40% 的綠光 OLED 外加電壓與亮度波形圖 | 77 |
| 圖 5.2.15 : (a) 振幅為 8V 時，綠光 OLED 外加電壓波形圖 | 78 |
| (b) 振幅為 8V 時，綠光 OLED 的電流波形 | 78 |
| (c) 振幅為 8V 時，綠光 OLED 外加電壓與亮度波形圖 | 78 |

表目錄

| | |
|--|----|
| 表 1.1 異常傳播現象一覽表..... | 5 |
| 表 3.1 三種發光顏色 OLED 的組成..... | 29 |
| 表 4.1 藍光、綠光、白光 OLED 與 ITO 樣品微波量測數據比較表..... | 52 |



第一章 簡介與歷史

由於有機發光二極體(OLED)在顯示器上的應用比起液晶顯示器(LCD)有自發光、高發光效率、高亮度、廣視角、反應時間短、重量輕、易製作、成本低等...優點，但是在使用壽命上比 LCD 要短，因此如果有一種快速的 OLED 可靠度測試方法，將有助於 OLED 在材料上的研發與量產上的測試。在我們的實驗中嘗試從微波波段、低頻的交流訊號與直流訊號來測試。而在微波波段的量測我們使用天線與探針來測試 OLED 樣品，但從我們的實驗結果看來，微波反映不出 OLED 樣品間的操作特性，但是發現到脈衝傳播在 OLED 微波的吸收波段，脈衝傳播的群速度會有負值出現。所以我們將使用前人的分析方法來探討我們在 OLED 中發現到的異常傳播現象，而本章也將介紹前人發現到異常傳播現象。另一方面在低頻交流訊號與直流訊號實驗上，將依據模型化的參數粹取來分析，並希望能找到與 OLED 發光效能的特性上的關聯，因此本章將對 OLED 基本組成、異常傳播現象與 OLED 的可靠度測試作概略性的介紹。

1-1 OLED 基本組成與特性

有機發光二極體的材料主要可分為兩類，一類是小分子的發光材料通常稱為 Organic Light Emitting Diode, OLED，另一類是高分子聚合物的發光材料，通常成為 Polymer Light Emitting Diode, PLED，而在我們的實驗中的樣品的組成為小分子的發光材料，即 OLED。圖 1.1.1 為 OLED 的基本架構與當時柯達公司的鄧清雲博士所提出的 OLED 的架構 [1] 相似，主要包括：在兩個電極板間，包含電子傳輸層 (electron transport layer, ETL)，通常使用 8-hydroxyquinoline aluminum (Alq_3) 為 ETL、電洞傳輸層 (hole transport layer, HTL)，HTL 則常用 naphthyl-substituted benzidine derivative (NPB)。HTL 與 ETL 兩層其主要的差別即在於對於電子與電洞

移動率(mobility)的不同，也就是說在相同電壓作用下，電子與電洞的移動速率會有很大的差別，在以NPB為HTL中，電洞的遷移率約為 $10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [2]，而在以Alq₃為ETL中，電子遷移率大約是 $10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [3]。

在電極方面通常是採用 Al 作為陰極，因為陽極為 OLED 的發光面，所以會使用透明電極 indium-tin-oxide (ITO)，除了這四層以外，有時候為了改善電子、電洞的注入效率，在 HTL 與 ITO 間會加入電洞注入層 (hole injection layer, HIL) [4] 可以降低陽極與 HTL 間的位能障礙，而在 ETL 與 Al 層間則會加入 LiF [5]，這兩層都是為了使電子與電洞能夠更有效率地從兩極到達有機層。當電子與電洞順利經過 ETL 與 HTL 到達這兩層的界面時，電子與電洞會發生覆合而放出光。所以說這個界面上便是一個重要的關鍵，通常為了增加發光效率或是改變發光顏色，通常在在 ETL 與 HTL 中間會加入一層具有參雜其他發光分子的有機層，讓電子與電洞覆合發生在這一層[6]。

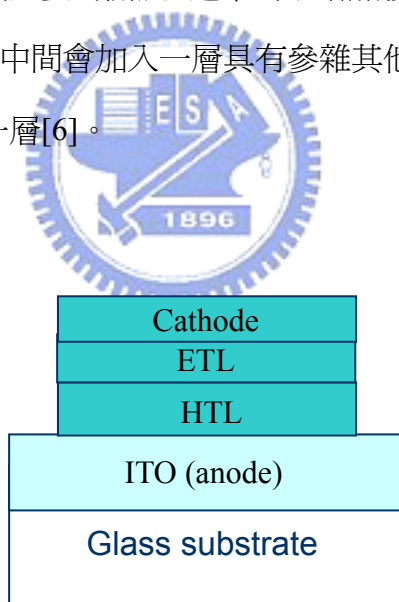


圖 1.1.1 基本 OLED 的架構示意圖。

根據前人的研究可以發現 OLED 在超過臨界電壓之後，其發光亮度是與電流成正比，因此 OLED 樣品內的電荷移動會影響發光亮度。Burrows 等人 [7]提出在 OLED 的電荷的傳導主要是受有機層內的陷阱數所限制(trapped-charge-limit, TCL)，因為自由傳導的電荷會被有機層中的陷阱所束縛，所以在 OLED 電流便

會被這些陷阱所限制，而受陷阱所限制的電流密度可以(1.1.1)式來描述：

$$J = q^{1-l} \mu N_c \left(\frac{2l+1}{l+1}\right)^{(l+1)} \left(\frac{l}{l+1}\right)^l \left(\frac{\epsilon}{N_t}\right) \frac{V^{(l+1)}}{d^{(2l+1)}}, \quad (1.1.1)$$

其中 μ 為遷移率， N_c 為導電帶的態位密度， $l = \frac{T_c}{T}$ ， T_c 是陷阱的特性溫度， T 為元件的溫度， ϵ 為介電密度， N_t 為陷阱密度， V 為兩電極板間的電壓， d 電極間距。如果要以比較簡單的方法來瞭解 OLED 的操作，可以用能量帶圖(energy band diagram)來描述[]。圖 1.1.2 為 OLED 在臨界電壓時的能量帶圖，從此圖描述電子與電洞在進入 OLED 後的可幾個可能的情形 [8, 9]。當電壓高於臨界電壓時，電子與電洞注入 OLED 與發光亮度就會明顯增加。

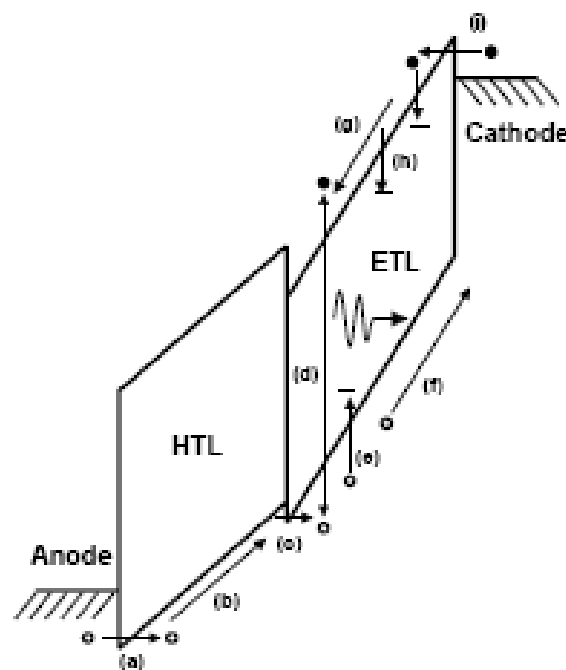


圖 1.1.2 OLED 在臨界電壓時的能量帶圖，電洞(a)從陽極注入，(b)經過 HTL，(c)注入 ETL，在 ETL 與 HTL 的界面附近，(d)電子與電洞覆合放出光，(e)有些電洞被陷阱所束縛，(f)另外有些電子穿過 ETL 到陰極，(g)電子到達 ETL 將與電洞覆合，(h)大部分的電子在陰極附近被陷阱束縛，(i)電子從陰極注入。[10]

1-2 異常傳波現象研究之歷史回顧

自從 Maxwell 方程式與狹義相對論的提出之後，基本上我們認為沒有任何訊息的傳遞會比光速還快，但是如果從脈衝傳播的近似結果中，脈衝最高點的行進速度 [11]：

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n(\omega) + \omega(dn/d\omega)}, \quad (1.2.1)$$

當 $dn/d\omega < 0$ 便有機會使 $v_g > c$ 或是 $v_g < 0$ ；如果 $v_g > c$ 就是所謂的超光速現象 (superluminal)，如果是 $v_g < 0$ ，代表當脈衝還沒進入物質前，就已經有脈衝出射了，這兩種情形似乎不符合因果論的假設，也就是所謂的異常傳播現象，而要出現 $dn/d\omega < 0$ 的情形，就是在異常色散現象的情形下，也就是折射率 $n(\omega)$ 隨著頻率的增加而變小。第一次提出這概念的是 Sommerfeld 和 Brillouin，他們研究以弦波合成的階梯函數，進入個符合 Lorentz 模型的色散的介質中，定義出相速度 (phase velocity)、群速度 (group velocity)、能量速度 (energy velocity) 和前鋒速度 (front velocity) [12]，而這四種速度中，只有前鋒速度指的是脈衝的起始點傳波的速度必須比光速要慢，所以會滿足因果論。而群速度實際上並不代表訊息傳播的速度，應該是因為脈衝波的形狀被改變了，使得脈衝頂峰的位置往前移動的比參考還前面，所以看起來像是出現超前現象，異常傳播現象的推導與解釋將在第二章基本理論中詳述。

根據前人的研究中發現異常速度的材質，主要有固體、氣體、微波電路與光子晶體，以下將介紹這在這些物質中所發現到的異常傳播現象。固體出現異常傳播現象方面 Chu 和 Wang 發現在溫度在 1.7K 的 GaP:N 中，如果輸入脈衝光包含的在 GaP:N 的吸收譜附近，可以發現群速度的範圍從大於光速、 $\pm\infty$ 或是負數 [13]。在氣體方面，Mikhailov 等人發現若輸入脈衝光到 68°C 的氣態 ^{87}Rb ，會出

現群速度變負數，而且會變慢到 $-c/10^6 = -80 \text{ m/s}$ ，除此之外他們還發現到隨著輸入脈衝光的能量與脈衝的超前量成線性關係 [14]。在微波電路方面，Siddiqui 等人利用週期性的負載傳輸線，也可以發現輸入微波脈衝會有負數群速度的傳播特性，其中脈衝的超前量大約在奈秒的數量級 [15]。最後在光子晶體方面，Solli 等人提出以二維雙折射的光子晶體來研究 [16,17]，使用的樣品是用 18 層的六邊形中空的壓克力棒組成，中空的部分比例為全部面積的 0.6，除了發現超光速現象外，他們發現輸入微波脈衝的偏振特性與脈衝超前的關係，脈衝超前與延遲範圍也是在奈秒的數量級。Longhi 則是發現是在 $1.5 \mu\text{m}$ 的一維的布拉格光柵光纖中也有超光速的現象 [18,19]，群速度大概在光速的 1.97 倍。而我們在 OLED 的微波脈衝量測實驗中，發現不僅是脈衝傳播出現負數群速度，而且大約是光速的 $\sim 1/10^5$ 倍，我們使用的 OLED 樣品主要是由有機層、透明電極與金屬薄層構成，也有單一材質的有機層，詳細的實驗架構與結果將會在第三章中詳述。表 1.1 列出在固體、氣體、微波電路與光子晶體與 OLED 樣品中，出現異常傳播的現象與條件。



表 1.1 異常傳播現象一覽表。

| 樣品 | 樣品種類 | 樣品大小 | 環境條件 | 發射源 | 群速度範圍 |
|------------------|--------|--|--------------------|------------------------------|---------------------|
| GaP:N | 固體 | $9.5 \mu\text{m} \text{ \& } 76 \mu\text{m}$ | 1.7K | 可調雷射 | $>0, <0, \pm\infty$ |
| ^{87}Rb | 氣體 | 2.5 cm | 68°C | 外腔雷射 | $-c/10^6$ |
| 週期性的負載傳輸線 | 微波電路 | 6 cm | 室溫 | 微波波形產生器 | $\sim -c/16$ |
| 六邊形壓克力棒陣列 | 二維光子晶體 | $\sim 23 \text{ cm}$ | 室溫 | 網路分析儀 | $\sim -c/6.5$ |
| 布拉格光柵光纖 | 一維光子晶體 | 2 cm | 室溫 | $\sim 1.5 \mu\text{m}$ 半導體雷射 | $1.97c$ |
| OLED 樣品 | 有機發光元件 | $\sim 350 \text{ nm}$ | 室溫 | 網路分析儀 | $\sim -c/10^5$ |
| 有機發光層 | 有機薄膜 | 20 nm | 室溫 | 網路分析儀 | $\sim -c/10^4$ |

1-3 OLED 光電模型與參數粹取

在近幾十年來，由於半導體技術的蓬勃發展，在半導體檢測已有一套有效且

快速的方法，而有機發光二極體因為在顯示技術上的需求而快速發展，所以快速的 OLED 可靠度測試便是一項重要的課題，量測的基礎主要是根據 OLED 模型化後的參數與發光效能的特性作連結，進而推估出 OLED 的使用壽命。因此第一步必須瞭解 OLED 光電特性以建出光電模型，再經由燒機測試找到會隨著發光效能變化的參數。在我們的參數找粹取的量測實驗，主要是從直流與交流測試的方式來，直流方面主要是看 OLED 的發光電壓、電流與亮度之間的關係，交流測試方面，我們用簡單的 RC 電路當作 OLED 的電路模型 [20]，我們可以用交流訊號將 OLED 找出 RC 參數，再經過長時間的測試來觀察 RC 參數對時間關係。除了 RC 參數外，根據前人對 OLED 的研究發現 [10]，樣品中陷阱的數量會影響發光的效率與特性，因此我們的研究也將朝如何以簡單的交流測試把決定出樣品中的陷阱的多寡，以便作為判斷 OLED 可靠度的依據，而在本篇論文中發現到當 OLED 樣品在直流量測下的不穩定現象，反映出 OLED 本身材料缺陷的問題。



第二章 基本理論

在 OLED 的量測上，我們分成高頻的微波量測與電性量測，而在微波量測上，我們發現到異常傳播的現象，所以在本篇論文中基本理論主要分成兩個部分；一個是異常傳播現象的基本理論，一個是 OLED 光電模型化與參數粹取。在異常傳播現象的理論中，我們將從異常色散物質的特性與異常傳播現象的關係來探討。OLED 可靠度測試則是從 OLED 電性參數量測開始，試圖與 OLED 發光特性作連結，進而推測出 OLED 的使用壽命。

2-1 異常傳播現象的基本理論

2-1-1 群速度的物理意義與定義

在 OLED 的微波量測中，我們發現 OLED 的脈衝響應在某些特定的頻率範圍，會出現脈衝波超前參考波的異常現象，所以我們將根據電磁波的基本理論 [21] 來探討。首先我們將從兩個不同頻率的電磁波在同一方向上傳播來看：

$$E_1 = E_{01} \cos(k_1 x - \omega_1 t)$$

$$E_2 = E_{01} \cos(k_2 x - \omega_2 t),$$

其中 $k_1 > k_2$, $\omega_1 > \omega_2$ ，且這兩個波的振幅相同，起始相位皆是零，因此兩波的合成可表示成：

$$\begin{aligned} E &= E_{01} [\cos(k_1 x - \omega_1 t) + \cos(k_2 x - \omega_2 t)] \\ \Rightarrow E &= 2E_{01} \cos(k_m x - \omega_m t) \cos(\bar{k} x - \bar{\omega} t) \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

其中 $\bar{\omega} \equiv \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$, $\omega_m \equiv \frac{1}{2}(\omega_1 - \omega_2)$; $\bar{k} \equiv \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$, $k_m \equiv \frac{1}{2}(k_1 - k_2)$ ，而 $\bar{\omega}$ 和 \bar{k}

分別為平均角頻率和平均波數， ω_m 和 k_m 則為調變頻率和調變波數，如果我們令 $E_0(x,t) = 2E_{01} \cos(k_m x - \omega_m t)$ ，(2.1.1)式則可改寫成：

$$E(x,t) = E_0(x,t) \cos(\bar{k}x - \bar{\omega}t) \quad (2.1.2)$$

因為 $\bar{\omega} > \omega_m$ ，所以從(2.1.2)式可看出 $E_0(x,t)$ 為振幅的調變函數，也就是合成波的傳遞振幅隨著時間與空間的變化會被限制於 $E_0(x,t)$ 的函數，形成如波包的波形，我們可以經由模擬來表示合成波的波形，如圖 2.1.1，而 $(\bar{k}x - \bar{\omega}t)$ 則是在波包裡的合成波相位，因此可以定義出群速度：(2.1.3)式與相速度：(2.1.4)式，

$$v = \frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2} = \frac{\bar{\omega}}{\bar{k}} \quad (2.1.3)$$

$$v_g = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k} \quad (2.1.4)$$

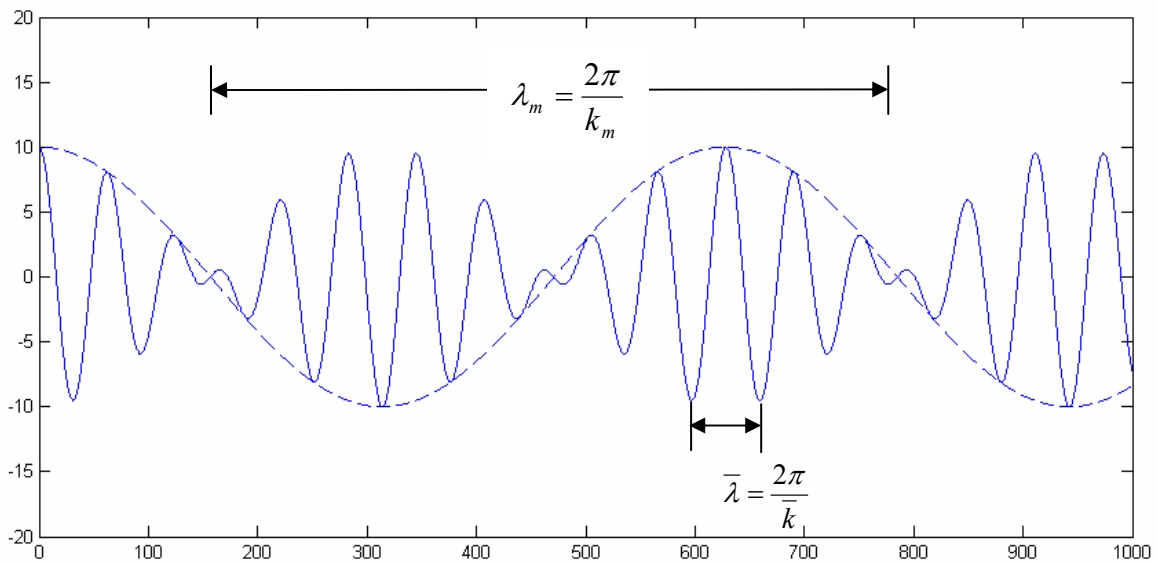


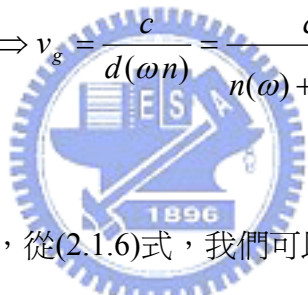
圖 2.1.1 模擬兩個不同頻率的電磁波合成圖，實線為合成波形，虛線為調變函數的波形。此圖中 $k_m = 0.01$ ， $\bar{k} = 0.1$ 。

相速度代表在波包裡頭的波的行進速度，群速度為波包的行進速度，假如合成波是由更多的頻率所構成，且包含的頻率是在一定範圍內，波包會形成像脈衝的波形，這時候 $\Delta\omega$ 如果小到一定的程度時， $\Delta\omega/\Delta k$ 會變成微分的形式，

$$v_g = \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_m \quad (2.1.5)$$

再加上若合成電磁波的頻率是在色散的材料中傳播的話，的因為 $\omega = kv$ 的關係，所以群速度可以表示成，

$$v_g = v + k \frac{dv}{dk}$$

$$\Rightarrow v_g = \frac{c}{d(\omega n)} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega}} \quad (2.1.6)$$


其中 c 為光速， n 為折射率，從(2.1.6)式，我們可以知道當脈衝波經過色散物質之後，因為在不同頻率下各個波所看到的折射率皆不同，所以脈衝波的群速度會因為色散物質的特性而有所不同，特別是當 $(n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega})$ 的值小於零或是出現負值時，脈衝波群速度便會超越光速或是為負值，若是 $(n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega})$ 的值很大的時候，也會讓脈衝速度變得很慢，甚至趨近於零的現象，所以一個很特別的色散特性的物質，會讓脈衝出現異常的傳播現象，在我們的實驗中，主要是發現當微波經過 OLED 樣品之後，會出現很慢且為負值的群速度。既然有了群速度 v_g 之後，也可以定義出等效的群速度折射率(group index of refraction)，

$$n_g \equiv c/v_g = n + \omega \frac{dn}{d\omega} \quad (2.1.7)$$

所以很自然地當群速度出現異常的數值時，我們也可以得到異常的群速度折射率。這種異常傳播現象主要會發生異常色散的材料上，也就是 $dn/d\omega < 0$ 且讓 $n(\omega) + \omega \frac{dn}{d\omega} < 1$ ，包括自然物質和人造晶體。從直觀上看來這種異常傳播現象似乎違反因果論與相對論，因為脈衝傳播速度大於光速甚至是負值，這也就意味著說當脈衝還未完全進入或未進入這種材料時，就已經在另一端出現了。實際上這種現象並未違反因果論或相對論，這是因為脈衝波是由很多種不同頻率的波組合而成，如果分開來看每個波其實都沒有違反因果論或相對論，而是因為各個頻率的波看到的折射率不同，加總起來的脈衝波的波形產生形變使得脈衝的波峰提早出現，所以會看到脈衝超前的現象，但實際上各頻率的電磁波並沒有超過光速。

2-1-2 吸收物質與負數群速度的關係

我們在 OLED 樣品中發現到的異常脈衝傳播的現象，是因為吸收材質所產生的異常色散所致，如果我們以分子共振的角度來分析 [22]，假設分子震盪中極化密度與外加電場符合二階微分方程式，如(2.1.8)式，

$$\frac{d^2 \bar{P}}{d^2 t} + \sigma \frac{d \bar{P}}{dt} + \omega_0^2 \bar{P} = \omega_0^2 \epsilon_0 \chi_0 \bar{E} \quad (2.1.8)$$

$\bar{P} = Nex$ 為極化密度， N 為單位電荷密度， ω_0 為角共振頻率， ϵ_0 為介電常數， $\chi_0 = e^2 N / m \epsilon_0 \omega_0^2$ ， $\omega_p^2 = e^2 N / m$ 為物質的電漿頻率， \bar{E} 為電場。也就必須當位移和外加力符合古典簡諧振盪的線性二階微分方程式，如(2.1.9)式，

$$\frac{d^2 x}{d^2 t} + \sigma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{\bar{F}}{m} \quad (2.1.9)$$

其中 x 為位移量， $\bar{F} = e\bar{E}$ ，若將 $\bar{E}(t) = \text{Re}\{E \exp(j\omega t)\}$ ， $\bar{P} = \text{Re}\{P \exp(j\omega t)\}$ 帶入(2.1.8)式，我們可以得到(2.1.10)式，

$$(-\omega^2 + j\sigma\omega + \omega_0^2)P = \omega_0^2 \varepsilon_0 \chi_0 E \quad (2.1.10)$$

移項可得，又可將 P 寫成 $P = \varepsilon_0 \{\chi_0 \omega_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2 + j\sigma\omega)\} E$ ， $P = \varepsilon_0 \chi(\nu) E$ ，

， $\omega = 2\pi\nu$ ，因此將可得到電極化率 χ 隨頻率的變化的表示式，如(2.1.11)式，

$$\chi(\nu) = \chi_0 \frac{\nu_0^2}{\nu_0^2 - \nu^2 + j\nu\Delta\nu} \quad (2.1.11)$$

，其中 $\Delta\nu = \sigma/2\pi$ ， $\chi(\nu)$ 的實部 $\chi'(\nu)$ 和虛部 $\chi''(\nu)$ 分別如(2.1.12)式與(2.1.13)式，

$$\chi'(\nu) = \chi_0 \frac{\nu_0^2(\nu_0^2 - \nu^2)}{(\nu_0^2 - \nu^2)^2 + (\nu\Delta\nu)^2} \quad (2.1.12)$$

$$\chi''(\nu) = -\chi_0 \frac{\nu_0^2 \nu \Delta\nu}{(\nu_0^2 - \nu^2)^2 + (\nu\Delta\nu)^2} \quad (2.1.13)$$

，在這邊(2.1.11~13)式中，我們有興趣的頻率範圍為靠近共振頻率 ν_0 附近，即 $\nu \approx \nu_0$ ，所以 $(\nu_0^2 - \nu^2) = (\nu_0 - \nu)(\nu_0 + \nu) \approx 2\nu_0(\nu_0 - \nu)$ ， $\chi''(\nu)$ 與 $\chi'(\nu)$ 便可簡化成(2.1.14)式、(2.1.15)式，

$$\chi''(\nu) = \chi_0 \frac{\nu_0 \Delta\nu}{4} \frac{1}{(\nu_0^2 - \nu^2)^2 + (\Delta\nu/2)^2} \quad (2.1.14)$$

$$\chi'(\nu) = 2 \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu} \chi''(\nu) \quad (2.1.15)$$

假設這些共振原子是被稀釋在 $n = n_0$ 物質中，使我們可以設 $\chi''(\nu)$ 與 $\chi'(\nu)$ 都是很小的值，則整體的吸收係數 $\alpha(\nu)$ 與折射率 $n(\nu)$ 如(2.1.16)式與(2.1.17)式，將這兩式對頻率作圖，如圖 2.1.2，可以發現在頻譜上吸收最強的點就是共振頻率，也是異常色散範圍的中心點，

$$n(\nu) \approx n_0 + \frac{\chi'(\nu)}{2n_0} \quad (2.1.16)$$

$$\alpha(\nu) \approx -\left(\frac{2\pi\nu}{n_0 c_0}\right) \chi''(\nu) \quad (2.1.17)$$

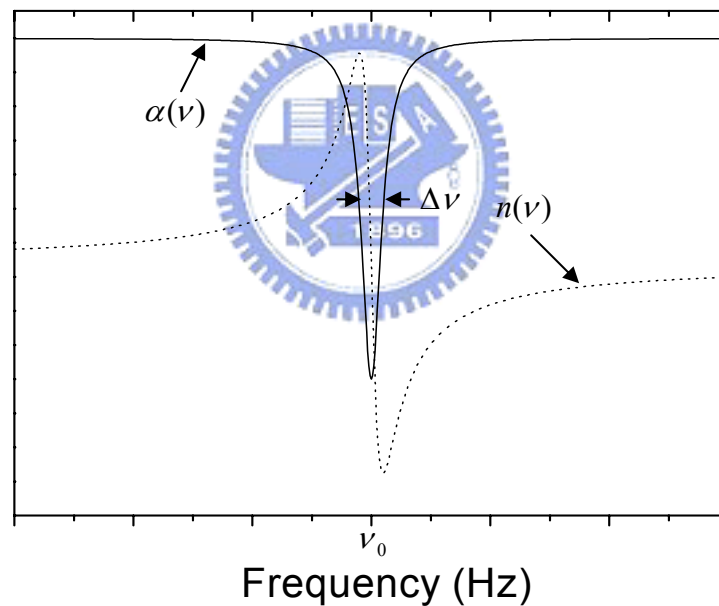


圖 2.1.2 吸收係數與折射率的頻譜圖。

將(2.1.16)式帶入(2.1.6)式可算出 v_g 與頻率的關係式，如(2.1.18)式：

$$v_g = \frac{c}{d(\omega n)} = \frac{c}{n_0 + \frac{\Delta\nu\nu_0(\nu - \nu_0)^2 \chi_0}{2n_0\left(\frac{\Delta\nu^2}{4} + (\nu_0 - \nu)^2\right)^2} - \frac{\Delta\nu\nu_0\chi_0(2\nu - \nu_0)}{4n_0\left(\frac{\Delta\nu^2}{4} + (\nu_0 - \nu)^2\right)} \quad (2.1.18)$$

從(2.1.18)式可以看出如果 v_g 要小於零， $d(\omega n) < 0$ ，因為 $d(\omega n)$ 為一個開口向上的二次方程式，所以 $d(\omega n) < 0$ 的範圍會在兩根的中間。

2-1-3 脈衝波在吸收物質中的傳播

在討論脈衝波之前，我們先討論單頻波經過吸收物質時的傳播情形 [23]，再藉由不同頻率波的疊加模擬脈衝響應的結果。假設吸收物質空間中所佔的位置是從 $z=0$ 到 $z=a$ ，而單頻波在 $z < 0$ 時是在真空中傳播，可以表示成(2.1.19)式，

$$E_{\omega}(z, t) = E_0 e^{i\omega z/c} e^{-i\omega t} \quad (z < 0) \quad (2.1.19)$$

在這邊我們假設在物質邊界是沒有反射的，進入吸收物質裡的速度為相速度 $v = c/n(\omega)$ ，電磁傳播可表示成(2.1.20)式，

$$E_{\omega}(z, t) = E_0 e^{i\omega n z/c} e^{-i\omega t} \quad (0 < z < a) \quad (2.1.20)$$

當平面波離開吸收物質時速度又回復到光速 c ，但是會因為經過介質的因素，所以會有一個相位延遲 $(\omega/c)(n-1)a$ ，可以表示成(2.1.21)式，

$$E_{\omega}(z, t) = E_0 e^{i\omega(n-1)a/c} e^{i\omega z} e^{-i\omega t} = E_0 e^{i\omega n a/c} e^{-i\omega(t-(z-a)/c)} \quad (z > a) \quad (2.1.21)$$

在(2.1.19~21)式中因為角頻率與折射率的乘積的高階微分項很小，所以可以用一次方的泰勒展開式近似(2.1.22)式，

$$\omega n(\omega) = \omega_0 n_0 + \frac{c}{v_g} (\omega - \omega_0) \quad (2.1.22)$$

其中 v_g 是以 ω_0 為中心頻率的脈衝波的群速度，將(2.1.22)帶回(2.1.20~21)式，如此可以得到 $E_\omega(z, t)$ 與群速度的關係，

$$E_\omega(z, t) \approx E_0 e^{i\omega_0 z(n_0/c - 1/v_g)/c} e^{i\omega z/v_g} e^{-i\omega t} \quad (0 < z < a) \quad (2.1.23)$$

$$E_\omega(z, t) \approx E_0 e^{i\omega_0 z(n_0/c - 1/v_g)/c} e^{i\omega(z/c - a(1/c - 1/v_g))} e^{-i\omega t} \quad (z > a) \quad (2.1.24)$$

得到 v_g 與 $E_\omega(z, t)$ 關係後，便可以藉由傅利葉分析將 $E_\omega(z, t)$ 轉成 $E(z, t)$ ，來討論時域的脈衝響應，因此輸入脈衝波可以寫成，

$$E(z, t) = f(z/c - t) = \int_{-\infty}^{\infty} E_\omega(z, t) e^{-i\omega t} d\omega \quad (z < 0) \quad (2.1.25)$$

$$E_\omega(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(z, t) e^{i\omega t} dt \quad (2.1.26)$$

由(2.25)式可以來描述脈衝波傳遞的過程，

$$E(z, t) \approx \begin{cases} f(z/c - t) & (z < 0) \\ e^{i\omega_0 z(n_0/c - 1/v_g)/c} f(z/v_g - t) & (0 < z < a) \\ e^{i\omega_0 a(n_0/c - 1/v_g)/c} f(z/c - t - a(1/c) - 1/v_g) & (z > a) \end{cases} \quad (2.1.27)$$

傅利葉分析告訴我們，脈衝波可以由很多頻率的單頻波所組成，而且當各個波的

相位皆為零時 $E(z,t)$ 便可出現最大值，也就是脈衝的頂峰出現的時空，所以當我們考慮一個脈衝在 $z < 0$ 的區域，如圖 2.1.2 脈衝頂峰出現在 $z=ct$ 時，其脈衝在真空中的群速度為 c 。

單頻的電磁波在非異常色散物質中傳播的特性可以先由(2.23)式來看，在(2.23)式中與頻率無關的相位為 $\omega_0 z(n_0/c - 1/v_g)$ 不會讓不同頻率的波產生相位差，而與頻率有關的相位為 $\omega(z/v_g - t)$ ，因此如果每個波中與頻率有關的相位接為零時，便會出現脈衝。所以我們可以在物質中發現脈衝，而脈衝會根據 $z=v_g t$ 來傳播，但是因為這個波段的物質是呈現異常色散的特性，也就是長波長的波會變短，短波長的波會變長，所以有機會在物質中出現脈衝，而且其群速度為 $-c/2$ ，所以我們會看到脈衝往回跑的現象。我們可以用類似的方法來討論(2.1.24)式，當電磁波經過物質後的情形，此時脈衝波會根據 $z=ct+a(1/c-1/v_g)$ 方式傳播，如果是經過正常色散物質，即 $0 < v_g < c$ 的話， z 一定會小於零，就不會出現脈衝超前的現象，所以當經過異常色散物質，即 $v_g < 0$ ，就會出現超前的脈衝波。所以就像圖 2.1.3 所示，在同一個時刻內可以看到三個脈衝頂峰一起出現。而在我們實驗的情況下，應該只會同時出現兩個脈衝波，因為 OLED 樣品厚度遠小於我們使用的微波波波長，所以在樣品中應該是不會出現脈衝波，只會出現兩個脈衝波。

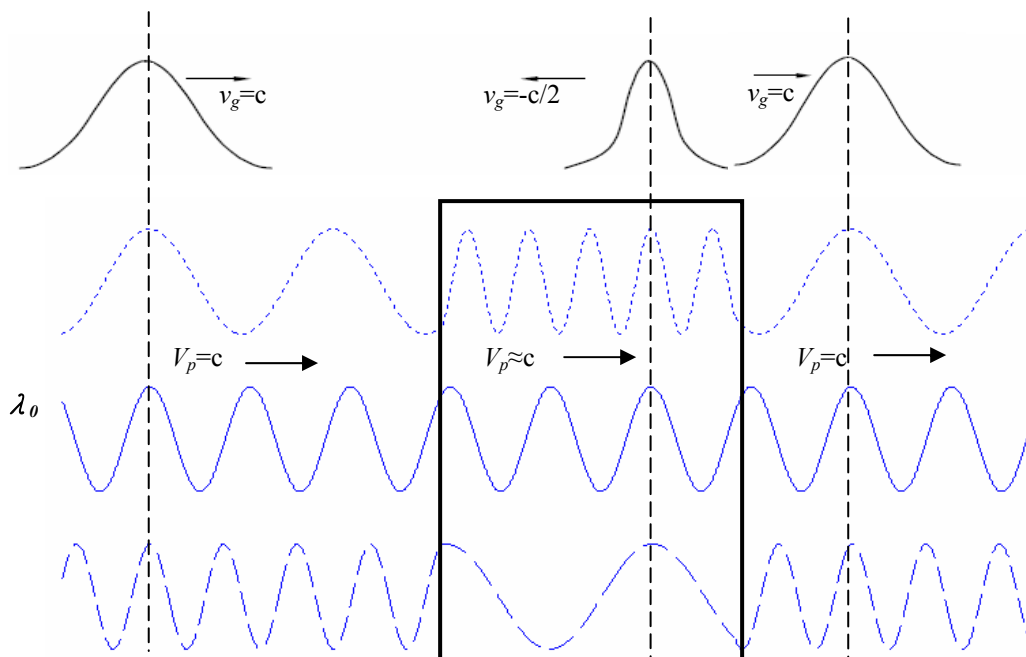


圖 2.1.3 某一個時刻脈衝在負數群速度物質附近的傳播圖，這邊用三種頻率的平面波來解釋脈衝的傳播現象。脈衝波的中心頻率為 λ_0 在圖中由實線弦波所表示，點線弦波表示在真空中波長較長的波，虛線弦波為波長較短的波，這邊的物質的色散特性在 λ_0 附近是呈現異常色散的特性，且我們假設物質只對電磁波造成相位上的改變。進入物質之後，中心波長的波不變，波長長的變短，波長短的變長，因此當脈衝波還未進入物質時，因為三個頻率的波的相位都剛好都為零，可以看到兩個脈衝波，一個是已經離開物質了，其傳播速度為 $v_g = c$ ，一個是還在物質內傳播，其傳播速度為 $v_g = -c/2$ ，而實際上三個頻率平面波在物質中傳播的相速度皆是近似光速，所以並沒有違反相對論，介質中光速小於 c 的假設。

2-1-4 實驗分析方法

本論文中，我們觀察到 OLED 在的微波波段的脈衝響應出現超前的現象，而我們所用的量測儀器為網路分析儀，可以量測到穿透頻譜與相位頻譜，我們可以從穿透頻譜與相位頻譜看出異常色散特性發生的頻段，其中相位頻譜可以藉由平面波傳遞的相位公式(2.1.28)，推導出折射率與頻率的關係(2.1.29)式，

$$\Delta\phi = kz - \omega t = \frac{z}{c} \omega(n(\omega) - 1) \quad (2.1.28)$$

$$n(\omega) = \frac{\Delta\phi c}{z\omega} + 1 \quad (2.1.29)$$

其中 z 為樣品厚度， $\Delta\phi$ 為相位延遲。有了折射率的頻譜，我們便可從頻譜圖上計算出 $dn/d\omega$ ，進而由(2.1.7)式算出 n_g 的值跟實驗得到的等效群速度折射率作比較，除了頻域的量測，再經由網路分析儀的時域轉換功能來觀測 OLED 樣品的脈衝響應，由此可以量測到脈衝超前與延遲的量由光程差的公式(2.1.30)式，計算出脈衝等效的群速度折射率，進而我們也可以由群速度算出脈衝的群速度，如(2.1.31)

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{(n_g - 1)L}{c} \\ \Rightarrow n_g &= \frac{c\Delta t}{L} + 1 \end{aligned} \quad (2.1.30)$$

$$v_g = \frac{c}{n_g} \quad (2.1.31)$$

根據這幾個參數的量測，我們就可以大致上瞭解 OLED 在微波波段的異常色散現象所造成的脈衝超前的情形。

2-2 OLED 模型化與參數粹取

爲了找到 OLED 樣品的可靠度測試的有效方法，我們必須也要找到某些參數是與 OLED 發光特性好壞有非常緊密的關係，甚至能夠預測出 OLED 的壽命，所以我們從 OLED 基本的電路模型著手，企圖找到與這些關係。在本論文中我們利用 DC 與 AC 小訊號調變，找出 OLED 的電路模型之參數，進一步地分析這些參數來找出與 OLED 的發光特性與壽命之間的關係。

2-2-1 OLED 發光機制簡介



(1) 順向偏壓

當外加順向偏壓時，能帶圖會被拉斜，如圖 2.2.1 (a)，增加電子與電洞躍過介面位障的機率，故電子與電洞便可以穿透到有機層，增加順向偏壓可以增加流過有機層之電流。通過有機層的電流大致可分爲三種：(1) 傳導電流(Conduction current) (2) 位移電流(Displacement current) (3) 陷阱電流 Trapping current [10]。

(1)傳導電流：電洞在注入 ETL 層中後，會與由陰極注入之電子產生復合 (recombination)，並發出光，這種電流稱之 conduction current，且正比於發光強度。

(2)位移電流：若是過多的電洞注入 HTL，沒有足夠的電子與之復合，則這些電洞將在電場的驅動下直接進入陰極成爲 displacement current。

(3)陷阱電流：在 ETL 層中靠近傳導帶的部分會產生許多陷阱，這些陷阱會捕捉進入的電子，這些電子稱之為陷阱電流。

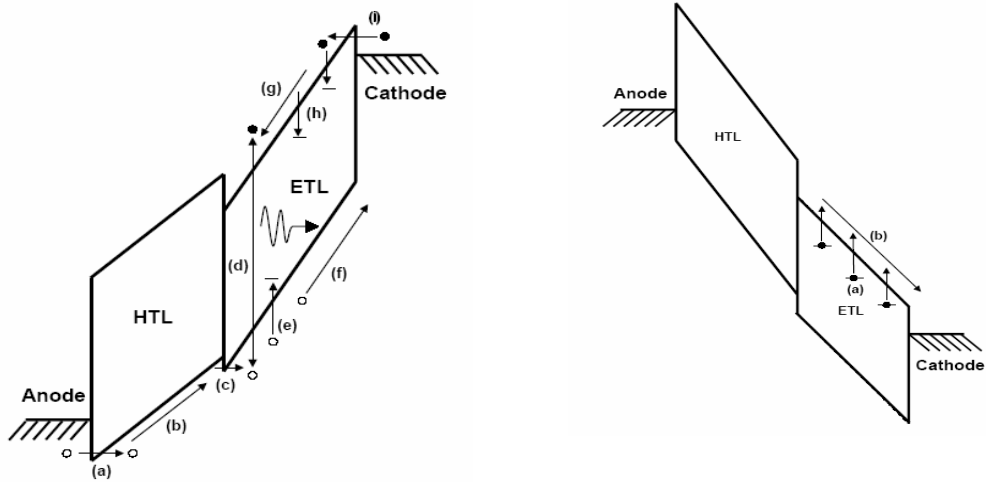


圖 2.2.1(a) OLED 順向偏壓能帶圖。[10] 圖 2.2.1 (b) OLED 反向偏壓能帶圖。[10]

(2)反向偏壓



當加負偏壓時，energy band 傾斜方向改變如圖 2.2.1 (b)，在這情況下原本被陷阱束縛住的電子，可以藉此脫離有機層，回到陰極板中。雖然說加反向偏壓不會讓元件發光，但是卻能夠改善 OLED 的老化情形 [4, 24]，因為當在操作 OLED 時，如果只降到 0V 的話，有一些電荷會因為被陷阱所困而留在元件中，而留下的電荷可能會對有機層結構造成破壞，所以如果在操作時，如果使用交流操作，應該可以提升使用壽命。

2-2-2 直流訊號測試

直流測試主要是量測亮度與電流隨著電壓的變化情形，即B-I-V量測，而從B-I-V量測的結果中，可以反映出基本的亮度與所需的電壓，且可以定義出臨界

電壓。定義臨界電壓的方法大概有三種方法：(1) 當量測到的一個臨界亮度值時(例如： 0.1 cd/m^2)，所對應的電壓值，(2) 當量測到一個臨界電流時(例如： 1 mA/cm^2)，所對應的電壓值，(3) 利用所得到的B-V圖和I-V圖，從線性區作切線交於橫軸的電壓值為臨界電壓，(4) 利用TCL的(1.1.1)式電流密度與電壓的關係，給定 I 來擬合量測曲線，外差求得臨界電壓。這三種方法中以第一種方法比較好，因為定出臨界亮度會與實際上應用比較能搭配，但是必須要有經過校正的光偵測器，在本論文中並沒有使用校正過的光偵測器，所以並沒有用這個方法來找臨界電壓。第二種方法則是假設OLED的發光亮度與電流成正比，所以給定一特定臨界電流來定義出臨界電壓，但是亮度與電流的關係會因為樣品老化的關係而改變。第三種方法，B-V曲線和I-V曲線中的線性區與OLED中的串聯電阻關連性很大，因此線性外差的方法比較不能反映出OLED的發光機制。第四種方法較複雜且給定的 I 必須很準確。所以為了簡化起見，我們第二種方法用臨界電流來定義臨界電壓。



2-2-3 等效電路模型與交流訊號量測

在 OLED 的基本電路模型中，我們嘗試用兩種方法，一種是從小訊號模型的方法，一種是使用簡化的 OLED 電路模型。這兩種方法首先都是要把參數模型參數粹取出來，然後再找出會隨著 OLED 老化而跟著變動的參數，或進一步說明其中的物理機制。

2-2-3-1 小訊號電路模型

最基本小訊號的小訊號電路模型可以用一個 RC 電路來作為模型 [20]，因此我們可以用輸入小訊號電壓測試 OLED 的頻率響應，並且把 RC 電路參數粹取出來。

圖 2.2.2 為 OLED 的小訊號的等效模型，由一組並聯的 R_p 、 C_p 與 R_s 串聯組成。圖 2.2.3 為 OLED 的交流量測示意圖，這我們的實驗中，除了改變輸入的小訊號頻率之外，也改變的直流偏壓觀察對 OLED 的電壓與相位響應。從電壓與相位的響應可以求得 OLED 整體的阻抗(Z):

$$Z = \frac{V_{\text{output}}}{V_{\text{input}}} \times \exp(i\theta) \quad (2.2.1)$$

其中 V_{output} 為 OLED 上的跨壓， $V_{\text{input}} = 100\text{mV}$ ， θ 為跨壓的相位，若從導納的觀點即 2.2.2 式：

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB = G + j\omega C \quad (2.2.2)$$

可以求得電導與電容的頻率響應，其中 Y 為導納， Z 為組抗， G 為電導， B 為電納， C 為電容， ω 為角頻率。從 2.2.2 式得到的是 OLED 整體的電容與電導，再藉由不同條件可以把小訊號電路模型中的參數粹取出來：

1. 直流量測：

當 OLED 操作在直流下，電容 C_p 可視為開路，OLED 的等效電路便成為 R_s 與 R_p 串聯，而 R_s 為有機層與陽極的接觸電阻遠小於 OLED 有機層的電阻，所以可以利用 OLED 電壓與電流之比求得 R_p 。

2. 交流量測：

當 OLED 操作在高頻時，大部分的電流會經過 C_p ，所以 OLED 的等效電路即為 R_s 與 C_p 的串聯。因此可以利用整體阻抗 Z 轉換求得 R_s 與 C_p ，阻抗 Z 中的實部即為 R_s 與虛部除於角頻率後就是 R_p 。

所以利用直流與交流量測便可把小訊號電路模型參數粹取出來，再將這幾個參數

帶入 PSPICE 電路模擬軟體，比較從實驗量測到 OLED 上的跨壓的振幅及相位頻譜，驗證經由試驗粹取出來模型的模型參數之可靠性。進一步可以將這些參數與 OLED 的發光特性連結起來。

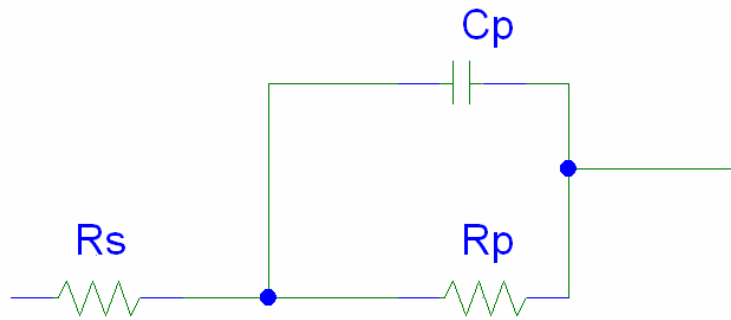


圖 2.2.2 OLED 小訊號的等效電路模型。Rs 為等效於 OLED 兩極與有機層間的電阻。Rp 為 OLED 有機層的電阻。Cp 為 OLED 有機層的電容。

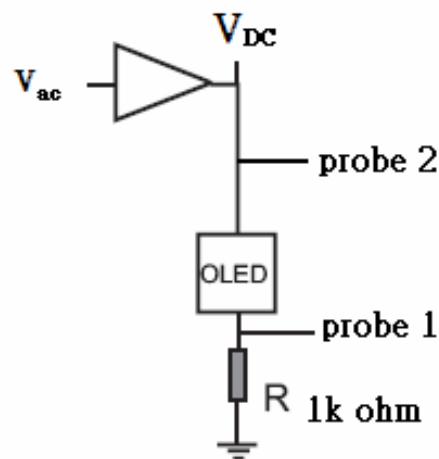


圖 2.2.3 OLED 交流量測示意圖。

2-2-3-2 簡化的 OLED 電路模型與陷阱分析

2-2-3-1 節是把 OLED 視為被動元件，從小訊號模型的角度來分析 OLED 的電特性，而本節是將 OLED 有機層的結構來看，最主要是 ETL 與 HTL 兩層，所以可以把 OLED 這兩層看成是兩個電容的串聯，如圖 2.2.4。[10]

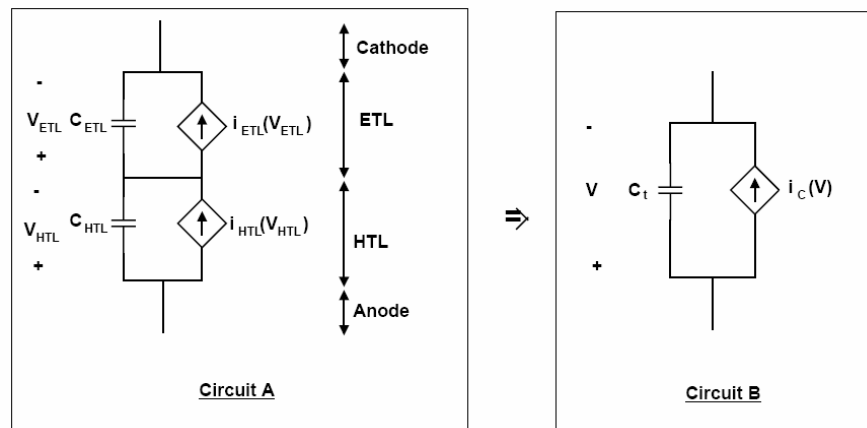


圖 2.2.4 ETL 與 HTL 等效電路模型，Circuit A 是把 OLED 看成是由 C_{ETL} 與 C_{HTL} 的電容與電流源 $i_{ETL}(v_{ETL})$ 與 $i_{HTL}(v_{HTL})$ 的並聯所組成，Circuit B 則是將兩個電容等效為一個電容 C_t 與電流源來表示。[10]

在等效電路模型中，可以將 ETL 與 HTL 以等效電容與電流源來表示，同時也可以將兩層有機層再簡化至一層並聯電路。整體的電流可以表示為 2.2.3 式：

$$i(v) = C_{ETL} \frac{dv_{ETL}}{dt} + i_{ETL}(v_{ETL}) = C_{HTL} \frac{dv_{HTL}}{dt} + i_{HTL}(v_{HTL}) = C_t \frac{dv}{dt} + i_c(v) \quad (2.2.3)$$

因為 Circuit A 與 Circuit B 為相等的，所以 $i_c(v)$ 也可表示成 2.2.4 式：

$$i_c(v) = \frac{C_{ETL}}{C_{HTL} + C_{ETL}} i_{HTL}(v_{HTL}) + \frac{C_{HTL}}{C_{HTL} + C_{ETL}} i_{ETL}(v_{ETL}) \quad (2.2.4)$$

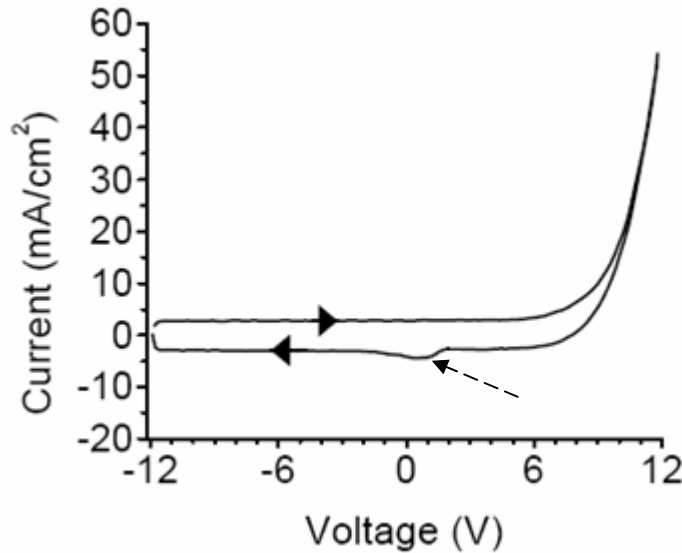


圖 2.2.5 $i(t) - v(t)$ 交流訊號曲線，往右的箭頭是表示當電壓從 -12 V 到 12 V，往左的箭頭是從 12 V 到 -12 V。[10]

圖 2.2.5 為暫態電壓對電流的圖，在圖中虛線箭頭所指的位置是 OLED 當電壓下降到接近 0V 時會出現突起的反向電流，同樣也會反映在 OLED 發光上 [25]，而在我們的實驗中也有觀察到突起的發光，但是在電流上可能因為實驗的精確度的關係並沒有量測到，詳細的結果會在第五章中說明。除了暫態電流-電壓曲線外，從亮度與電流的曲線也可以獲得一些重要的參數，如圖 2.2.6 為交流與直流亮度-電流的曲線比較，直流與交流量測曲線會錯開，當電壓上升時會與直流曲線有 i_{Offset}^+ ，電壓下降時會有 i_{Offset}^- ，假設 OLED 發光亮度是與 $i_c(v)$ 成正比，那麼交流訊號產生的偏移量應該是電容效應所造成的。當電壓上升時，電洞很容易地就可以進入 HTL 層，所以電容效應主要是在 ETL 層，若是當電壓開始下降的時候，電洞因為已經被累積在 HTL 與 ETL 的介面，而外加的正偏壓又減小了，這會使得電洞注入率變小，因此整體看來電子與電洞注入差不多會平衡，即

$i_{ETL} = i_{HTL}$ ，可得 $C_{ETL} \frac{dv_{ETL}}{dt} = C_{HTL} \frac{dv_{HTL}}{dt} = C_i \frac{dv}{dt}$ ，所以在電壓下降時為整體的電

容效應，因此可以由 i_{Offset}^+ 與 i_{Offset}^- 求得電容參數：

$$C_{ETL} = \frac{i_{\text{Offset}}^+}{\left. \frac{dv}{dt} \right|_{+Ramp}} \quad (2.2.5)$$

$$C_t = \frac{i_{\text{Offset}}^-}{\left. \frac{dv}{dt} \right|_{-Ramp}} \quad (2.2.6)$$

$$1/C_{HTL} = 1/C_t - 1/C_{ETL} \quad (2.2.7)$$

但是要能粹取這些參數必須要以下的條件：(1) $b(t)$ 要正比於 $i_{ETL}^c(t)$ ，(2) $i_{ETL}^t(t)$ 可以被忽略，(3) 正升壓的部分，HTL 可以被視為電阻，ETL 為電容，(4) 降壓的部分， $i_{ETL} \approx i_{HTL}$ 才能使得 $C_{ETL} \frac{dv_{ETL}}{dt} \approx C_{HTL} \frac{dv_{HTL}}{dt} \approx C_t \frac{dv}{dt}$ 。

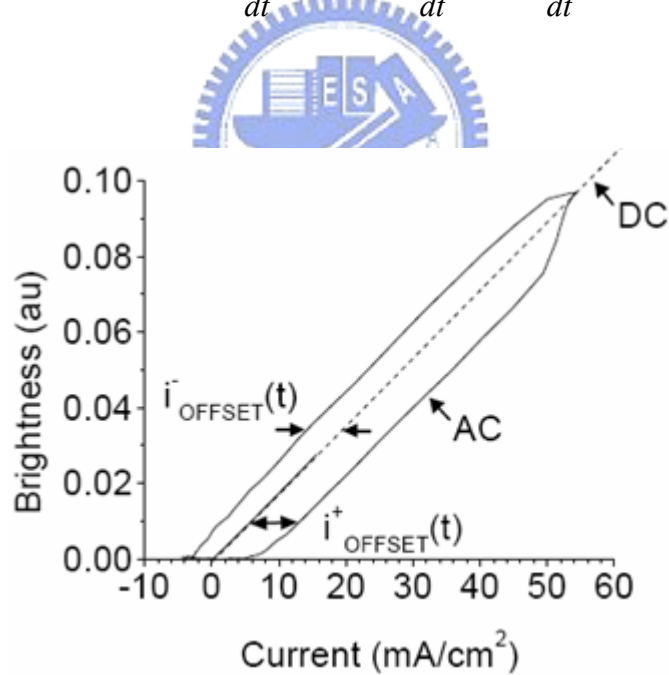


圖 2.2.6 $b(t) - i(t)$ 與 B-I 的交流與直流曲線，虛線為直流曲線，虛線下面的直線為電壓上升時的 $b-i$ 曲線，虛線上面為電壓下降時的 $b-i$ 曲線。[10]

雖然說這個等效電路模型並沒辦法表現出，陷阱束縛的效應，但是我們可以從梯形波的交流訊號中時間軸上電流響應估算出來 [10]，因為在加入正電壓的時候，部分電子電洞會被陷阱束縛住，而這些被束縛住的而這些被束縛住的電子電洞，有些能夠被再釋放出來，有些則不會，所以若加負電壓應該是可以把大部分被束縛的電子電洞拉回來，圖 2.2.7 為 $v(t)$ 、 $i(t)$ 與 $b(t)$ 在時間軸上的曲線。我們可以定義出當下降電壓到達臨界電壓時為 t_1 ，經過最底端的負電壓後，上升電壓到達臨界壓時為 t_2 ，經過最頂端的正電壓後，下降電壓到達臨界電壓時為 t_3 。因此脫離陷阱的電荷 $Q_{\text{detrapped}}$ 可以估計為：

$$Q_{\text{detrapped}} = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (2.2.9)$$

其中位移電流在上升電壓與下降電壓的過程中被抵銷掉了，主要為從陷阱中脫離的載子，當 t_2 到達 t_3 的過程中的外加電壓已經都達於臨界電壓，所以若是對 $i(t)$ 積分從 t_2 到 t_3 ，可以得到 $Q_{\text{transferred}}$ ，主要的貢獻為傳導電流 $i_c(t)$ 。

$$Q_{\text{transferred}} = \int_{t_2}^{t_3} i(t) dt \quad (2.2.10)$$

因此藉由這個方法，我們可以大致估算出在 OLED 中陷阱的多寡，進而分析與使用壽命上的關連。

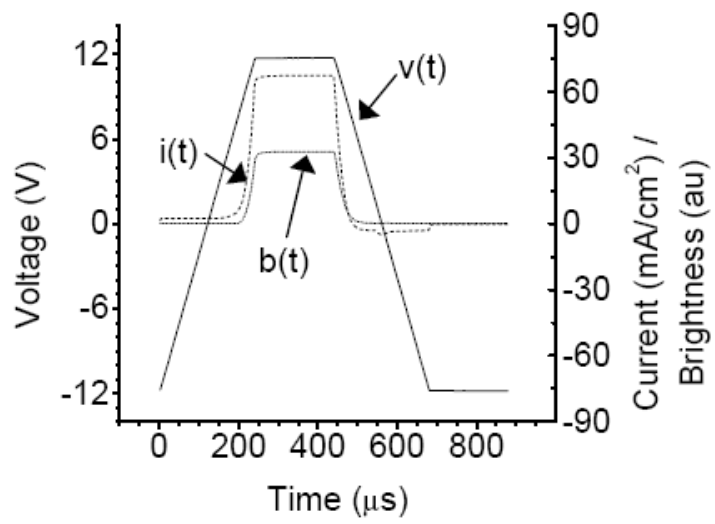


圖 2.2.7 $v(t)$ 、 $i(t)$ 與 $b(t)$ 對時間的曲線， $v(t)$ 為外加的梯形電壓波。[10]



第三章 微波響應量測

微波量測原本目的也是要從擷取基本微波電路參數，如電阻、電容、電感所組成的電路模型，找出與OLED發光特性或是生命週期之關連。而在作OLED模型化這之前，我們用一組SMA接頭作為天線與一組拇指形微波天線與向量網路分析儀量測OLED在自由空間下的穿透係數，即 S_{21} 參數 [25]，其定義是指Port 2接收端的電壓與Port 1發射端的電壓比，並藉由向量網路分析儀來量測出頻譜與脈衝響應。在這裡我們將根據不同的適用性而使用不同的天線，來觀察OLED樣品的微波特性。除了自由空間的量測之外，我們也嘗試將微波導入OLED樣品的電路中量測 S_{21} 參數，觀察是否能藉此量測方法比較出OLED樣品的好壞。

3-1 OLED 樣品



我們所用的 OLED 樣品是由工研院材料所提供的，其樣本結構是底射型 (bottom-emitting) OLED 主要是由電極與幾層有機層所組成，如下圖所示。

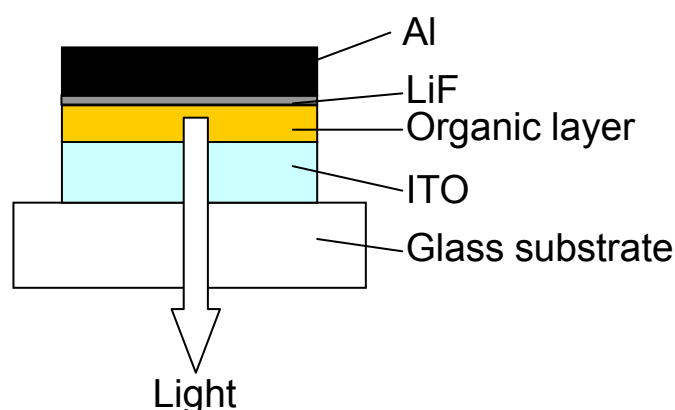


圖 3.1.1 OLED 樣品基本結構。

圖 3.1.1 中的 organic layer 大致上包含 electron injection layer、organic emitter layer、hole transport layer 三層，其中的差異會根據，發光的顏色而有所不同。而

基板上會覆蓋一玻璃封裝蓋，基板與封裝蓋之間用 UV 硬化膠環繞四周封住，玻璃基板加上玻璃封裝蓋的厚度大約是 1.5 mm，不包含玻璃基板與封裝蓋的厚度大約是 350 nm。在我們的實驗中，用到發藍色、綠色、白色的三種 OLED。的表 3.1 是這三種發光顏色 OLED 樣品的代號與詳細組成，圖 3.1.2 是發藍色光的 OLED 樣品的照片，照片中框框指的是 OLED 發光的區域，一個 OLED 樣品玻璃基板為 5 cm × 5cm 大小，且有四個發光區域，兩個是大的發光區域，大小約是 6 mm × 5 mm，編號為 BL1、BL2；兩個小的發光區域，大小約是 4 mm × 3mm，編號為 BS1、BS2，其他顏色的 OLED 樣品也是一同樣的方法來編號。圖中斜線區域與相對應的左邊的位置是陽極的接觸區，為透明電極(ITO)所構成，另外四個金屬色澤的角是鍍上一層鋁的陰極接觸區，其他發光色的 OLED 樣品的組成也如圖 3.1.2。除了 OLED 的樣品之外，為了驗證我們發現到異常傳播特性，所以也對透明電極(ITO)與有機發光層(Organic emitter layer)作相關的研究，在這邊我們討論的有機發光層是採用 DPVBi:DSA，為藍色發光層。圖 3.1.3(a) 與圖 3.1.3(b) 分別為透明電極與藍色發光層樣品的照片。

表 3.1 三種發光顏色 OLED 的組成。

| 發光顏色 | 代號 | 組成 |
|------------|----|--|
| Blue OLED | BL | Glass / ITO / NPB / DPVBi:DSA / BCP / AlQ / LiF / Al |
| Green OLED | GL | Glass / ITO / NPB / AlQ:C545T / AlQ / LiF/ Al |
| White OLED | WL | Glass / ITO / NPB / DPVBi:Perylene / DPVBi:Ru / AlQ / LiF / Al |

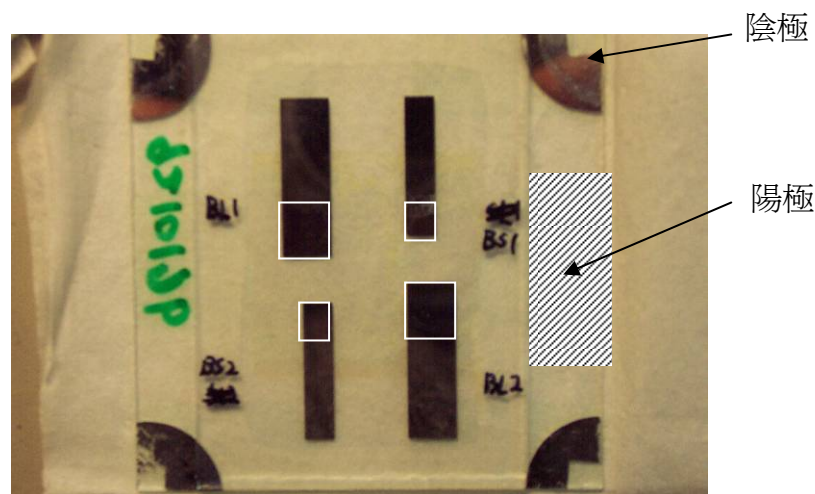


圖 3.1.2 OLED 實際樣品照片。

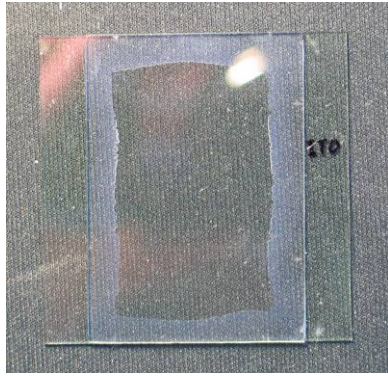


圖 3.1.3 (a) 透明電極樣品照片。
樣品基板皆鍍上透明電極。

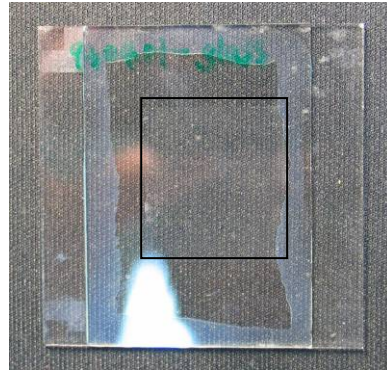


圖 3.1.3 (b) 有機發光層樣品照片。
框框內為鍍有發光層的區域。

3-2 實驗設備與裝置

在 OLED 自由空間的量測中，用到兩種天線，分別是 SMA 接頭(2 Hole Flange Jack Receptacle) [附錄 A]與 Herley 845CX-10 拇指形天線 [附錄 B]，SMA 接頭一般是用在微波電路上的連結，這邊採用的原因主要是因為 OLED 樣品的發光區比較小，所以需要採用大小較為匹配的天線，而這種 SMA 接頭前端金屬管的像是一個單極的發射源，它的長度為 5 mm，故採用它來作為發射端與接收端的天線，圖 3.2.1(a)為 SMA 接頭的照片。除了 SMA 接頭外，我們也嘗試使用拇指形天線作量測，拇指形天線的寬度稍大於 SMA 為 10 mm，但是它的發射場型比 SMA 來的平滑且較具有指向性，故採用它作為實驗的驗證，圖 3.2.1(b) 為拇指形天線的照片，另外，在天線後端的量測儀器上，我們使用的向量網路分析儀的型號為 HP 8720D，量測頻寬從 50 MHz 到 20.05GHz，負責微波參數的量測與轉換。



圖 3.2.1 (a) SMA 接頭照片。



圖 3.2.1(b) 拇指形天線的照片。

3-3 以 SMA 天線量測樣品在自由空間下的微波響應

在OLED的量測前，我們必須要先得到SMA天線與拇指形天線的基本特性，首先將SMA天線的發射端與接收端相距 7 cm，且這兩個SMA接頭的凸緣形成一直線。量測結果如圖 3.3.1(a) 所示，我們可以從 S_{21} 頻譜發現到SMA接頭工作在小於 10 GHz的效率明顯不高，尤其是在小於 6 GHz時會呈現不穩定的現象，因此SMA天線較良好的工作範圍是從 10 GHz到 20.05 GHz。SMA天線在空間中的量測效率，可以從角度分佈的場型圖看出，圖 3.3.1(b)為發射端與接收端的距離為 27 cm，且工作頻率為 13GHz角度分佈的場型圖，在這邊我們使用線性座標來表示，當角度為 0 度時為標準，從此圖我們可發現空間中的分佈也比較不均勻，可能是因為SMA接頭的金屬管部分並不是完全對稱的，他有一個小缺口所致。

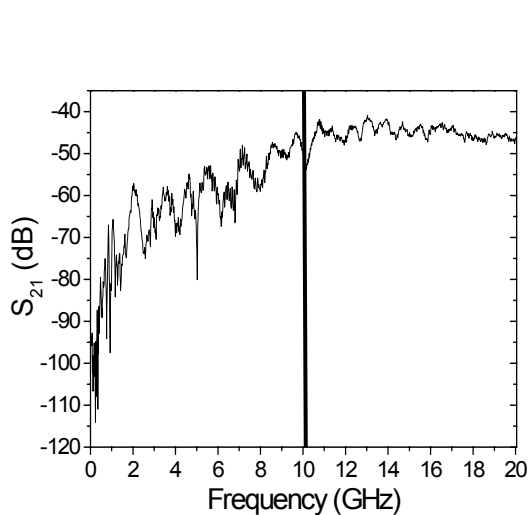


圖 3.3.1 (a) SMA天線 S_{21} 頻譜圖。

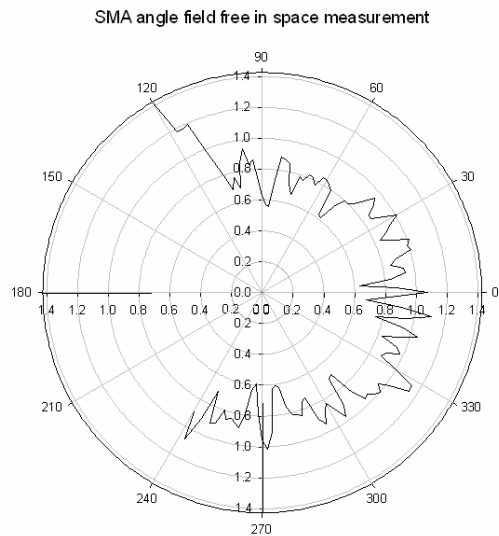


圖 3.3.1 (b) SMA 角度分佈的場型圖。

OLED樣本的量測的架設方式，主要就如圖 3.3.2 的裝置示意圖，圖 3.3.3 為實驗架設照片。將OLED樣品其中一個發光區正對著SMA天線金屬管的位置，因為SMA天線的傳波能力不是很好，所以將OLED樣品與發射端靠得比較近，約相距 2 mm，發射端與接收端相距 7cm。量測的流程是先將未放OLED所量測到 S_{21} 頻譜作為基準，也就是把所有的頻率的 S_{21} 參數校正到 0 dB，再將 OLED

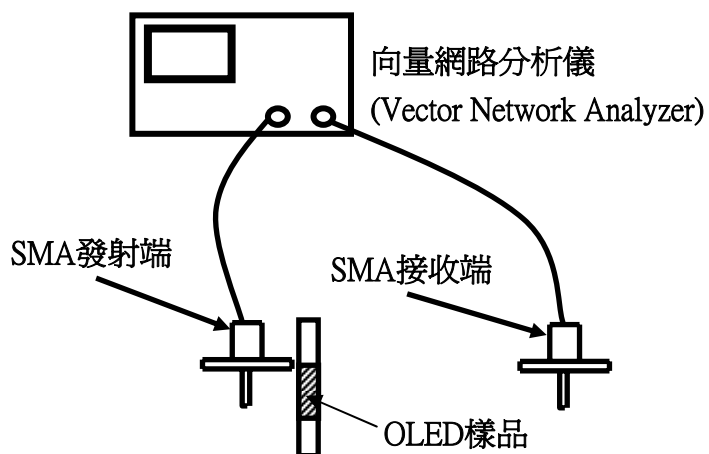


圖 3.3.2 OLED 微波量測示意圖。

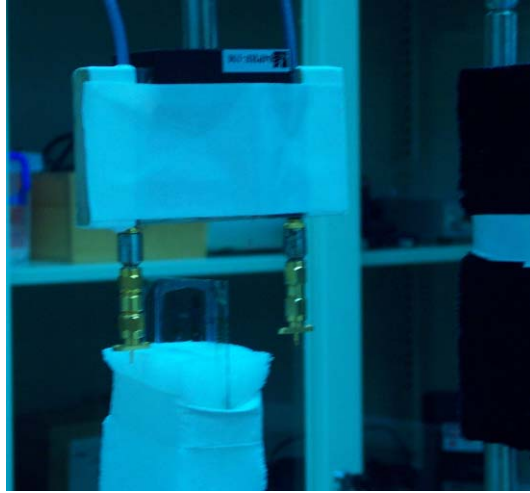


圖 3.3.3 微波量測實驗架設照片。

放置到預定的位置，便可以得到一個標準化後的 S_{21} 頻譜，範圍從 10 GHz到 20.05 GHz。圖 3.3.4 為藍、綠、白三種色光的OLED樣品與FR4(常用於微波電路板中的夾層材料，對微波的吸收甚少)之 S_{21} 頻譜，從OLED的頻譜反映出幾個訊息，第一個是在 11 GHz、14 GHz與 16 GHz的頻段都出現較寬的吸收譜。第二個是藍、綠、白三種色光與不同大小的發光區間的頻譜差異並不大，這個結果顯示出高頻微波無法分辨出不同組成的OLED，因此對OLED檢測上可能就沒有太多的突破。第三個是在大於 17 GHz的時候 S_{21} 頻譜也有較密集吸收譜的出現，但是比較不穩定所以這邊就沒有繼續討論。

第一個訊息反映出在某幾個頻段出現比較寬的吸收譜，這幾個頻率點有可能是 OLED 的共振頻率，而根據第二章的理論推導，當出現吸收頻譜時，發射一個脈衝包含相對應的頻譜的頻率，便有機會使脈衝的群速度出現超光速或負值，為了證明這點我們使用 HP 8720D 向量網路分析儀的轉換功能，將訊號轉成脈衝響應來看 OLED 樣品的時域響應是否會出現超光速或是負值的群速度。

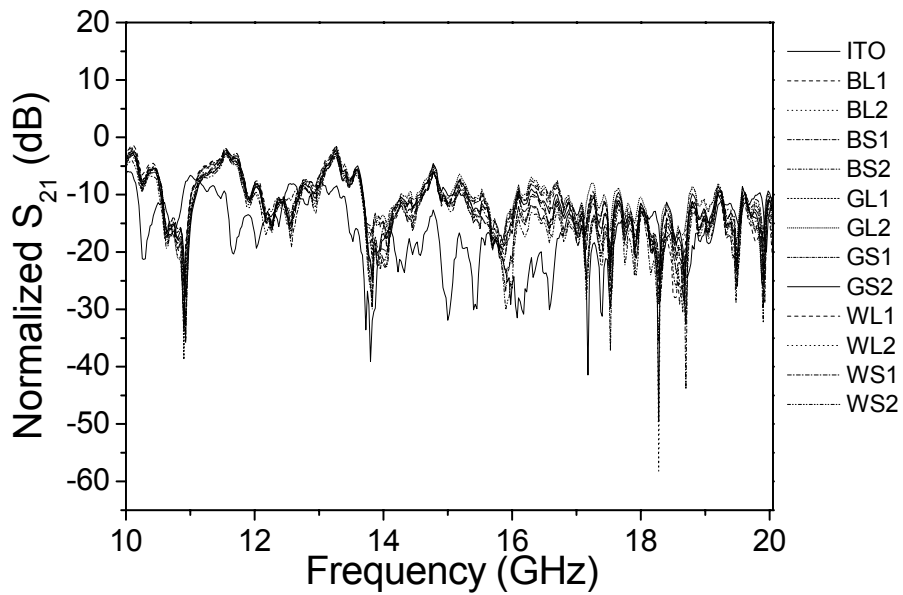


圖 3.3.4 藍、綠、白三種色光的OLED與ITO之 S_{21} 頻譜。

我們先觀察 14 GHz附近的大發光區OLED樣品的吸收譜與脈衝響應。圖 3.3.5 為藍光OLED從 13.35 GHz到 14.85 GHz S_{21} 參數的吸收譜，因此將此凹陷的頻段轉換成脈衝響應。圖 3.3.6 為其相對應的脈衝響應，其中包括參考脈衝訊號與藍光OLED的脈衝訊號。這邊參考脈衝訊號指的是未放有樣品，而在接收端收到脈衝尖端時為時間零點。所以我們可以看到脈衝經過藍光OLED被分成兩個部分，且左邊的脈衝尖峰比參考脈衝訊號還早到達接收端。

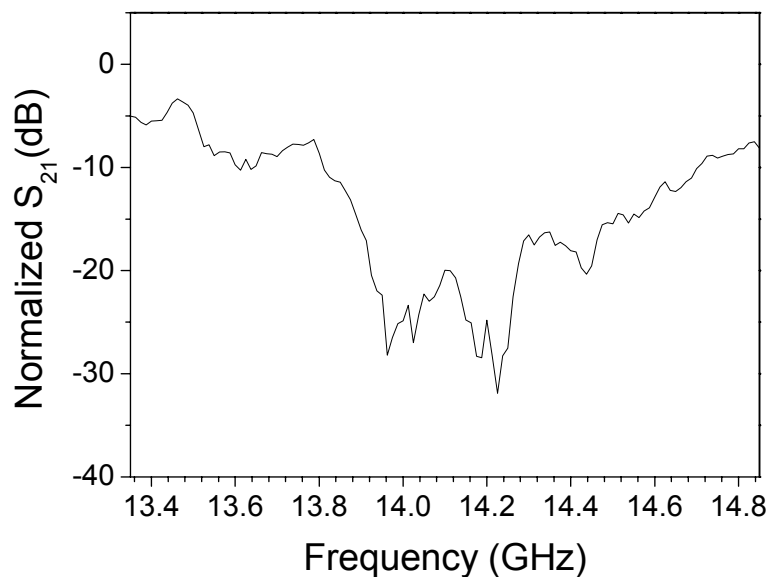


圖 3.3.5 藍光OLED 13.35GHz到 14.85GHz之 S_{21} 頻譜。

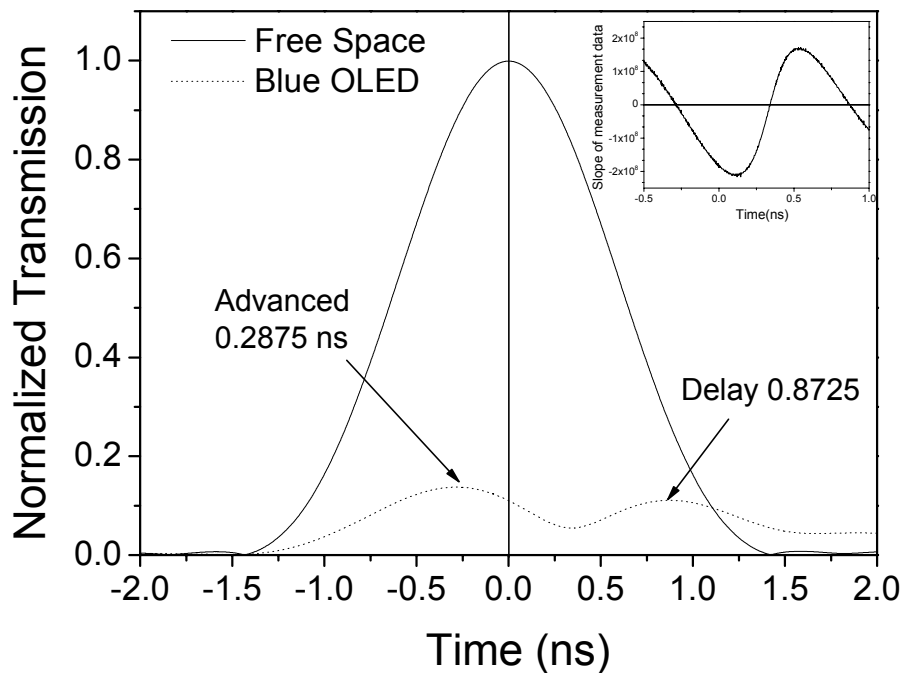


圖 3.3.6 藍光 OLED 脈衝響應。實線部分為參考脈衝訊號，這是當沒有放置樣品時所量得的訊號。點線為藍光 OLED 的脈衝響應，左邊的脈衝超前了 0.2875 ns，右邊的脈衝延遲了 0.8763 ns。內圖為藍光 OLED 脈衝響應的斜率圖用來找脈衝響應峰值。



從脈衝延遲或是超前的量，我們可以利用光程差的公式(2.1.30)式將等效的折射率計算出來，其中 Δt 為脈衝尖峰與時間零點的差， L 為樣品的厚度， n 為折射率， c 為光速。在這邊樣品的厚度，玻璃就佔了幾乎全部了，但是因為玻璃在微波波段幾乎是透明的，在這邊只考慮 OLED 有機層與電極的厚度為，藍光 OLED 的厚度為 354 nm。而延遲脈衝波的延遲量為 0.8725 ns，便可以得到一個等效的群速度折射率 7.39×10^5 ，超前脈衝的超前量為 0.2875 ns，等效折射率為 -2.42×10^5 。從這些數據可以發現 OLED 樣品在吸收譜的波段的脈衝，會看到等效的負數折射率效果，而且出現的折射率值也是遠大於一般的介電物質。進一步地我們也可以由等效折射率算出脈衝在 OLED 傳播時的群速度，延遲脈衝為 405.7 m/s，而超前的脈衝為 -1239.7 m/s，所以說脈衝的群速度在 OLED 樣品中變慢 5 到 6 個數量級。同樣地我們也可以量測綠光 OLED 的脈衝響應，圖 3.3.7

從 13.5 GHz到 14.2 GHz的 S_{21} 吸收頻譜，圖 3.3.8 為相對應頻譜的脈衝響應，其中脈衝超前了 0.3799 ns，延遲部分為 2.274 ns，不過在這邊延遲部分的強度遠小於超前部分，而綠光OLED的樣品厚度為 350.5 nm，因此我們可算出其等效的群速度折射率與脈衝的群速度，超前部分的群速度折射率與群速度分別為 -3.25×10^5 與 -922.61 m/s，延遲部分為 1.95×10^6 與 154.13 m/s。

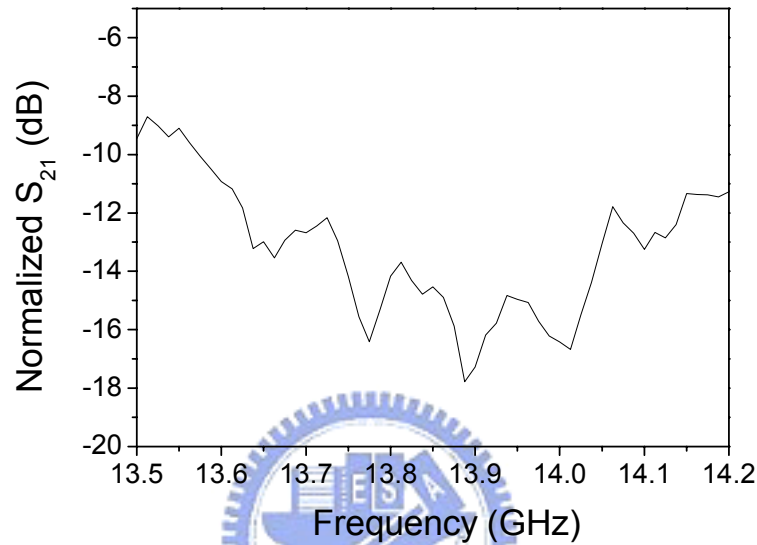


圖 3.3.7 綠光OLED 13.5 GHz到 14.2 GHz的 S_{21} 吸收頻譜

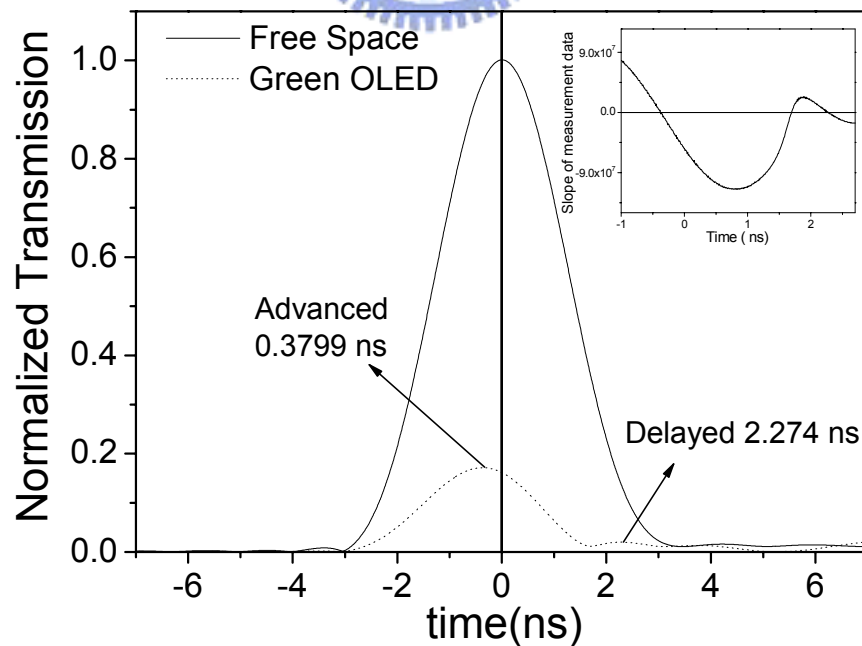


圖 3.3.8 為綠光 OLED 的脈衝響應，脈衝超前了 0.3799 ns，延遲部分為 2.274 ns。內圖為綠光 OLED 脈衝響應的斜率圖用來找脈衝響應峰值。

我們也對白光OLED的 14GHz附近的頻譜作研究，圖 3.3.9 是白光OLED從 13.5 GHz到 14.5 GHz的頻譜，圖 3.3.10 為白光OLED的脈衝響應，脈衝響應所對應的範圍為 13.5 GHz到 14.5 GHz。首先我們可以發現到白光OLED會出現脈衝被分離的現象，延遲部分為 1.7230 ns，超前部分為 0.1857 ns。白光OLED不包含玻璃的厚度為 355.8 nm，因此轉成等效折射率時，分別為 1.45×10^6 ，與 -1.57×10^5 ，而延遲脈衝的群速度為約 206.9 m/s，超前脈衝的群速度為約 -1910.8 m/s。如果若將OLED點亮可以發現到點亮與未點亮OLED的脈衝響應是幾乎是沒有差別的，如圖 3.3.11，顯示OLED發光的特性無法藉由高頻微波量測分辨出來。從圖 3.3.3 可以看出ITO從 10 GHz到 20.05 GHz的 S_{21} 頻譜與OLED樣品差別不大，且在 14 GHz的吸收頻譜也會出現脈衝超前的現象，所以我們認為ITO特性應該是影響OLED樣品微波響應的重要因素，因此我們也針對ITO作相同量測，圖 3.3.12 與圖 3.3.13 分別為透明電極(ITO)的 S_{21} 吸收頻譜與從 13.5 GHz到 14.5 GHz相對應的脈衝響應，延遲部分為 1.730 ns，超前部分為 0.2243 ns，ITO的樣品厚度為 150 nm，所以可轉換為等效折射率分別為 3.46×10^6 與 -4.49×10^5 ，群速度則分別為 86.7 m/s 與 -668.7 m/s，接著我們比較這三色OLED與ITO的脈衝響應，可以發現都有超前的訊號，但是在延遲脈衝上，綠光OLED的強度小很多。這可能是因為接收端與樣品產生的反射波所致，因為OLED上有金屬與ITO，雖然小於微波的及膚深度，但應該還是會產生部分反射，加上SMA接頭為金屬，因此反射的問題會比較嚴重而產生延遲訊號，加上藍色發光層樣品的面積較大，所以綜合以上結果，為了避免反射因素的影響而且因為有機層是我們比較有興趣的，所以在 3.4.節我們將採用拇指形天線作為發射端與接收端來量測藍色發光層的微波特性。

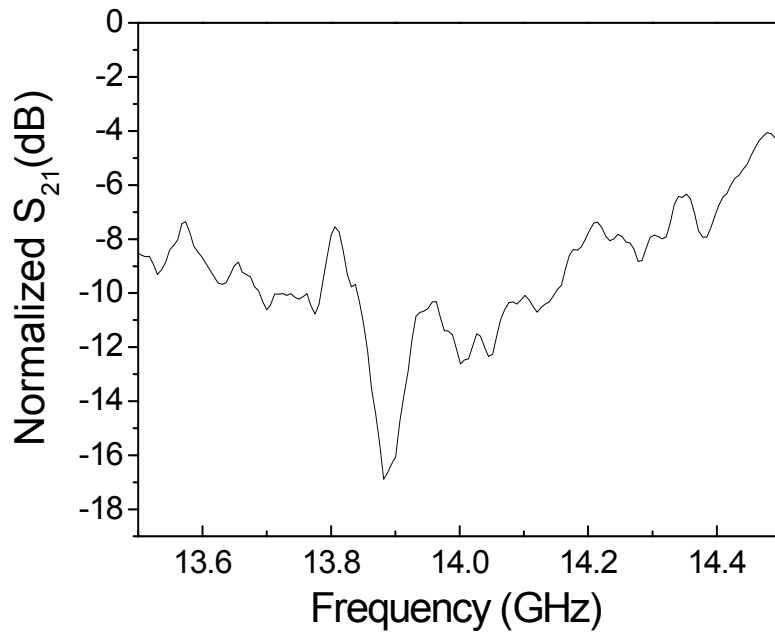


圖 3.3.9 白光OLED 13.5 GHz到 14.5GHz之 S_{21} 頻譜。

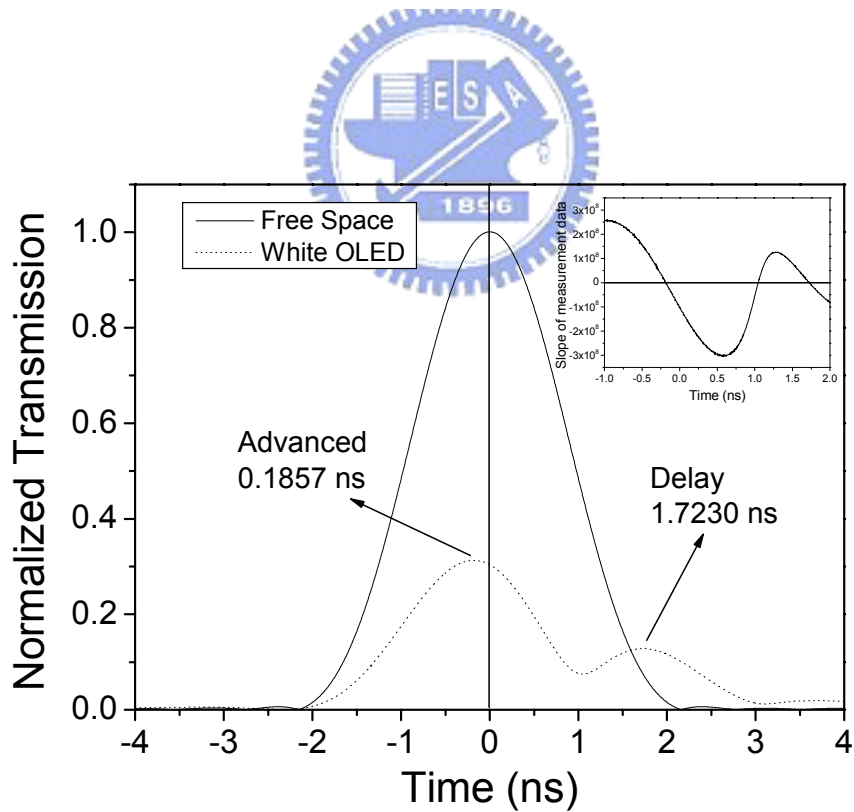


圖 3.3.10 白光 OLED 的脈衝響應。脈衝超前了 0.1857 ns，延遲部分為 1.7230 ns。內圖為白光 OLED 脈衝響應的斜率圖用來找脈衝響應峰值。

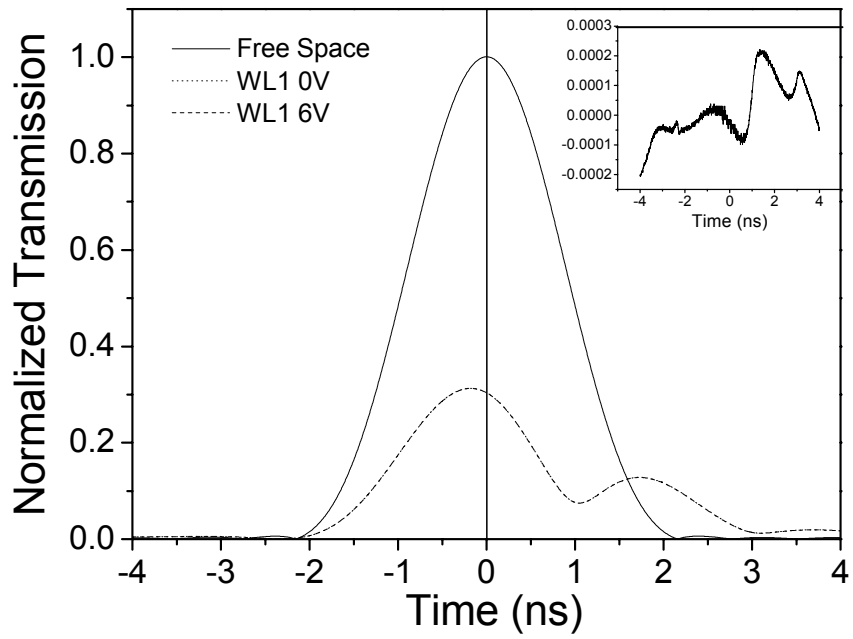


圖 3.3.11 點亮與未點亮的脈衝響應圖，虛線為 OELD 加壓 6V 的脈衝響應，點線為 0V 的脈衝響應，內圖為 6V-0V 的數據圖。

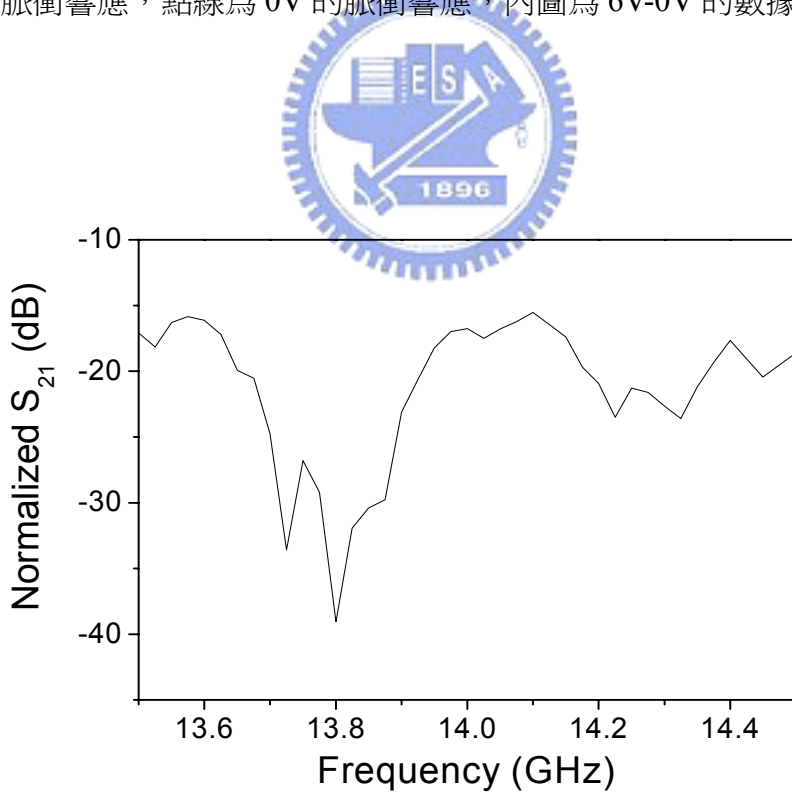


圖 3.3.12 ITO從 13.5 GHz到 14.5GHz之 S_{21} 頻譜。

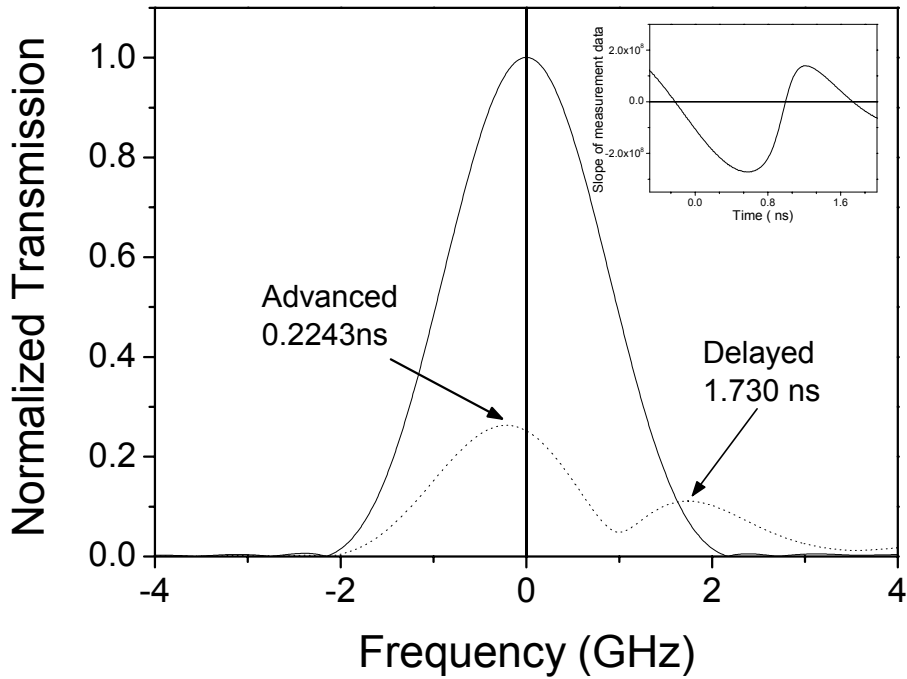


圖 3.3.13 ITO 的脈衝響應。脈衝超前了 0.2243ns，延遲部分為 1.730 ns。內圖為白光 OLED 脈衝響應的斜率圖用來找脈衝響應峰值。



3-4 以拇指形天線量測藍色發光層在自由空間下的微波響應

從 3-2 節的實驗我們確實可以從 OLED 吸收頻譜發現到異常傳播的現象，但是從不同色光的 OLED 都有類似的吸收譜與異常傳播現象，但是透明電極(ITO)可能是造成這種現象的主因，所以在本節我們改用效能比較好的拇指形天線來量測藍色發光層的微波特性，而在這邊基本的實驗架構還是跟圖 3.3.1 一樣，比較特別的是拇指形天線的微波發射是從垂直於角錐面的方向發射出來，所以必須將兩個拇指形天線的角錐面互相平行才能達到最佳的效果。

發射端與樣品的距離為 1.2 cm，接收端與樣品的距離為 4 cm，圖 3.4.1(a)、(b)分別為實驗架構的示意圖與實驗架構照片，可以得到 S_{21} 頻譜，如圖 3.4.2，從此圖可以看到藍色發光層在 14 GHz左右同樣會出現吸收的現象，但是吸收程度

較小，所以我們爲了確認藍色發光層的吸收現象不是因爲發射端與接收端的駐波現象，因此進一步的來量測藍色發光層的 2D 場型分佈，發射端與樣品的距離爲 1.2 cm，接收端與樣品最接近的距離爲 0.3 cm，然後我們將未放置樣品，且發射端與接收端相距 30 cm 時 14.1GHz 的 S_{21} 參數作爲標準。圖 3.4.4(a) 爲未放置樣品時的 2D 場型圖，強度的單位爲 dB，在此圖中 ⊗ 記號處的波形接近爲平面波，所以這點將是我們擺設樣品的位置，而且圖中沒有出現駐波的現象，表示說這一對拇指天線並不會因爲靠得太近而出現干擾訊號。圖 3.4.4(b) 爲藍色發光層樣品的 2D 強度分佈圖，此圖也沒有出現駐波現象，所以這個量測架構應該是可以把反射波的干擾因素降到最低。在藍色發光層的 2D 強度分佈圖中 ⊗ 記號處的強度變小出現一個凹陷，所以可以證明藍色發光層的吸收現象應該是可以相信的。

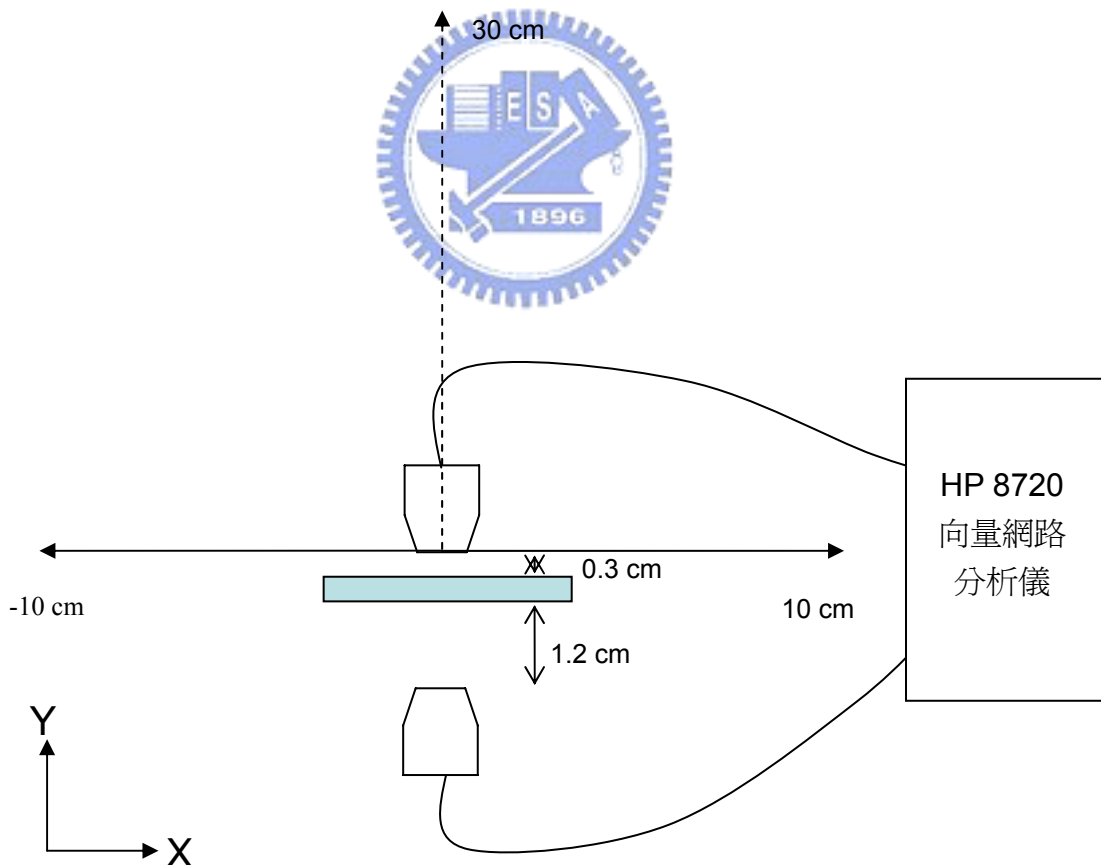


圖 3.4.1(a) 藍色發層 2D 強度分佈量測實驗架設的示意圖，接收端 X 軸零點位置在藍色發光層樣品中央，Y 軸零點位置距樣品爲 0.4 cm 處。X 軸的量測間隔爲 0.5 cm，Y 軸量測間隔爲 2 cm。

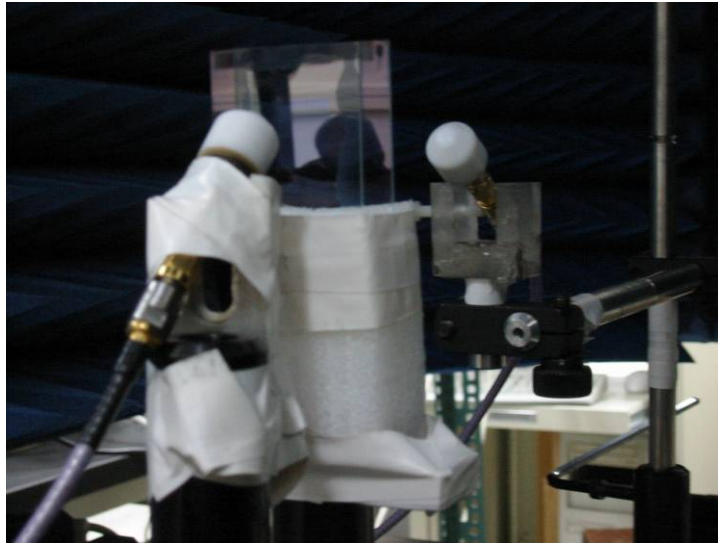


圖 3.4.1(b) 藍色發光層實驗架設照片。

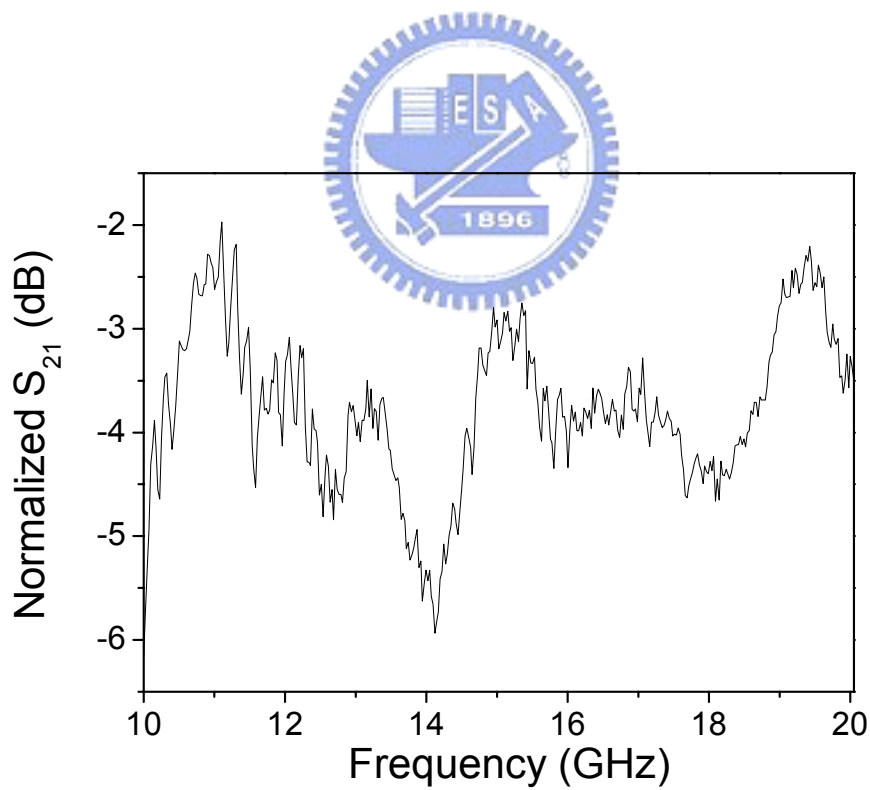


圖 3.4.2 藍色發光層 10~20.05 GHz 的 S_{21} 頻譜。

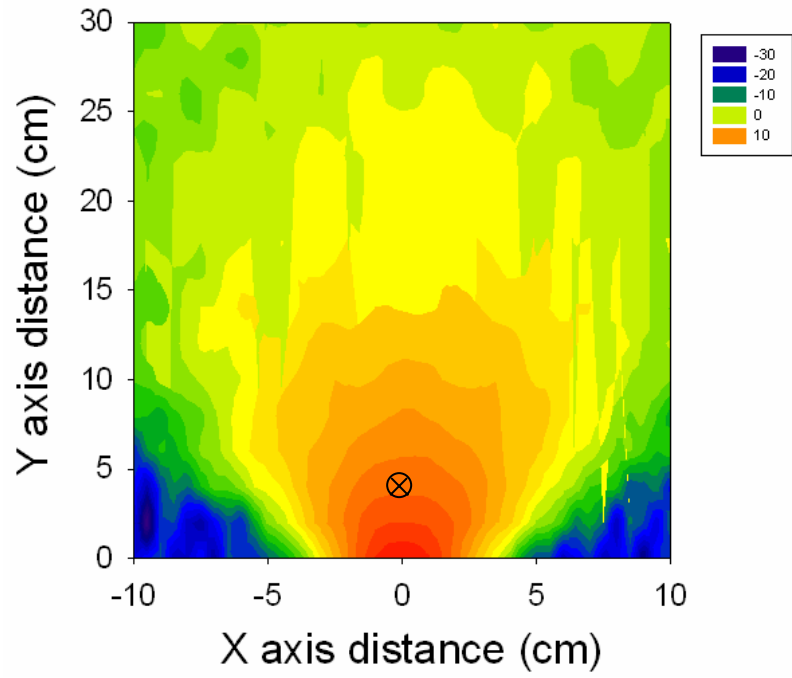


圖 3.4.3(a) 未放置樣品時的 2D 場型分佈圖

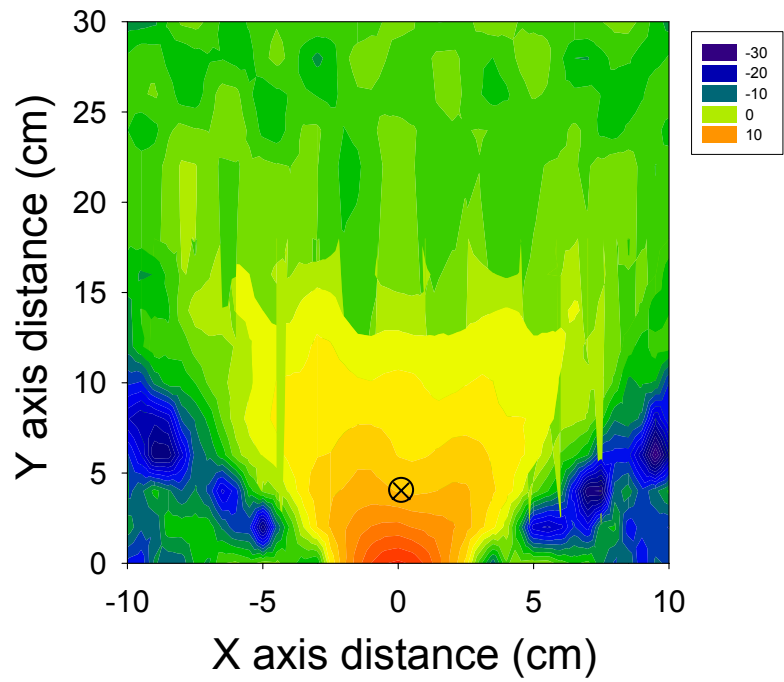


圖 3.4.3 (b) 藍色發光層樣品的 2D 場型分佈圖。

爲了更進一步得解什麼是脈衝超前現象的重要因素，我們將對藍色發光層的樣品相位頻譜研究，因爲從第二章的基本理論裡可以知道，會出現脈衝超前的現象，主要是因爲在這些頻率範圍內是屬於異常色散，而相位應該跟折射率有很直接的關係，這邊我們利用 $\phi = kz$ 的關係來推導：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\nu}{c} z \cdot (n(\omega) - 1) \quad (3.1)$$

$$n(\omega) = \frac{\Delta\phi \cdot c}{2\pi\nu z} + 1 \quad (3.2)$$

上式中， ϕ 爲相位延遲， k 爲波數， x 爲樣品厚度， ν 爲頻率， c 爲光速， n 爲樣品折射率。所以我們除了量測吸收頻譜外，增加量測相位頻譜來確認是否符合我們預期的結果，圖 3.4.4 爲藍色發光層的吸收與相位頻譜，藉由 3.2 式可以繪出藍色發光層的折射率與頻率的關係圖，如圖 3.4.5 所示。將圖 3.4.4 與圖 3.4.5 作比較，可看出相位與折射率頻譜的走勢幾乎是一樣的，所以說相位頻譜也就可以反映出折射率隨著頻率的變化趨勢，在圖 3.4.4 頻譜圖中我們可以看到吸收最大所對應的頻率位置大致上是對應到相位頻譜負斜率線的中央位置，而負斜率線也是幾乎涵蓋了整個 S_{21} 的凹陷區，這個結果跟理論也是相符合的。

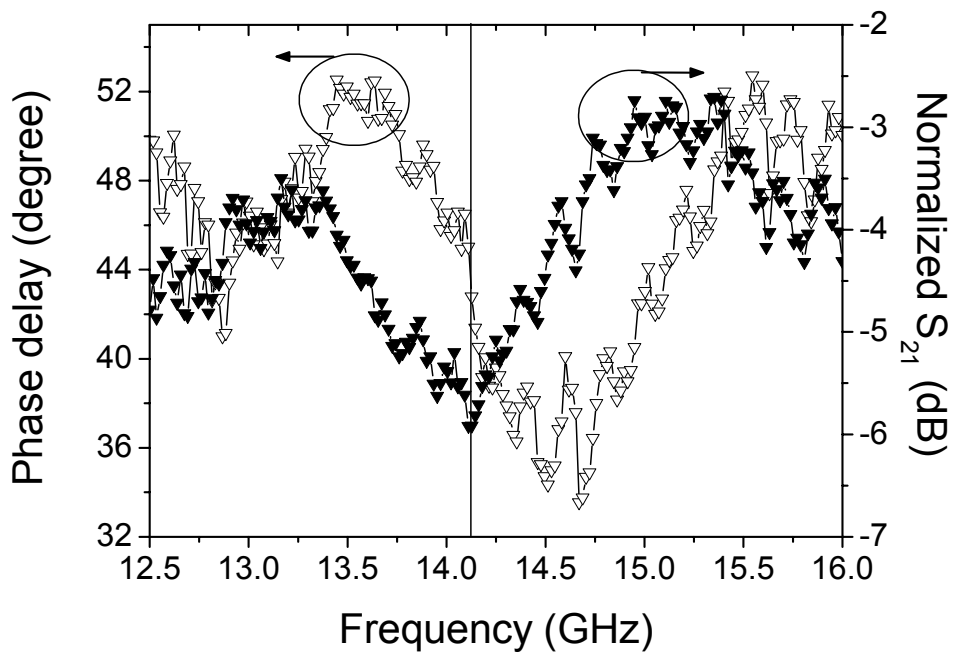


圖 3.4.4 以拇指形天線量測到的藍色發光層的 S_{21} 頻譜。其中黑色倒三角形為 S_{21} 參數頻譜，空心倒三角形為相位頻譜，範圍從 12.5 GHz 到 16 GHz。

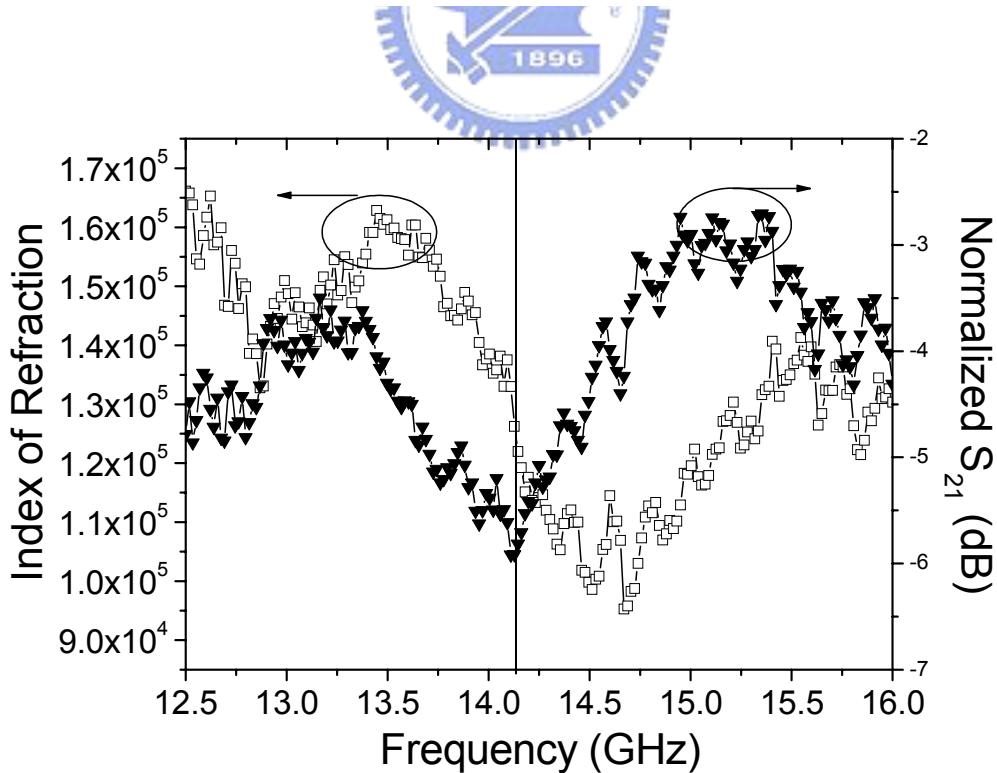


圖 3.4.5 藍色發光層折射率頻譜與 S_{21} 頻譜圖，中空方塊線為藍色發光層折射率頻譜，實心倒三角線為其 S_{21} 頻譜。

因此我們觀察相位頻譜從 12.91 GHz到 14.75 GHz的範圍，若是把它分成兩部分來看它的脈衝響應，第一個是斜率為正的部分：從 12.91 GHz到 13.65 GHz，第二個是斜率為負的部分：從 13.65 GHz到 14.75 GHz。根據理論推導的結果，我們預期相位頻譜斜率為正的部分，其脈衝響應應該是會出現延遲的現象，相位頻譜斜率為負的部分應該繪出現超前的現象。圖 3.4.6(a) 和圖 3.4.6(b)分別為上述兩各部分的脈衝響應，從這圖 3.4.6(a)可以看到脈衝落後了 0.027 ns，有機發光層厚度為 20 nm，換算成等效群速度折射率與脈衝群速度分別為 4.05×10^5 與 740.7 m/s，圖 3.4.6(b)中脈衝超前了 0.0636 ns，換算成等效群速度折射率與脈衝群速度分別為 -9.56×10^5 與 -313.7 m/s，因此確認了有機層在相位頻譜中斜率為負值時，會出現脈衝超前的現象，反之會出現脈衝延遲。而這種脈衝超前的現象，乍看之下似乎違反因果論，但是如果將參考脈衝訊號減掉超前脈衝或延遲脈衝，應該都不會小於零，也就是超前的脈衝訊號實際上並沒有比參考脈衝訊號要來得快到達接收端，圖 3.4.7 便是將參考脈衝訊號減掉超前與延遲脈衝訊號的結果，一如預期兩者都是大於零的值。因此根據上述的實驗結果與理論推導，假若我們量測到樣品的 S_{21} 頻譜有吸收波段，而且相位頻譜斜率為負，那麼應該就可以確認出相對應頻段的脈衝響應會有超前的現象。

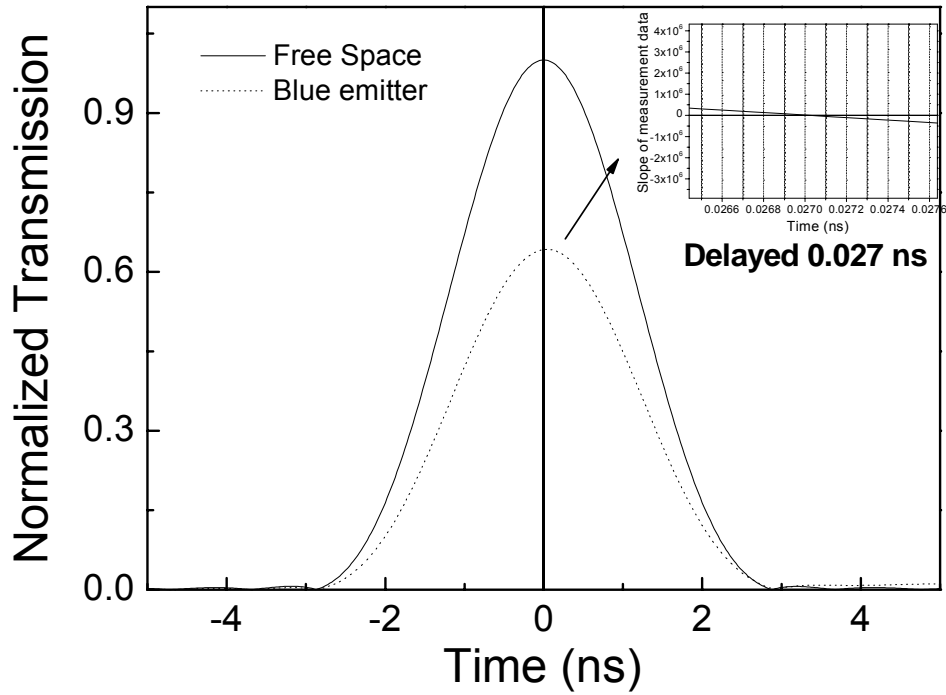


圖 3.4.6 (a) 藍色發光層的脈衝響應圖，相對應的頻率範圍從 12.91GHz 到 13.65 GHz。內圖為藍色發光層脈衝響應的斜率圖，可以發現到有 0.027 ns 的延遲量。

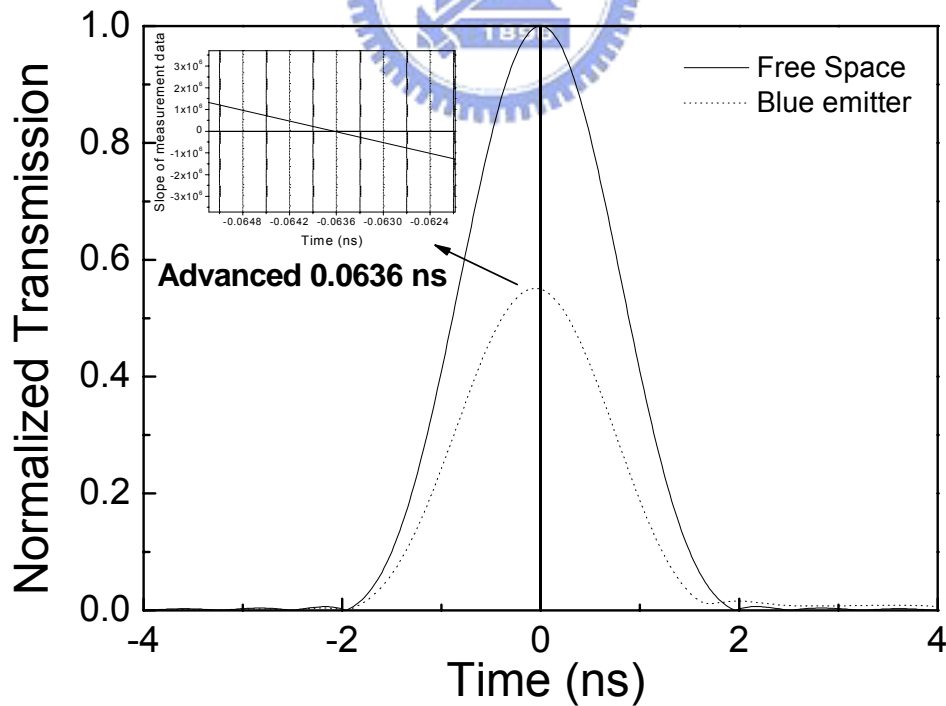


圖 3.4.6(b) 藍色發光層的脈衝響應圖，相對應的頻率範圍從 13.65 GHz 到 14.75 GHz。內圖為藍色發光層脈衝響應的斜率圖，可以發現到有 0.0636 ns 的超前量。

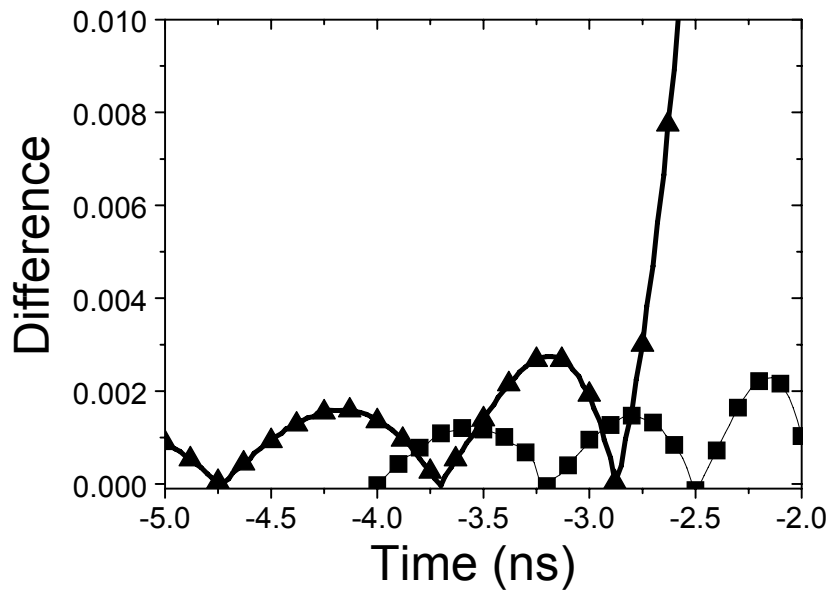


圖 3.4.7 參考訊號分別減掉超前與延遲脈衝訊號的差值圖，正方形符號為超前部分的結果，三角形符號為延遲部分的結果，兩者在時間軸上都是大於零的值。

3-5 利用探針將微波導入 OLED 樣品的量測實驗

在自由空間的微波量測實驗中，發現了脈衝響應超前的現象，但是因為對於 OLED 可靠度分析的貢獻不大，而且可量測的頻率範圍受制於天線，只能量測 10GHz 以上的響應，所以我們將做另外的嘗試使用 End Launch Jack Receptacle SMA 接頭 [附錄 A]的針尖作為微波探針，將微波導入 OLED 樣品，再藉由網路分析儀來看是否能夠有更好的效果，我們將四個角剪掉如圖 3.5.1(b)。圖 3.5.2 為實驗架設圖，這兩個探針分別接到 OLED 樣品的正負兩極量測穿透參數。我們用的樣品是正常的白光 OLED 與不能發光的白光 OLED，目的是要確認在這個架構下是否能利用微波來



圖 3.5.1(a) 原 SMA End Launch Jack 圖。



圖 3.5.1(b) 去掉四個角的 SMA End Launch Jack Receptacle 圖。

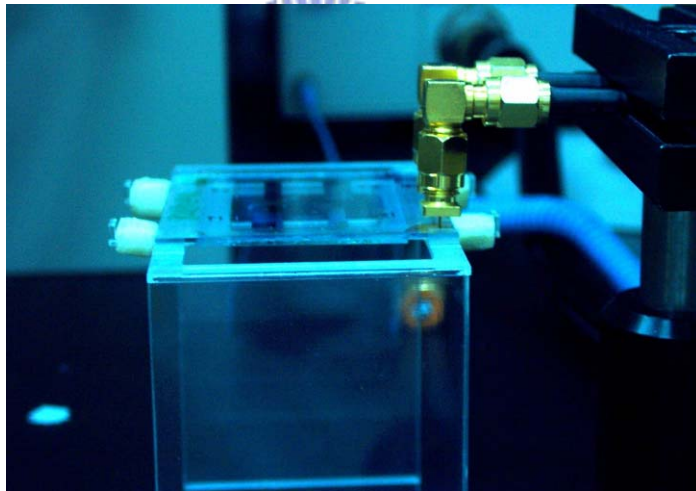


圖 3.5.2 以 SMA End Launch Jack 為探針的實驗架設圖。

分辨 OLED 樣品的好壞，圖 3.5.3 為量測的實驗結果，可看出不同發光區域的 OLED 與不能發光的 OLED 的結果並沒有顯著的差異，也就是說微波還是無法分辨出 OLED 的細部的差異，且高頻微波(大於 10 GHz)，在 OLED 樣品的結構下傳導效果比較差。

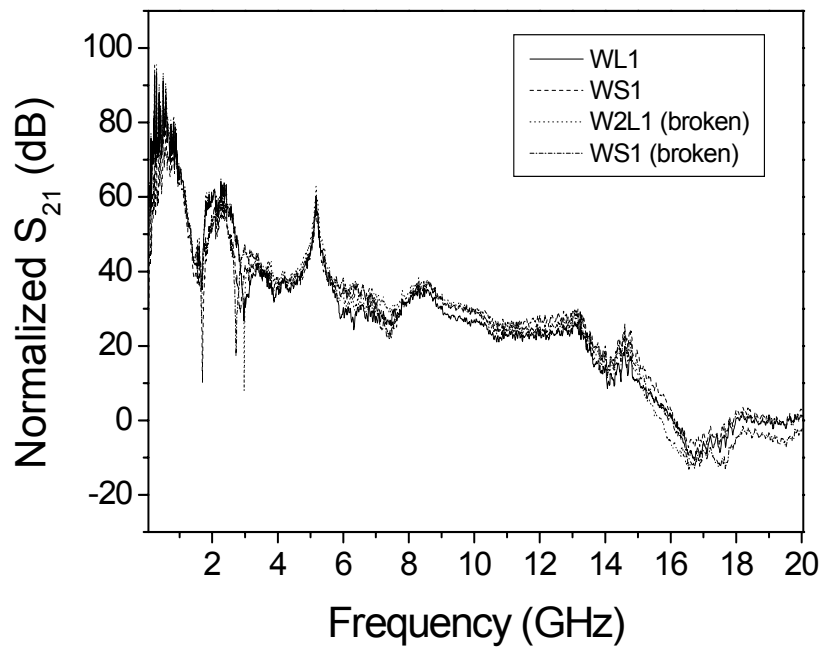


圖 3.5.3 白光 OLED 與不能發光的白光 OLED 的量測頻譜圖。



第四章 微波響答實驗分析與討論

本章將對第三章所作的實驗結果分成兩個部分來分析討論，第一個部分是 4.1 節藍色、綠色、白色三種 OLED 與 ITO 樣品的微波響應，第二個部分是 4.2 節藍色發光層的微波響應。而這兩部分最主要是使用了不同天線，第一部份是使用 SMA 接頭，第二部分是使用商用的微波天線，在 4.1 節中，我們將詳述選用不同天線的原因。

4-1 OLED 與 ITO 樣品的微波響答實驗分析與討論

在 OLED 的微波實驗中，我們做了藍光、綠光、白光三種色光 OLED 及 ITO 樣品與藍色發光層的量測，而於三種色光 OLED 與 ITO 樣品的實驗裡，因為樣品大小的因素，所以我們使用 SMA 接頭作為天線，量測了吸收頻譜與相對應波段的脈衝響應，比較這四種樣品的吸收頻譜，可以發現到這四種樣品的頻譜差異不大，而且在這些吸收頻譜的波段都可以觀察到脈衝超前與延遲的現象。從第二章的 2-1-2 吸收物質與負數群速度的關係中，可以知道出現吸收峰處是因為分子共振而產生的吸收，且假設符合古典簡諧震盪的模型，在這個波段便會出現異常色散的現象，如果輸入相對應頻段的脈衝波，便可看到超前的脈衝波。表 4.1 為三種色光的 OLED 樣品與 ITO 樣品的脈衝超前與延遲的整理表，在這四個樣品發現到的超前數量級大概在 0.1~1 ns，而脈衝最高點的強度大概都是 0.2 倍的參考脈衝最高點強度。除了超前的脈衝波之外，我們也可以在這些樣品發現到脈衝延遲，而延遲的數量級大概在 0.5~2 ns。從三色的 OLED 樣品與 ITO 樣品的吸收頻譜與脈衝響應的結果看來，ITO 的吸收效應幾乎是產生脈衝超前的主因，加上在 3.3 節中我們也比較了未點亮與點亮的白光 OLED 情況，發現兩者的脈衝響應的強度的差值大約是原強度的 1/1000，所以說兩者的響應幾乎是一樣的，也可以說微波無法有效的分別出不同色光的 OLED 樣品，也無法看出發光與不發光的

差別，所以在自由空間下的微波量測，不適用於 OLED 的可靠度測試。

在 OLED 樣品的脈衝量測中，都可以看到延遲脈衝波的產生，但是因為我們取的波段是只包含一個吸收譜，要使出射脈衝分裂成兩部分的可能性並不大，所以我們懷疑延遲訊號的產生是反射波造成的，反射波的成因可能是接收端與樣品產生的反射波，因為 OLED 上有金屬與 ITO，雖然小於微波的及膚深度，但應該還是會產生部分反射，加上 SMA 接頭為金屬，因此反射的問題會比較嚴重而產生延遲訊號，而且從表 4.1 中比較三種色光的 OLED 樣品，可以發現綠光 OLED 延遲脈衝波的強度比藍光、白光 OLED 小很多，會出現這種情形可能是因為在樣品擺設時跟其他兩種樣品有些許的差異，而使得反射波沒被接收端收到所致，因此為了避免以上這些因素的影響，而且對我們而言有機層才是我們討論的重點，加上藍色發光層樣品的面積較大，所以我們採用拇指形天線作為發射端與接收端來量測藍色發光層的微波特性。

表 4.1 藍光、綠光、白光 OLED 與 ITO 樣品微波量測數據比較表。

| | 藍光 OLED | 綠光 OLED | 白光 OLED | ITO | Blue emitter |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 樣品厚度 | 354 nm | 350.5 nm | 355.8 nm | 150 nm | 20 nm |
| 量測頻段 | 13.35~14.85 GHz | 13.5~14.2 GHz | 13.5~14.5 GHz | 13.5~14.5 GHz | 13.65~14.75 GHz |
| 最大吸收量(dB) | -31 | -18 | -17 | -40 | -6 |
| 脈衝超前量(ns) | -0.2875 | -0.3799 | -0.1857 | -0.1857 | -0.0636 |
| 超前脈衝標準化強度 | ~0.15 | ~0.17 | ~0.3 | ~0.3 | ~0.6 |
| 脈衝延遲量(ns) | 0.8725 | 2.274 | 1.723 | 1.730 | none |
| 延遲脈衝標準化強度 | ~0.12 | ~0.2 | ~0.13 | ~0.1 | none |
| 超前部分的等效折射率 | -2.42×10^5 | -3.25×10^5 | -1.57×10^5 | -4.49×10^5 | 9.56×10^5 |
| 超前部分的群速度(m/s) | -1239.7 | -922.61 | 1910.8 | -668.7 | -313.7 |
| 延遲部分的等效折射率 | 7.39×10^5 | 1.95×10^6 | 1.45×10^6 | 3.46×10^6 | none |
| 延遲部分的群速度(m/s) | 405.7 | 154.13 | 206.9 | 86.7 | none |

4-2 藍色發光層樣品的微波響答實驗分析與討論

藍色發光層的微波量測的實驗，主要是爲了確認OLED樣品中有機層在微波波段是否也會出現脈衝超前的現象。首先我們先量測藍色發光層的 S_{21} 頻譜，確認是否會出現吸收頻譜，和確認這個吸收譜確實是藍色發光層造成的，不是因爲反射波所造成的駐波現象，因此我們先量測出吸收頻譜後找出可能的共振頻率，再針對這個頻率作 2D場型確認在會不會有駐波出現，再進一步針對藍色發光層的相位頻譜作分析。

從 3.4 節得到的 S_{21} 頻譜與 2D場型顯示出藍色發光層在 14 GHz附近的頻段會吸收，進而量測相位頻譜再由(2.1.29)式 $n(\omega) = (\Delta\phi \cdot c / \omega z) + 1$ 可以算出折射率頻譜，圖 4.1 同圖 3.4.6 爲藍色發光層的吸收頻譜與折射率頻譜圖，頻率範圍是從 12.5~16 GHz，可以發現與圖 2.1.2 吸收與折射率頻譜圖相似的地方，就是在吸收最強的頻率在正好也是在異常色散範圍的中心頻率，也可以說符合在第二章所提到的古典簡諧震盪理論的描述。

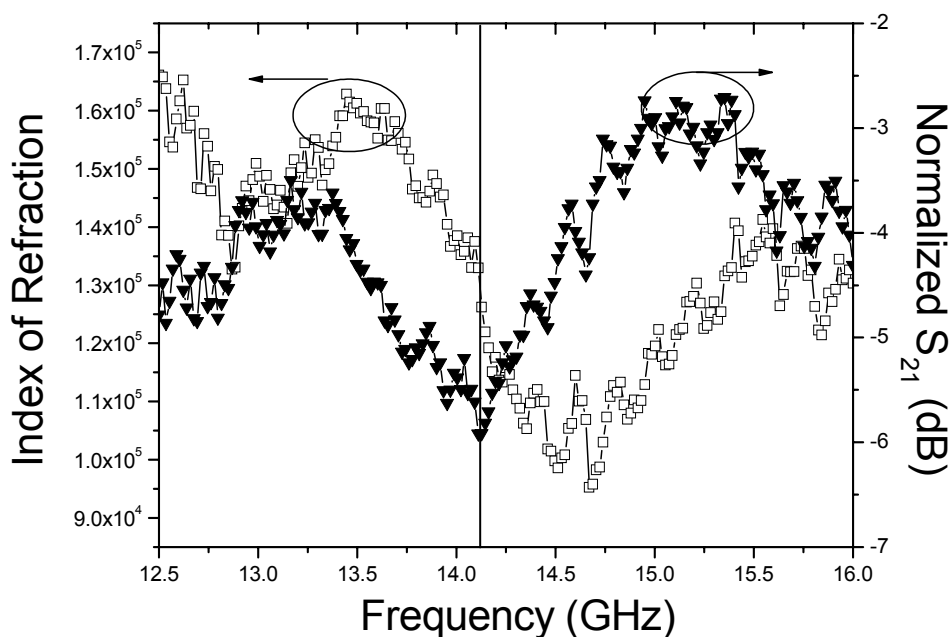


圖 4.1 藍色發光層 S_{21} 頻譜與折射率頻譜。

在藍色發光層的異常色散的中心頻率約為 14.1 GHz，折射率頻譜中我們可以取 13.5 GHz 到 14.5 GHz 兩點的折射率連成的直線作為 $dn/d\nu$ 的估計，依此算出 $dn/d\nu = (1.6 \times 10^6 - 1.0 \times 10^6)/1 \times 10^9 = -6 \times 10^{-5}$ 的值，再將 $\omega = \omega_0 = 14.1 \text{ GHz}$ 、 $n(\omega_0) = 1.2 \times 10^5$ 帶入 (2.1.7) 式 $n_g = n(\omega_0) + \omega \frac{dn}{d\omega}$ 算出等效群速度折射率 $n_g = -7.2 \times 10^5$ 。因此在這邊我們可以比較從脈衝超前量所算出的群速度折射率 $n_g = -9.56 \times 10^5$ 。這兩種方式所算出來的群速度折射率的值雖不是完全一樣，但是數量級是相同的，這也表示說我們在藍色發光層所量測到的脈衝超前現象應該是可以相信的。



第五章 OLED 的模型化與參數粹取

本章將根據 2-2-3 節：小訊號電路模型與、簡化的 OLED 電路模型、OLED 陷阱分析量測方法來作模型化與參數粹取，所使用的樣品分別為白光 OLED 與綠光 OLED，以期可以預測 OLED 的使用壽命。

5-1 小訊號電路模型實驗

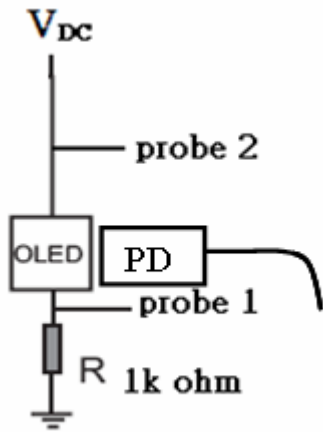
在 5-1 節我們所使用的樣品為白光 OLED，與微波量測使用同一批的樣品延續在 2-2-3-1 節中的小訊號模型架構，我們先量測白光 OLED 的頻率響應與直流量測，再藉由這些量測結果，把 OLED 的小訊號模型參數粹取出來。再利用這些參數藉由 PSPICE 電路模擬軟體，模擬出 OLED 的頻率響應與實驗結果作比對，驗證粹取出來的參數可以代表 OLED 的電特性，最後再將電特性與光特性作連結。



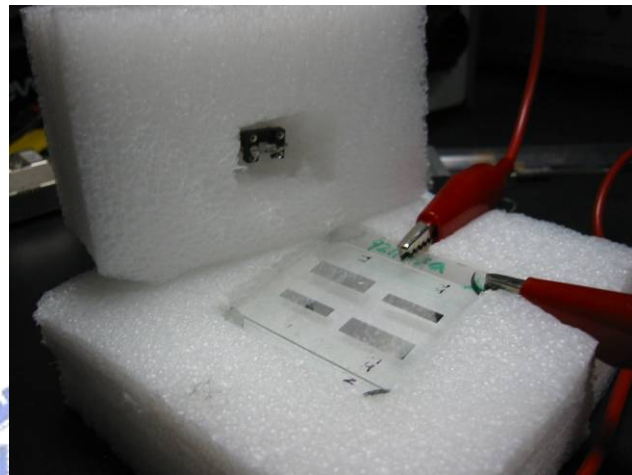
5-1-1 OLED 樣品的直流量測

OLED 的直流的 B-I-V 量測可以反映出最基本的發光特性，可以觀察到 OLED 的臨界電壓、操作電壓與亮度的範圍、電流與亮度間的線性區範圍，基本上假設 OLED 的亮度是與電流成正比，且我們主要是量測發光的趨勢，所以就沒有作校正的工作。在這邊我們使用的光接收二極體 [附錄 C] 的最高轉換效率所對應的波長為 900 nm，但是因為 OLED 的發光的強度主要是在可見光範圍，落在 900 nm 的比例很小，而且這個光接收二極體在可見光範圍還是能夠偵測得到訊號，所以在此還算是可以勝任。在本節的實驗中 GW GPC-3030T 為直流電壓源，輸出電壓範圍 0~30V，最大輸出電流為 3A，交流電壓源為 HP 33120A 任意波形產生器，最大 V_{pp} 為 20 V，最大操作頻率為 15 MHz。使用 HP Infinite 示波器作為電壓波形

的量測工具。圖 5.1.1 (a)為實驗量測架構示意圖，圖 5.1.1 (b)為實驗架設照片，圖 5.1.1 (c)為偵測器實體照片。圖 5.1.2 為白光OLED的I-V曲線，圖 5.1.3 為白光OLED的B-V曲線，圖 5.1.4 為白光OLED的B-I曲線。在這邊臨界電壓是當電流值在 0.02 mA時，定義為臨界電壓為 4.3 V，從B-I曲線可發現到大概在 7 V左右，電流與亮度就不再為線性關係，出現飽和現象。



(a)



(b)



(c)

圖 5.1.1(a) 實驗量測架構示意圖，(b) OLED 直流量測實驗架設照片，上方保麗龍中間，白色區域為光偵測器，量測時將它蓋在 OLED 樣品上，可以擋掉雜散光。(c)為偵測器實體照片。

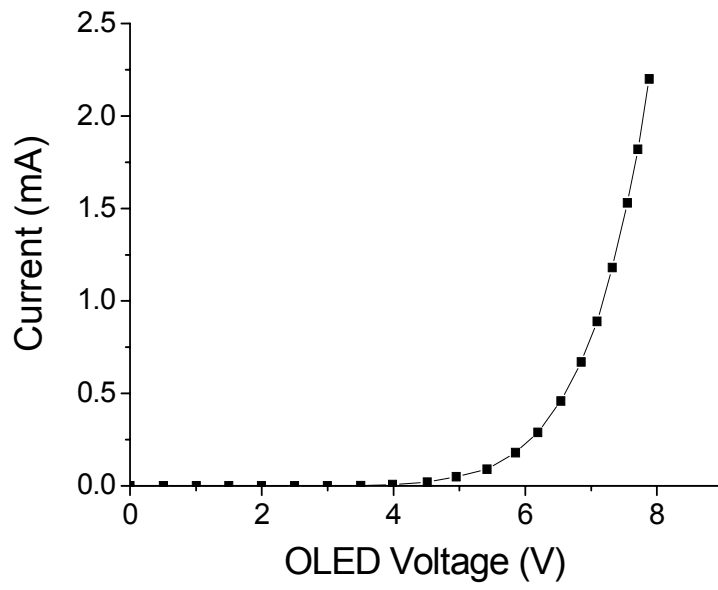


圖 5.1.2 白光 OLED 的 I-V 曲線圖。

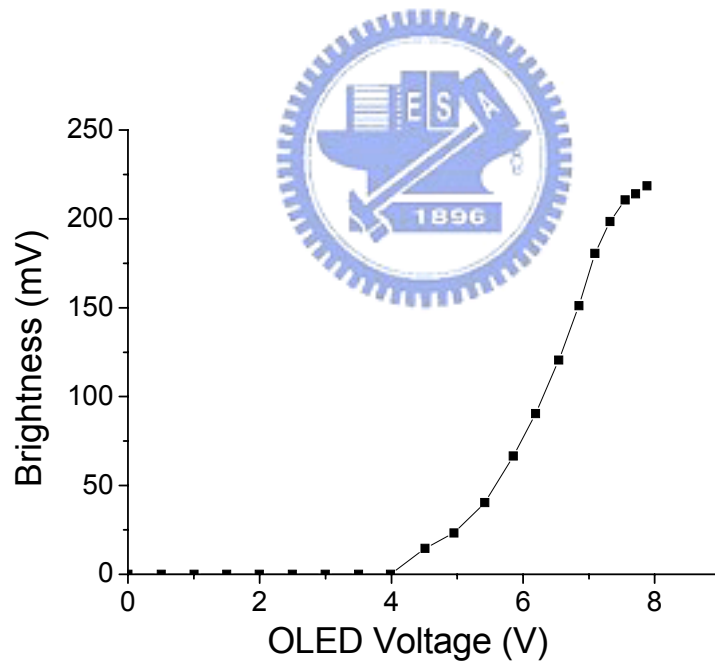


圖 5.1.3 白光 OLED 的 B-V 曲線圖。

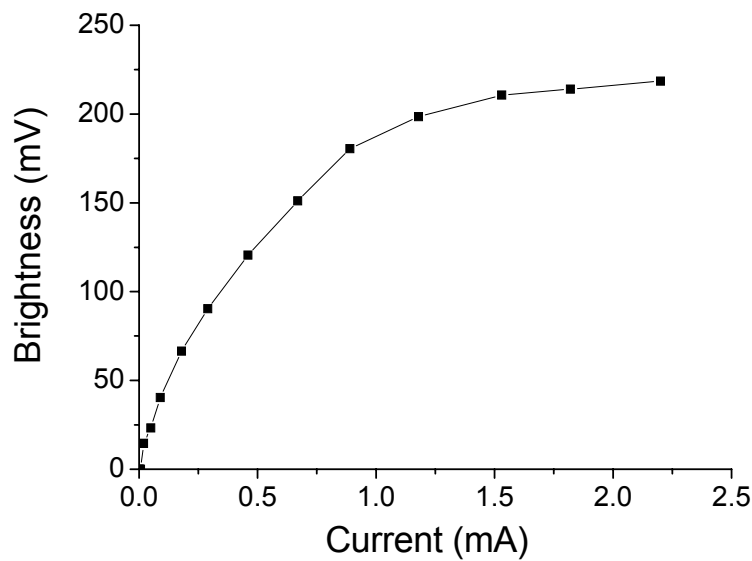


圖 5.1.4 白光 OLED 的 B-I 曲線圖。

5-1-2 OLED 樣品頻率響應



OLED 樣品頻率響應實驗的架構為圖 5.1.5，主要研究振幅、相位頻率響應與改變偏壓對頻率響應所造成的影響，實驗條件如下：交流訊號測試範圍為固定 100 mV 振幅的正弦波，頻率從 5 KHz 到 500 KHz，直流偏壓範圍從 5 V 到 11 V，外接電阻(R)為 1 K Ω ，量測 OLED 的跨壓的振幅與相位訊號，圖 5.1.6 為 OLED 在不同偏壓下的振幅頻率響應，圖 5.1.7 為相位頻率響應。利用 OLED 的阻抗與電阻 R 的分壓關係可以求得 OLED 的阻抗(Z)，再利用 2.2.1 式轉換成電導與電容的關係式： $Y = 1/Z = G + jB = G + j\omega C$ ，即從振幅與相位響應可以轉成電導(G)和電容(C)的頻率響應。圖 5.1.8 與圖 5.1.9 分別為電導和電容的頻率響應。從圖 5.1.8 與圖 5.1.9 的低頻區域可以看出當在低偏壓時 OLED 的電導值是比較小，也就是說電阻效應比較大，而電容效應則是比較小的。這種情形可能是在低電壓的時候載子注入隨著外加偏壓的上升而提高，所以電阻直會隨著偏壓減小，而在電容方面則是因為注入的載子增加，使得累積在 OLED 裡面的電荷也隨著

增加，因此電容的效應則隨著偏壓上升而提高。

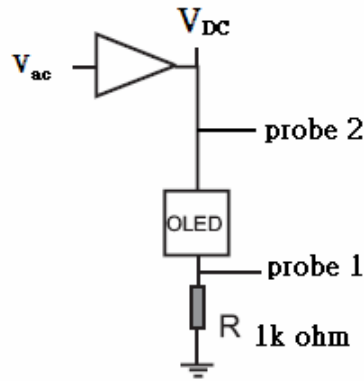


圖 5.1.5 OLED 頻率響應實驗架構圖。

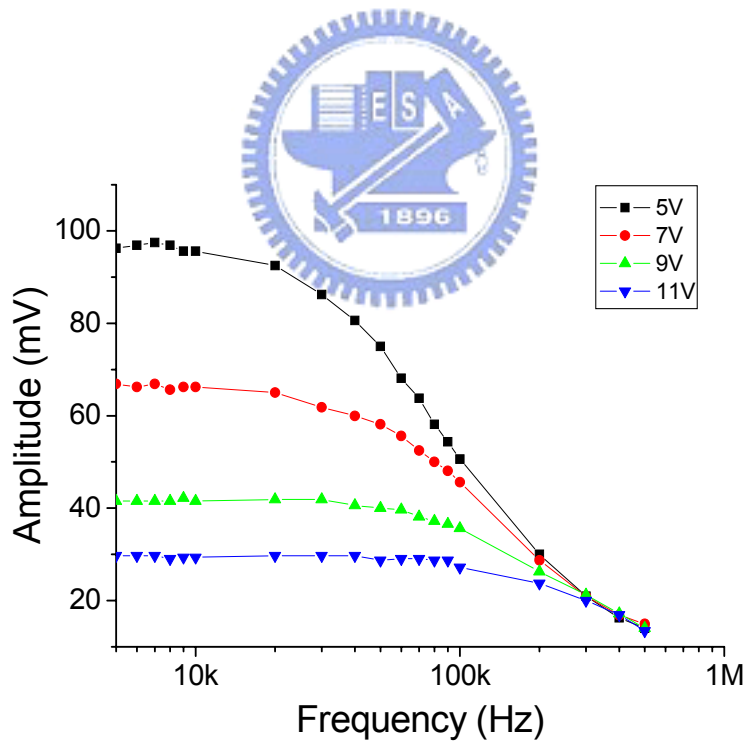


圖 5.1.6 白光 OLED 振幅頻率響應，頻率範圍從 5 KHz 到 500 KHz。

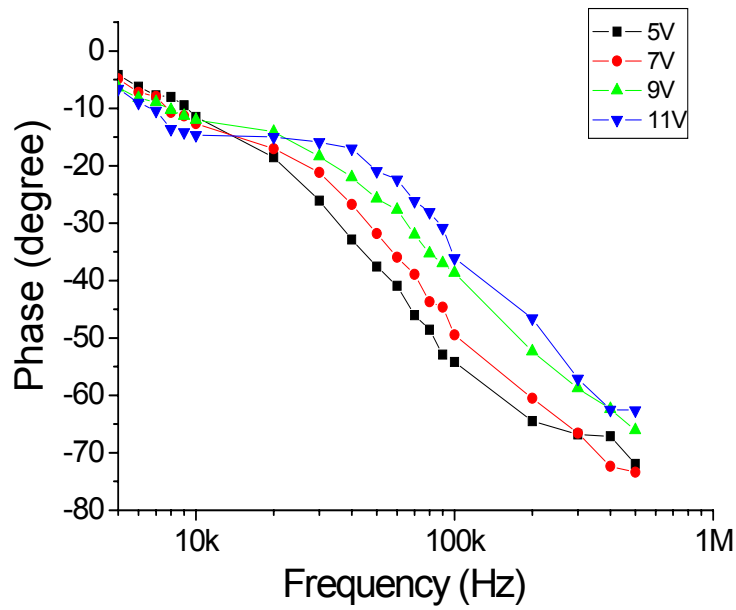


圖 5.1.7 白光 OLED 相位頻率響應，頻率範圍從 5 KHz 到 500 KHz。

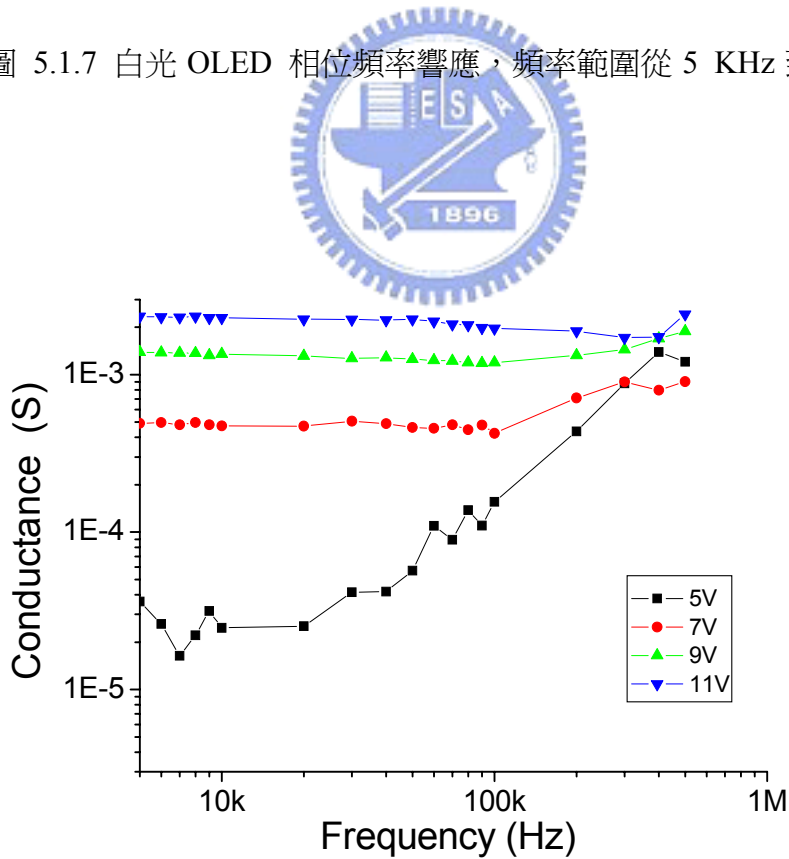


圖 5.1.8 白光 OLED 電導頻率響應，頻率範圍從 5 KHz 到 500 KHz。

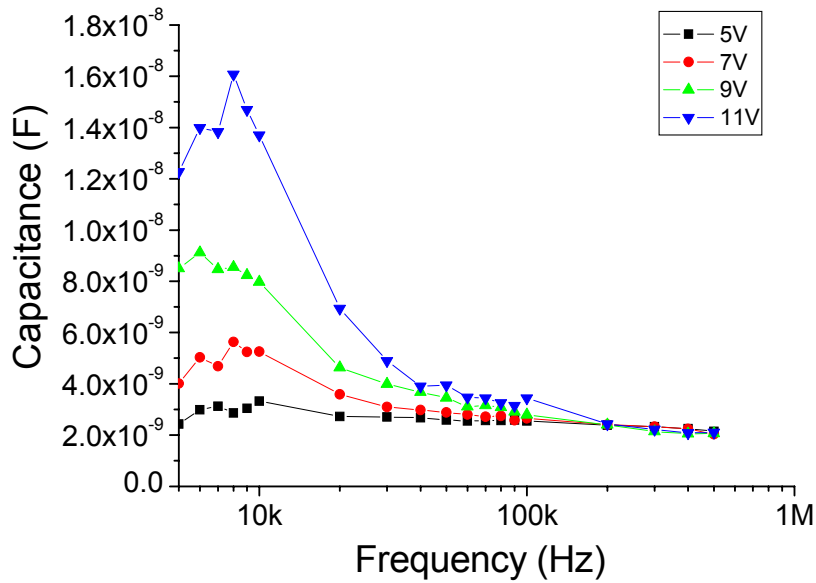


圖 5.1.9 白光 OLED 電容頻率響應，頻率範圍從 5 KHz 到 500 KHz。

本實驗除了得到頻率響應的數據外，也可以把小訊號模型的參數粹取出來。在這邊我們使用圖 5.1.10 的小訊號電路模型，其中 R_s 為電極與有機層的接觸電阻為歐姆接點， R_p 為 OLED 的整體電阻， C_p 為 OLED 的有機層電容。在這邊的接觸電阻 R_s 比 OLED 有機層電阻 R_p 小很多。利用在不同條件下的量測可以把這三個參數粹取出來，主要用的就是直流量測與交流頻率響應。當 OLED 操作在直流偏壓下，電容 C_p 可以將之視為開路，所以整體看到電阻為 R_s 與 R_p 的串聯電路，但是因為 $R_s \ll R_p$ ，所以如果我們計算當外加偏壓大於 OLED 臨界電壓時，電壓與電流的比值，便可估計出 R_p 參數：

$$R_p \approx \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0.47 \text{ V}}{0.04 \text{ mA}} = 11.75 \text{ K}\Omega$$

若是用輸入高頻交流訊號時，大部分的電流會經過 C_p 電容，而整體電路就可以看成是 R_s 與 C_p 的串聯，藉由 2-2-3-1 節中交流量測的參數粹取，便可以從 OLED 整體阻抗轉換成 R_s 與 C_p 值。

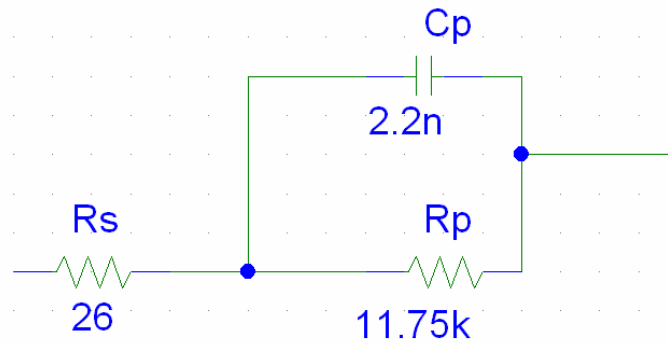


圖 5.1.10 OLED 小訊號電路模型。Rs 為陽極與有機層的接觸電阻，Rp 為 OLED 有機層電阻，Cp 為 OLED 有機層電容。

將粹取出來的小信號模型參數帶入 PSPICE 電路模擬軟體，模擬 OLED 的頻率響應，圖 5.1.11 為在 PSPICE 模擬軟體中的電路圖，圖 5.1.12(a)、(b) 為模擬振幅與相位頻率響應與實驗結果的比較。圖 5.1.12(c)、(d) 為直流偏壓 7V 時的分別為振幅與相位頻率響應與實驗結果的比較，粹取的參數值： $R_s = 22\Omega$ ， $R_p = 1.47\text{ k}\Omega$ ， $C_p = 2.08\text{ nF}$ ，其中 Rp 是由 6.8V 到 7.8V 的 I-V 曲線作線性擬合的斜率，從圖 5.1.12 (a)、(b)、(c)、(d) 可看出模擬的結果跟實驗差距不大，也就是說粹取出來的參數大致上可以代表 OLED 的電特性。

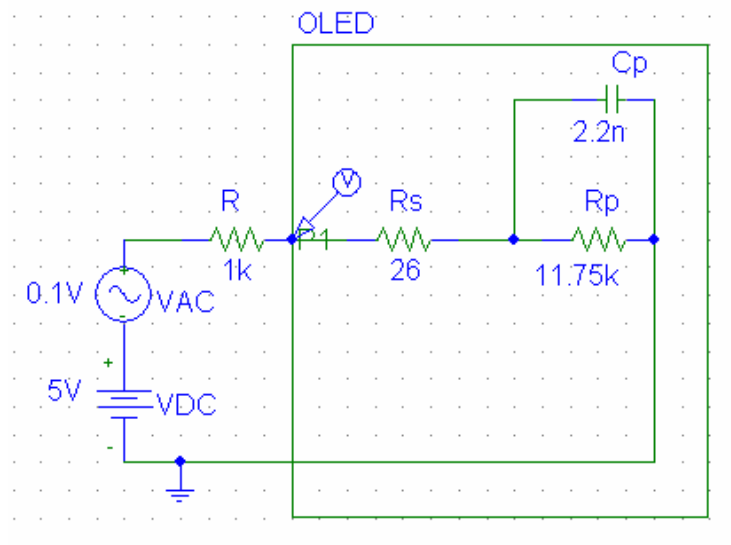


圖 5.1.11 PSPICE 模擬軟體中的 OLED 量測電路圖，電阻的單位為歐姆，電容的單位為法拉，量測端點為箭頭所指的點。框框中的電路為 OLED 的小訊號電路模型。

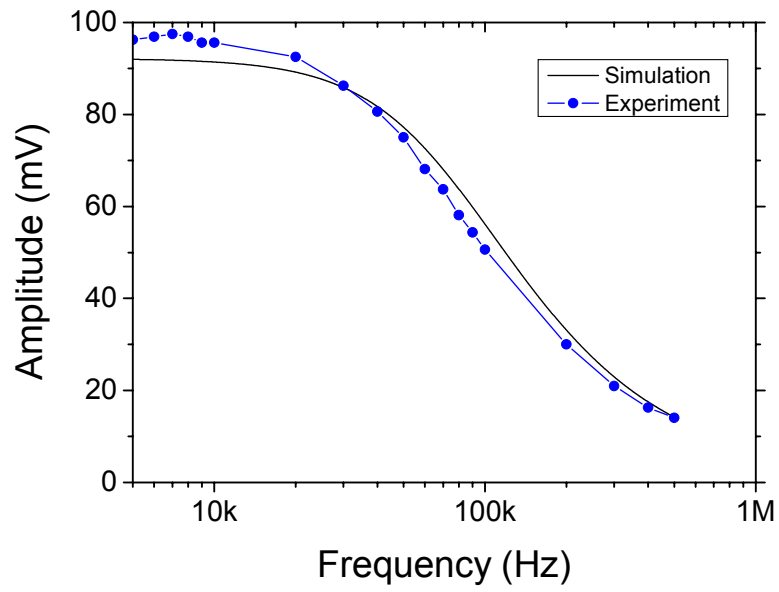


圖 5.1.12 (a) 直流偏壓為 5V 時，白光 OLED 的振幅頻率響應，實線為模擬結果，圓點為實驗結果。

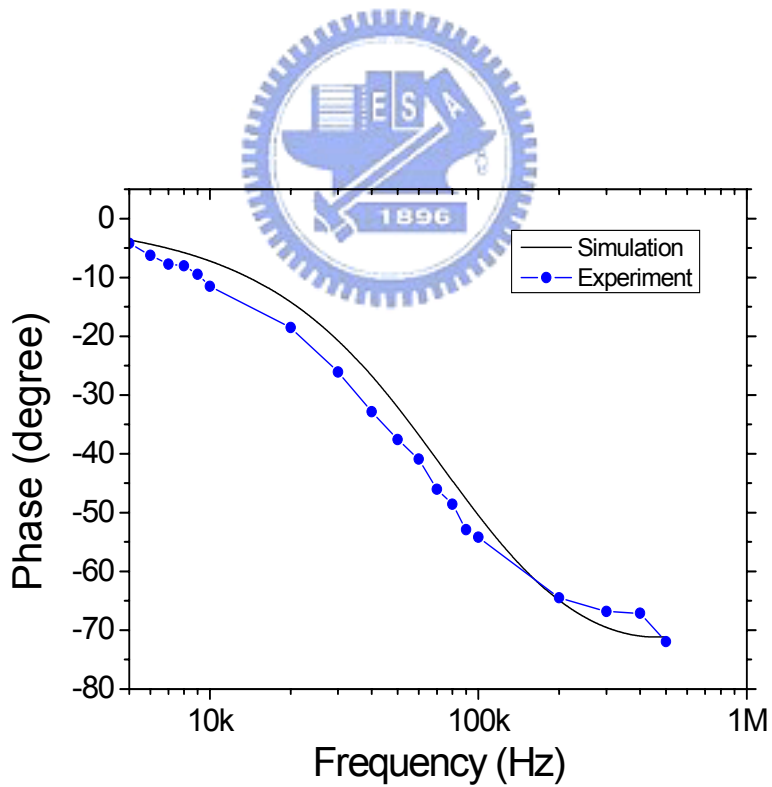


圖 5.1.12 (b) 直流偏壓為 5V 時，白光 OLED 的相位頻率響應，實線為模擬結果，圓點為實驗結果。

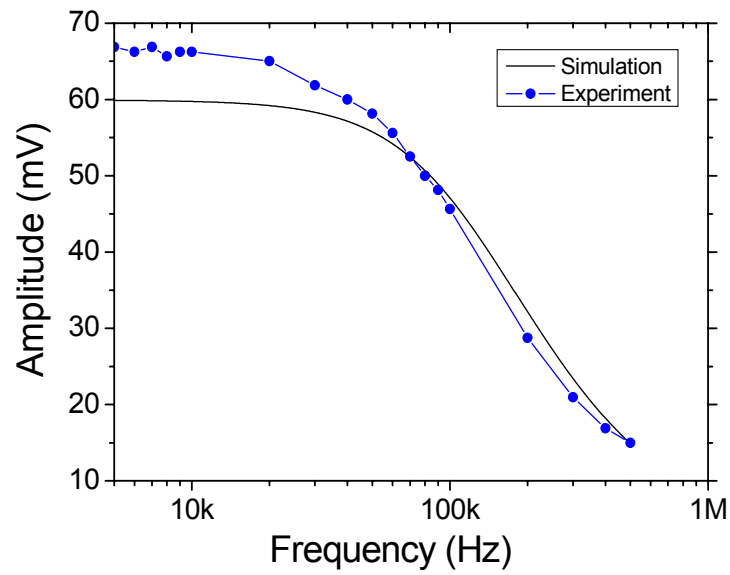


圖 5.1.12 (c) 直流偏壓為 7V 時，白光 OLED 的振幅頻率響應，實線為模擬結果，圓點為實驗結果。

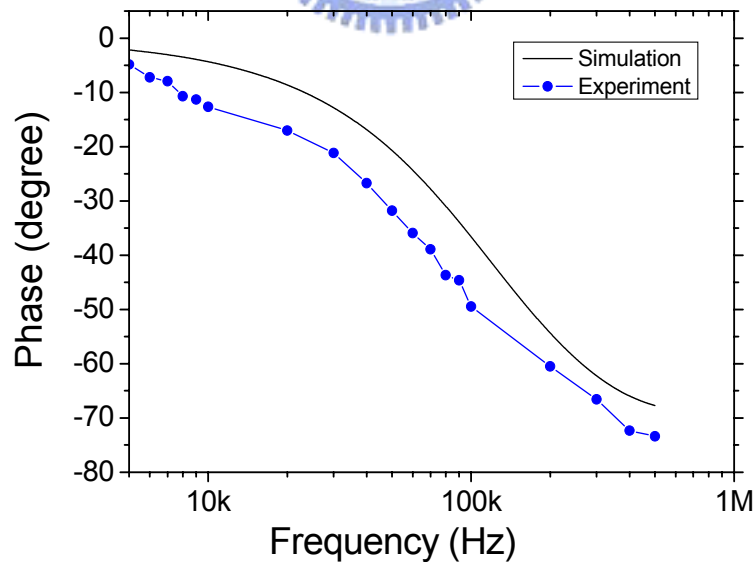



圖 5.1.12 (d) 直流偏壓為 7V 時，白光 OLED 的相位頻率響應，實線為模擬結果，圓點為實驗結果。

從上面的實驗我們成功地，利用直流與交流測試把 OLED 的小訊號模型參數粹取出來，而且將參數帶入模型後，用 PSPICE 模擬的結果與實驗作比對，發現模擬與實驗結果相當吻合，所以再經過長時間量測應該可以發現與 OLED 發光特性相關的參數，以便來推測 OLED 的使用壽命。但可能是 OLED 樣品製程上的問題，所以壽命上並不是很長，在要繼續往下作的時候樣品便都無法發光了，而這些不能發光的樣品會出現像是金屬析出的情形，詳細結果會在 5-2 節討論。從實用面來看，這個方法的缺點就是需要量測 B-I-V 與頻率響應，再經過計算把參數粹取出來，過程比較複雜而且所需時間較久，因此如果能夠從 OLED 的發光物理機制上粹取出這些參數，應該是最直接且有效的方法。

5-1-3 OLED 的方波響應



在 2-2-3-2 節中提到，當外加梯形波的電壓訊號在往下降至 0 V 時，電流與發光會有突起的現象，而我們在直流電壓為 5 V，交流電壓 $V_{pp} = 2V$ ，波形重複頻率為 100 Hz，工作週期(duty circle)為 20%。本節中為了量測到較準確暫態光訊號，希望可以量測到較微弱的訊號，我們使用 New Focus 2151 可見光範圍(300 nm~1050 nm)光偵測器，偵測器大小直徑為 1 mm，頻率響應最高在 1000 Hz。但是避免因為 OLED 樣品的發光均勻性的問題，所以在前面加上一個兩孔積分球 [附錄 D]。偵測器的位置因為了避免出現飽和與偵測器體積的關係，把偵測器放在積分球外面。圖 5.1.13 為實驗裝置照片，這個實驗是在暗室中進行。圖 5.1.14 為輸入電壓與電流及發光波形。OLED 的發光響應與輸入電壓上會有延遲現象 [26]，而在電壓下降時，OLED 的亮度在下降後又會出現突起的現象，有可能是因為外加電壓往下降的時候，ETL 中的電子還沒來得及離開集中在 ETL 與 HTL 的介面吸引電洞，產生覆合而發光 [27]。

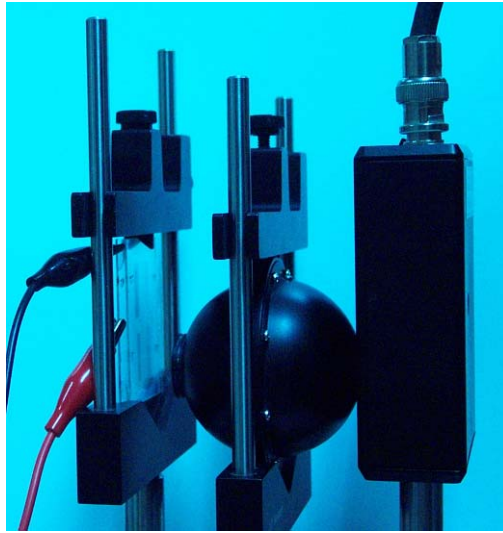


圖 5.1.13 OLED 方波響應量測實驗裝置照片。

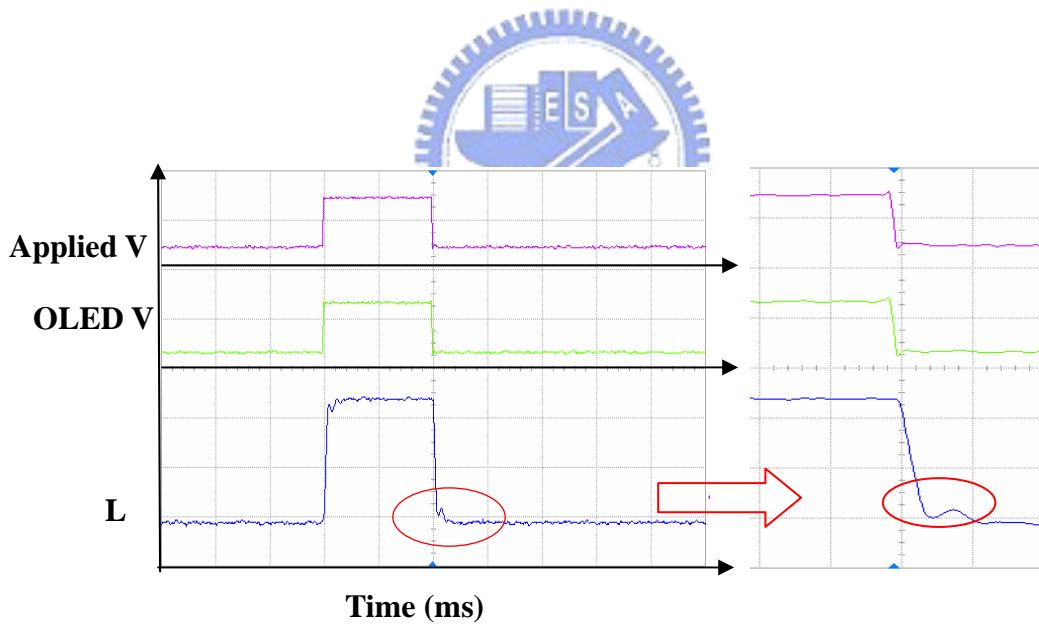


圖 5.1.14 輸入電壓與 OLED 跨壓及亮度波形。從上至下分別為外加電壓波形、OLED 跨壓波形、亮度波形。

5-2 簡化的 OLED 電路模型

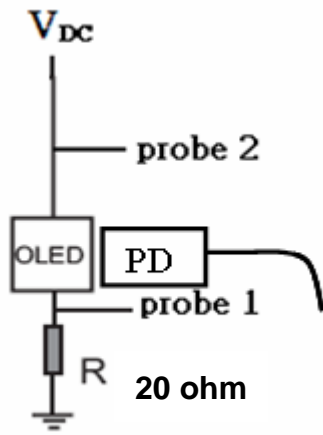
在基本理論中我們預計是要利用交流的梯形波來作參數粹取與陷阱分析，但是因為本節使用的樣品為綠光 OLED 跟微波實驗用 OLED 在材料上雖然相同，但是製程條件並不一樣，所以兩者的光電特性會有所區別，與一般正常的樣品的結果相去甚大。而且我們使用的訊號產生器沒辦法產生梯形波，所以原本在 2-2-3-2 節 簡化的 OLED 電路模型中的電容參數粹取與 2-2-3-3 節陷阱分析，在本節中只作了直流 B-I-V 量測與 OLED 交流方波的暫態響應。

5-2-1 綠光 OLED 直流 B-I-V 量測

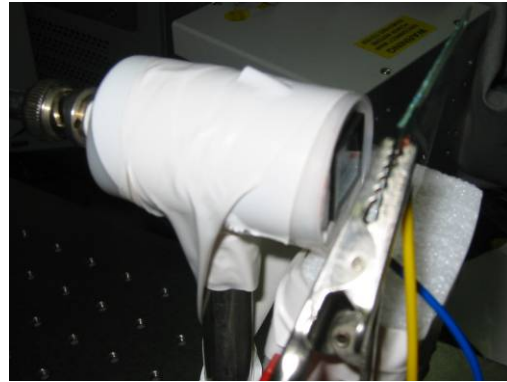
一般正常的 OLED 在 B-I-V 量測，應該不會出現不穩定的情形，但是由於這批樣品的穩定比之前來的差，即使是在一般操作下，都很容易就無法再發光了，而且在發光前電流會大幅度地上升，所以本小節將對這種個現象做仔細的探討。圖 5.2.1(a) 為實驗裝置示意圖，大致與圖 5.1.1 相同，圖 5.2.1(b)為實驗過程中 OLED 都是被箱子蓋住隔絕日光燈的干擾，不同之處是在於使用的 $20\ \Omega$ 外加電阻，且改用 HAMAMATSU 公司的光接收二極體 S2387-1010R [附錄 E]，有效量測區域為 $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ ，量測範圍從 320 nm 到 1100 nm，效率最高的波長為 960 nm，同樣地這個光接收二極體沒有經過校正，直接將偵測器兩端接到示波器量測電壓。直流電壓源改為可程式化的電壓源 GW PST-3202，最大電壓為 32 V，最大輸出電流為 2 A，量測的方法是每隔 0.5 秒加 0.5 V 的電壓到 10 V，再從 10 V 每隔 0.5 秒降 0.5 V 到 0 V，為一週期。圖 5.2.2 (a)與圖 5.2.2 (b)分別為第一個週期的外加電壓上升部分與下降部分時 OLED 上的跨壓。圖 5.2.3 (a)與圖 5.2.3 (b)則為第一週期外加電壓上升部分與下降部分時，流經 OLED 的電流，圖 5.2.4 (a)與圖 5.2.4 (b)為第一週期外加電壓上升部分與下降部分時，OLED 的發光亮度。

依此順序圖 5.2.5 (a)、(b)，圖 5.2.6 (a)、(b)與圖 5.2.7 (a)、(b)分別為電壓訊號第二週期 OLED 的跨壓，電流與發光訊號；圖 5.2.8 (a)、(b)，圖 5.2.9 (a)、(b)與圖 5.2.10 (a)、(b)，則為第三週期 OLED 的跨壓，電流與發光訊號。每個週期間隔不超過十秒。

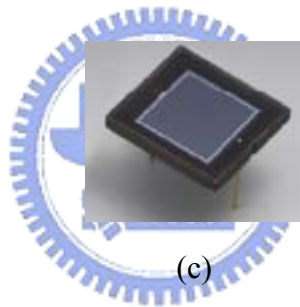
從圖 5.2.3 (a)、圖 5.2.4 (a)，第一個週期的OLED跨壓與電流的曲線可以看出當外加電壓在 3 V左右的時候，OLED跨壓下降而電流急速上升，一直到外加電壓為 7.5 V時下降到一開始加壓時的線性趨勢，如圖 5.2.2 中的虛線，而且這三個週期I-V曲線都沒有出現臨界電壓的情形。出現這種情形有可能是加壓的過程中OLED樣品的等效的電阻開始變小，所以會出現電壓驟降與電流驟增的情形。而在OLED發光情形上，也是當電流驟增恢復的時候才開始發光而且亮度是突然上升。當電壓從 10 V降到 0 V的過程中，也會電壓與電流看到類似的趨勢，但是變化就比較和緩，OLED的發光亮度到了電流驟增的時候就沒有了。在第二週期電壓上升的期間，電壓驟降與電流驟增的區域更加擴大，從 2.5 V到 8.5 V都持續出現，而且在電壓下降的過程中，電流驟增的幅度也比第一週期要來的大。到第三週期的時候電流往升之後就沒再下降了，在亮度上跟前兩個週期比起來也是非常微弱，而且在這之後，用慢慢加壓的方式OLED就沒辦法發光了，只能一次就加到 6 V以上才會發光。圖 5.2.11 (a)、(b)、(c)為一次加到 10 V後再以每 0.5 秒下降 0.5 V地降到 0 V的OLED跨壓、電流與亮度曲線。OLED在電壓下降的過程中，電流驟降又比第一與第二週期來得早，大約是在 5 V就會出現，而且電流上升的幅度也變得更大。在經過幾次重複直接將電壓加到 10 V之後，OLED就不能再發光了，而且如同其他無法發光的樣品一樣會出現銀白色小點，圖 5.2.12 照片圓圈中為綠光樣品銀白色小點，這些白點有點像是金屬從有機層中析而結晶，而且這批樣品都有相同的問題，因此我們推測這種銀白色小點可能是因為Alq₃中的Al產生結晶，在某些區域出現類似導通的通道。



(a)



(b)



(c)

圖 5.2.1 (a)直流 B-I-V 實驗量測架構示意圖，(b)實驗系統照片，(c) 光偵測器照片。

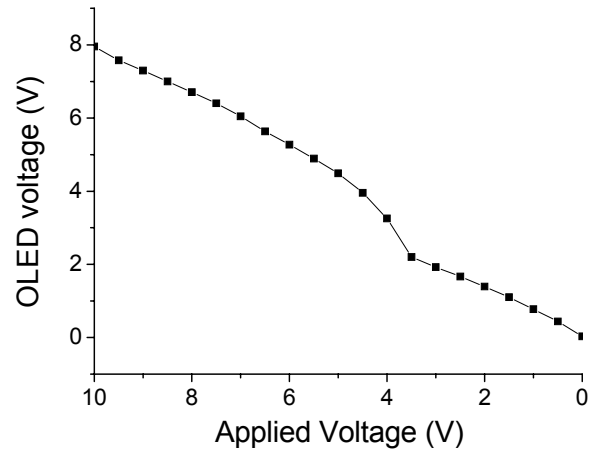
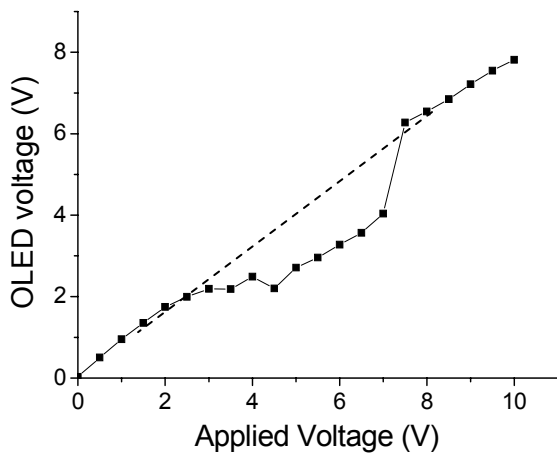


圖 5.2.2 (a)與圖 5.2.2 (b)分別為第一週期的外加電壓上升部分與下降部分時 OLED 上的跨壓。

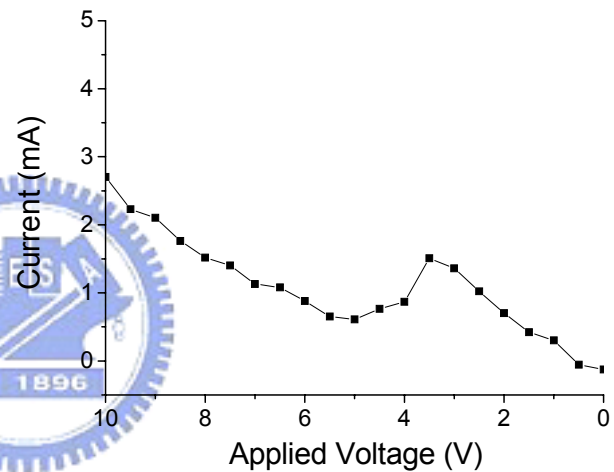
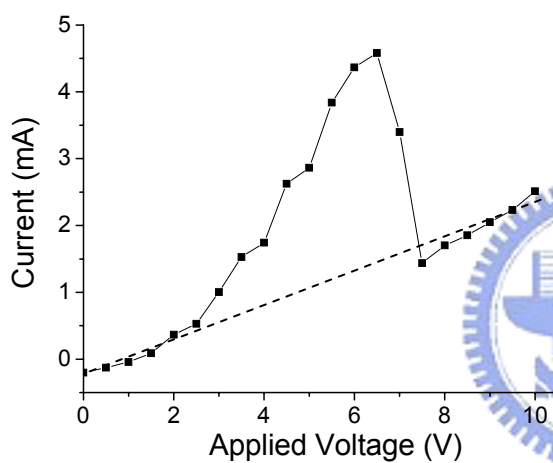


圖 5.2.3 (a)與圖 5.2.3 (b)則為第一週期外加電壓上升部分與下降部分時，流經 OLED 的電流。

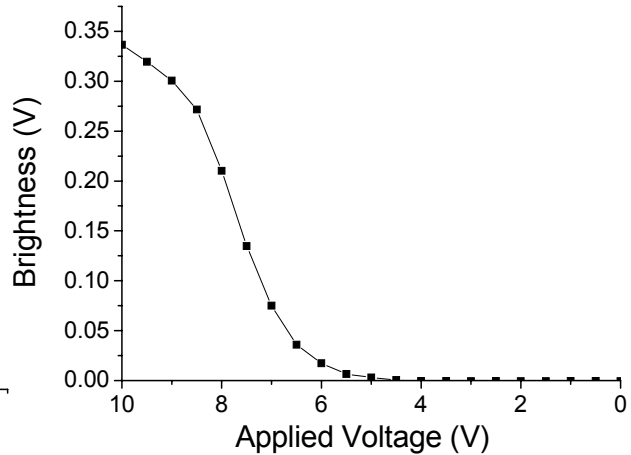
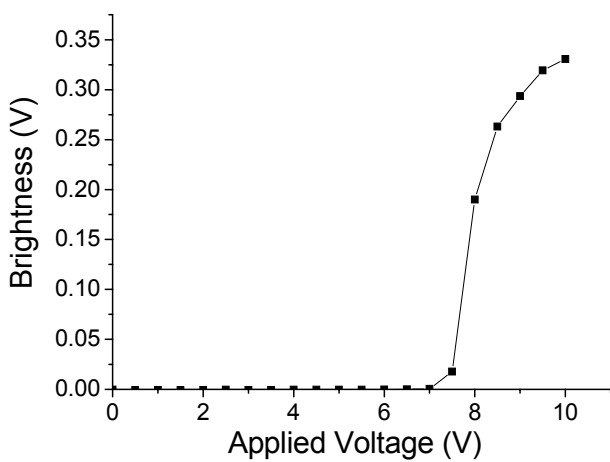


圖 5.2.4 (a)與圖 5.2.4 (b)為第一週期外加電壓上升部分與下降部分時，OLED 的發光亮度。

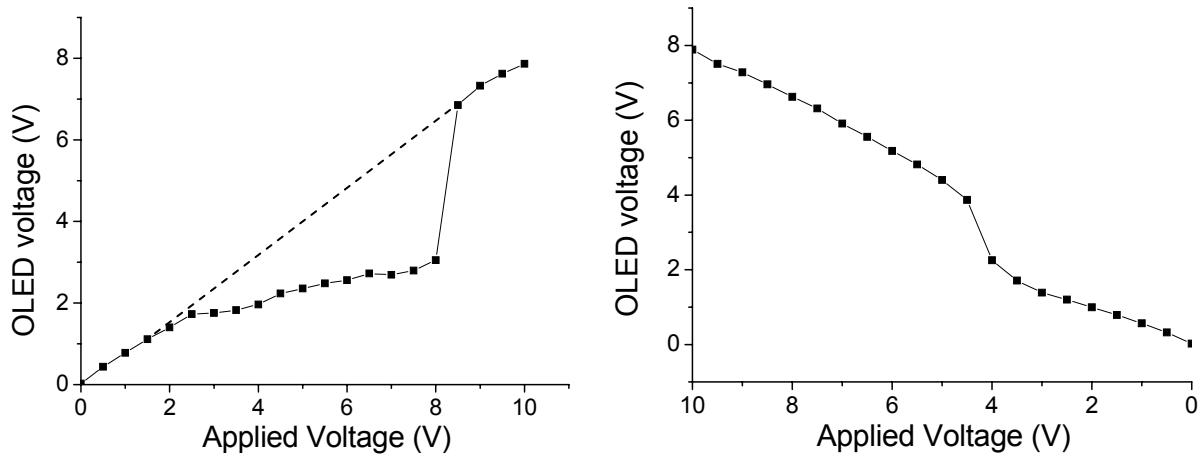


圖 5.2.5 (a)與圖 5.2.5 (b)分別為第二週期的外加電壓上升部分與下降部分時 OLED 上的跨壓。

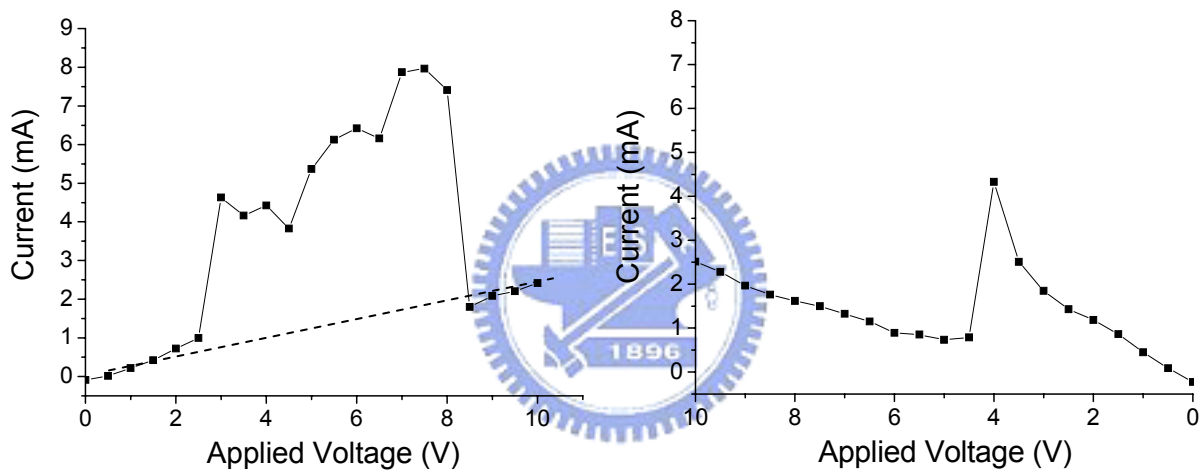


圖 5.2.6 (a)與圖 5.2.6 (b)則為第二週期外加電壓上升部分與下降部分時，流經 OLED 的電流。

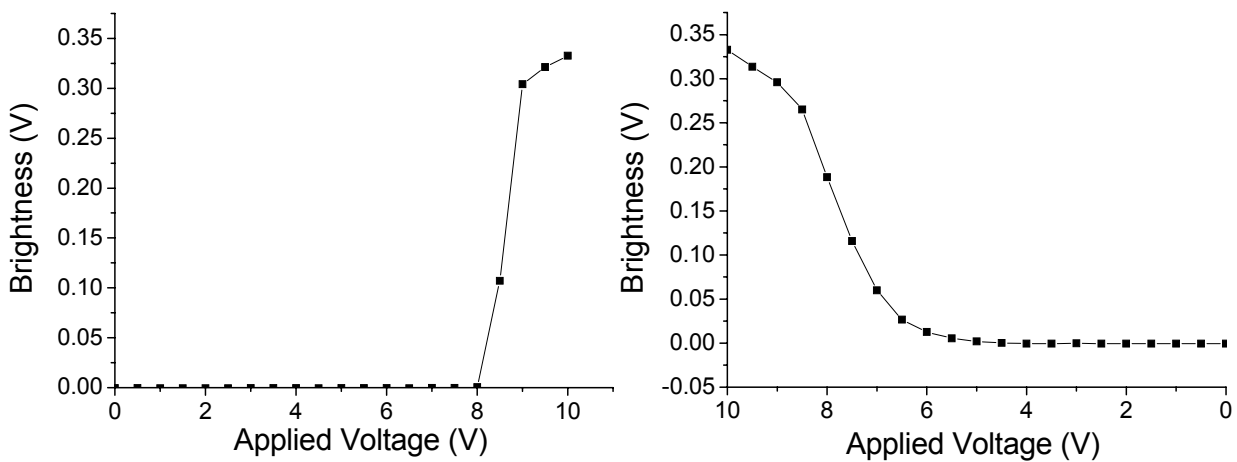


圖 5.2.7 (a)與圖 5.2.7 (b)為第二週期外加電壓上升部分與下降部分時，OLED 的發光亮度。

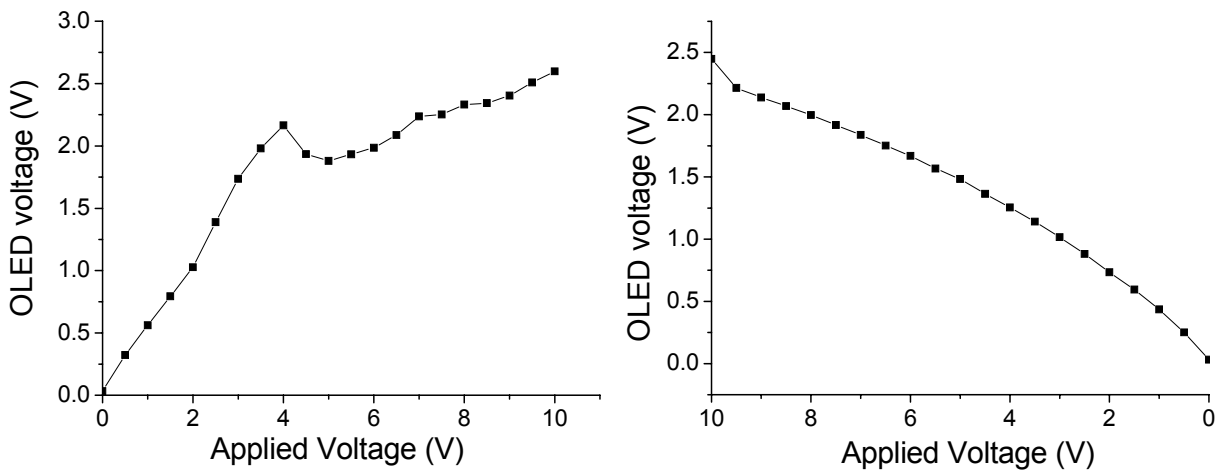


圖 5.2.8 (a)與圖 5.2.8 (b)分別為第三週期的外加電壓上升部分與下降部分時 OLED 上的跨壓。

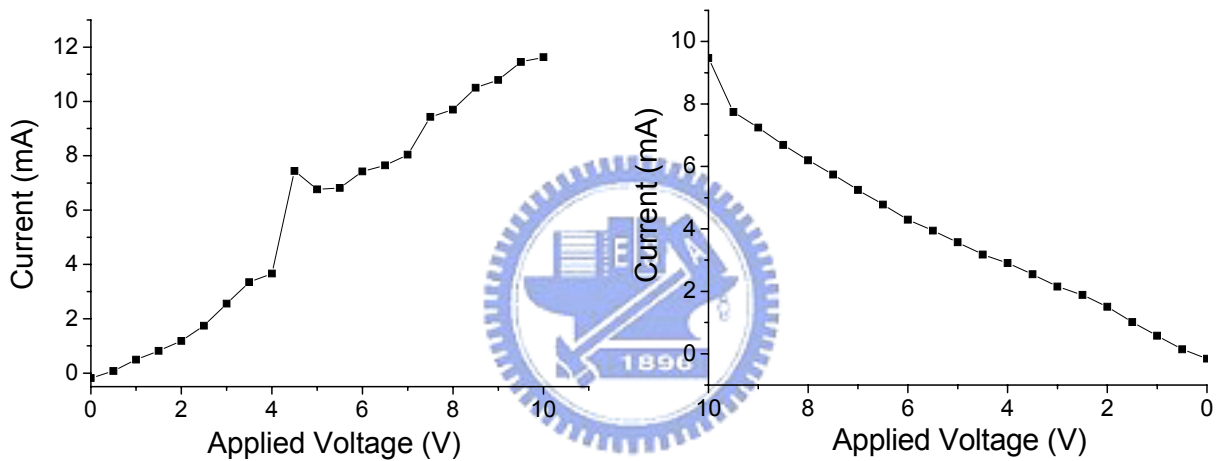


圖 5.2.9 (a)與圖 5.2.9 (b)則為第三週期外加電壓上升部分與下降部分時，流經 OLED 的電流。

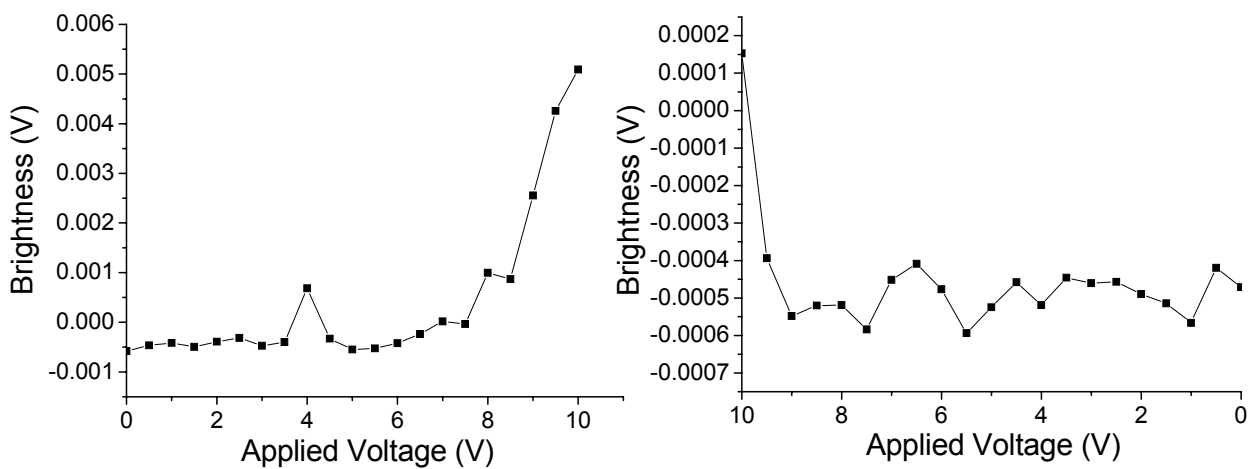
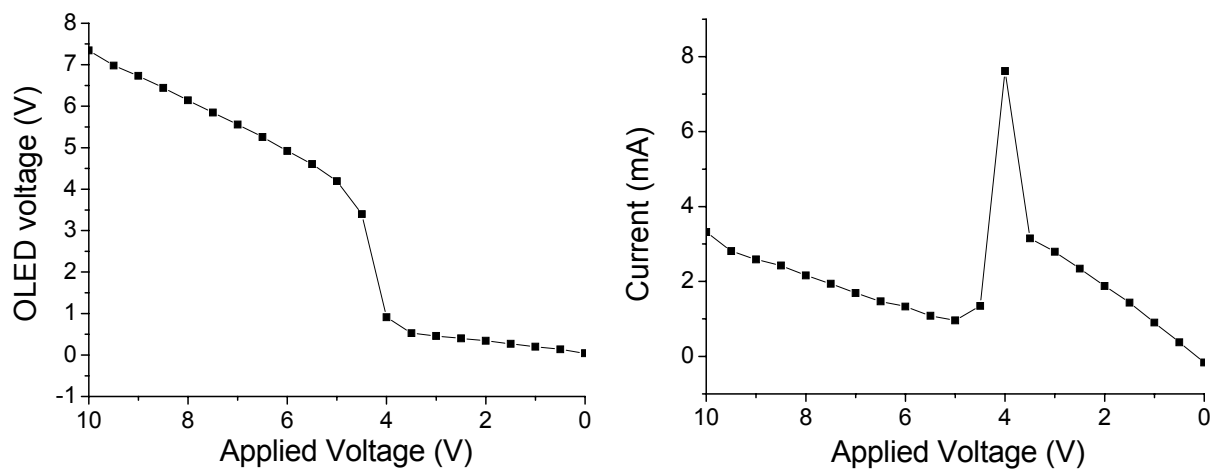
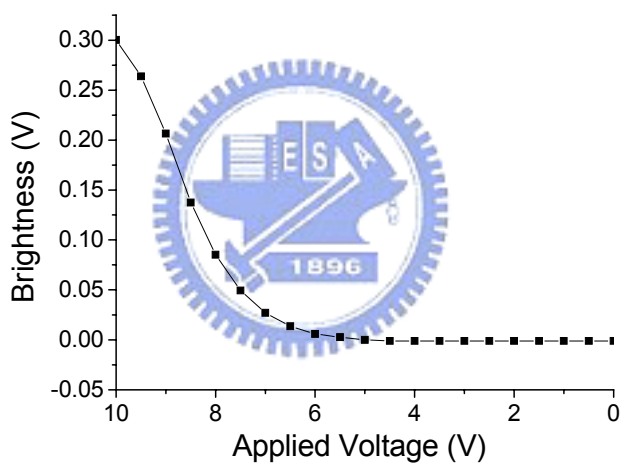


圖 5.2.10 (a)與圖 5.2.10 (b)為第三週期外加電壓上升部分與下降部分時，OLED 的發光亮度。



(a)

(b)



(c)

圖 5.2.11 (a)、(b)、(c) 分別為在三個週期後，一次加到 10 V 後再以每 0.5 秒下降 0.5 V 地降到 0 V 的 OLED 跨壓、電流與亮度曲線。

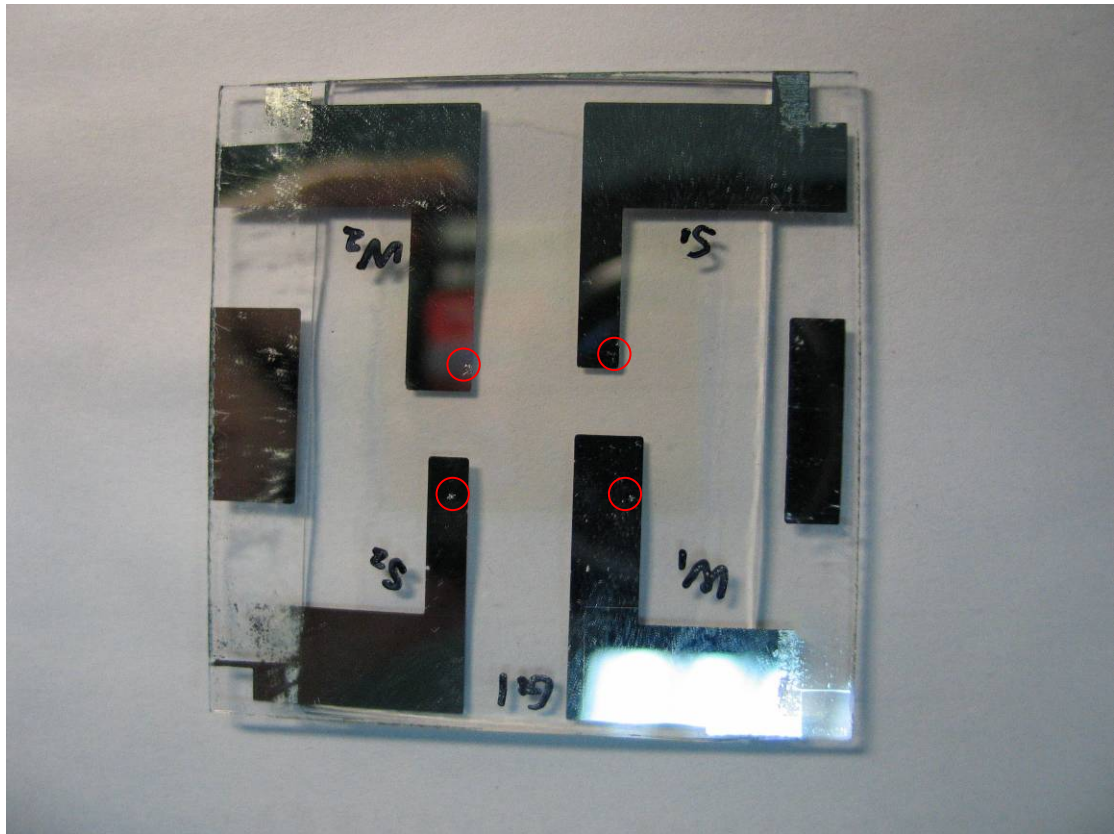


圖 5.2.12 無法再發光的綠光 OLED 樣品照片，圓圈中間為類似金屬析出的情況。

在這幾個實驗中可以發現到，這批樣品在穩定升壓的過程中，電阻會突然變小使得電流突然上升，但同時亮度卻沒有跟著上升，反而是在電流下降為原來的趨勢時才開始發光。因此推測其物理機制可能是在還未發光前，所加的電壓造成的電流通路並不是流經可以讓 OLED 發光的區域，反而是經過樣品中缺陷區域，而這些缺陷區的電阻小於正常的 OLED，一直外加電壓夠大時，正常 OLED 開始導通，電流才恢復正常。而且缺陷區在導通的過程中，應該是會使缺陷區變得更嚴重，所以在第二週期時，電流驟升的範圍就加大了，在經過幾次操作，就只有一次加較高的電壓，才能讓 OLED 發光，再操作一段時間 OLED 就無法再發光了而樣品上便會出現肉眼可見的銀白色小點。因此這些白點有可能就是原來樣品中的微小缺陷擴大後的結果。然而為何在前兩個週期電流會驟增，而第三週期之後，必須一次加高電壓才能讓 OLED 發光，這邊提供一個可能的解釋：

第一週期 0~10 V： 假設缺陷區與可發光區的導通，都有一個電位障，超過電位障之後就會大量導通，其中缺陷區會比發光區來得小。所以當電壓慢慢上升超過缺陷區的電位障時，電流就會大量導通，而在電壓持續增加超過發光區的電位障時，因為發光區的面積比較大，大部分電子與電洞會開始往發光區走並開始發光。但可能是因為發光區會有陷阱的影響，所以電流並沒有增加反而是下降。

第一週期 10~0 V： 因為開始下降的過程中 OLED 發光區已經處於導通的狀態，所以電位障會比從 0 V 上升時還來得低，所以電流出現驟升的電壓會比 0~10 V 時低。相同地在缺陷區可能也有相同的現象，因為當電壓為 0~4 V 時電流對電壓的斜率 10~0 V 的狀況會比 0~10 V 來得陡。

第二週期： 基本趨勢與第一週期相同，但是因為之前操作過程可能會讓缺陷區擴大，所以電流驟升的區域區域會變大，電流值也會變大。

第三週期： 因為缺陷擴大得太大，以致於雖然外加電壓大於發光區的電位障，但是通過發光區的電流還是不夠，所以無法達到像第一、二週期的亮度。

一次加壓至 10 V： 當瞬間加至 10 V 時，已經超過發光區與陷區的電位障，然而發光區的面積還是比較大，對載子的吸引力仍大於缺陷區，所以還是會發光。但是再操作幾次後，缺陷區擴大到比發光區對載子的吸引力大時，那此 OLED 樣品將無法發光，而且會出現肉眼可見的銀白色小點。

從以上的實驗可以發現，這批樣品在直流的 B-I-V 量測很不穩定，因此在電容參數的粹取上變數太大，無法適用於一般情形。但是在這三個週期的量測過程中，也推論出當 OLED 出現電流驟增的情形下可能的原因，如果能結合 OLED 製程參數的調控，或許可以作為 OLED 製程在改善使用壽命的方法。

5-2-2 綠光 OLED 方波響應

陷阱分析的方法，主要是利用輸入交流梯形電壓波，電壓範圍約從-10 V 到 10 V，斜邊部分斜率大概在 $0.1\text{V}/\mu\text{s}$ [10]。但是所用的波形產生器 HP 33120A 沒辦法調整上升與下降時間，所以在這邊跟 5-1-3 節中一樣量測方波響應，觀察 OLED 的方波響應是否如預期一樣。本節的實驗條件是把直流偏壓調為零， V_{pp} 為 14 V，操作頻率為 20 Hz。圖 5.2.13 (a) 為外加電壓波形圖，圖 5.2.13 (b) 為 OLED 的電流波形，圖 5.2.13 (c) 為亮度波形圖，可以比較外加電壓與亮度波形是否有延遲的現象。從圖 5.2.13 (c) 可以看出這批 OLED 樣品中，在外加電壓下降後並沒有出現亮度突起的現象，反而是持續下降到外加電壓再度上升處，而且如果改變波形的工作週期(duty circle)，從原本各 50%到 40%，可以發現亮度波形，還是會持續下降到電壓再度上升處。圖 5.2.14 (a)~(c) 為 duty circle = 40%時的外加電壓、電流、亮度波形，而且外加電壓振幅為 8V，即超過 OLED 發光的電位障時，也會出現這樣的情形。這個現象可能是樣品裡面的有機層反應不一致的關係，所以這些突波疊加的結果變成圖 5.2.13 (c)的亮度響應。

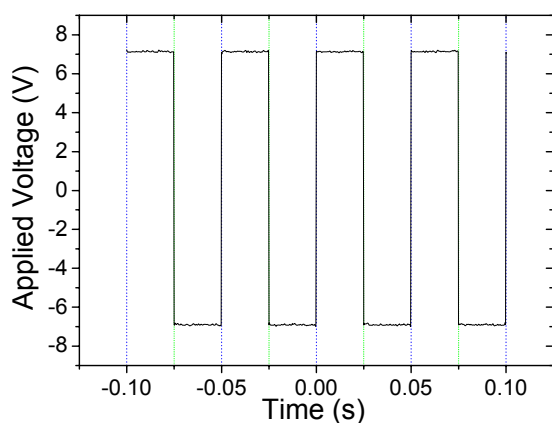


圖 5.2.13 (a) 振幅為 7V 時，綠光 OLED 外加電壓波形圖。

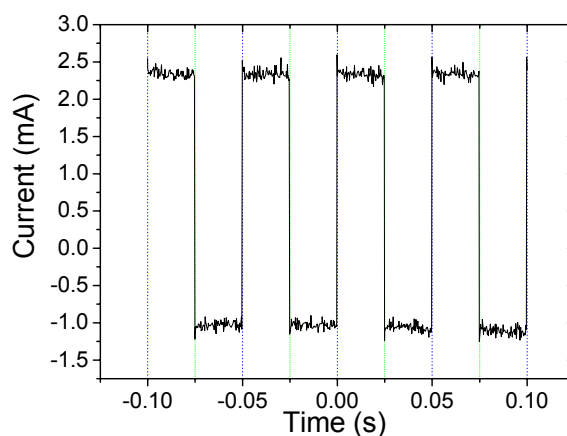


圖 5.2.13 (b) 振幅為 7V 時，綠光 OLED 的電流波形圖。

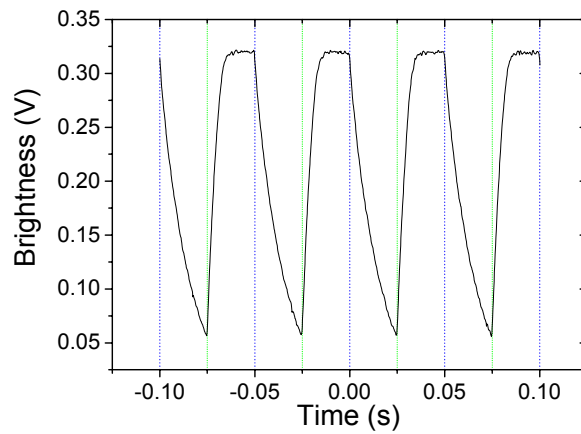


圖 5.2.13 (c) 振幅為 7V 時，綠光 OLED 外加電壓與亮度波形圖。

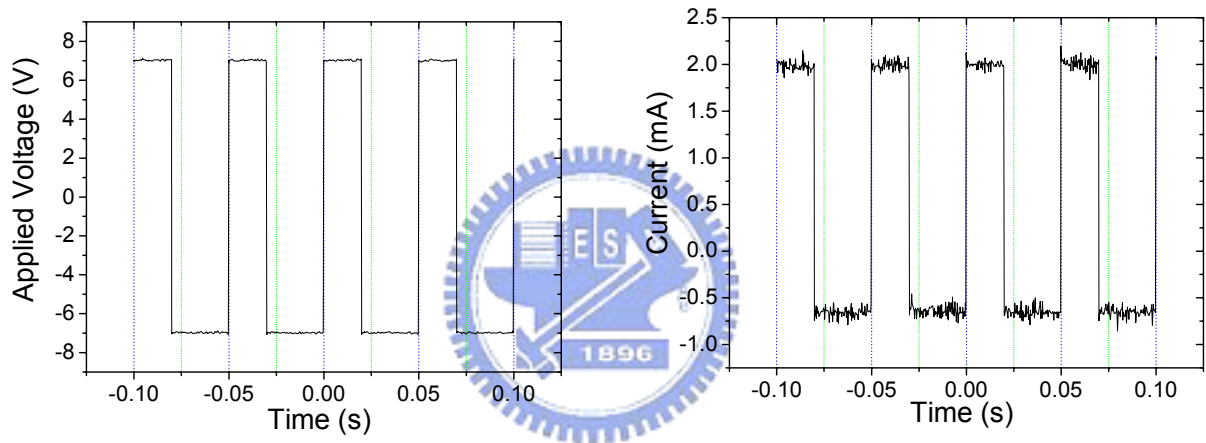


圖 5.2.14 (a) Duty circle = 40% 的綠光 OLED 外加電壓波形圖。

圖 5.2.14 (b) Duty circle = 40% 的綠光 OLED 的電流波形圖。

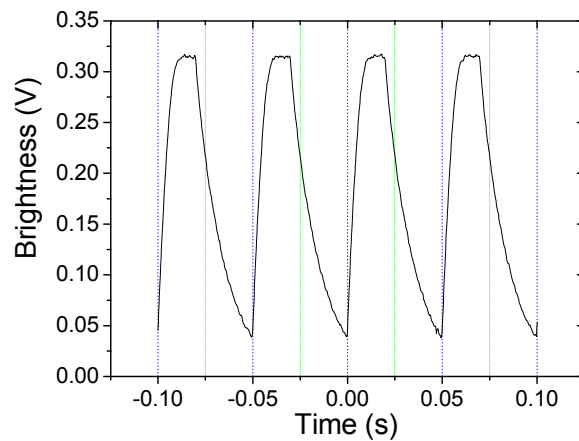


圖 5.2.14 (c) Duty circle = 40% 的綠光 OLED 外加電壓與亮度波形圖。

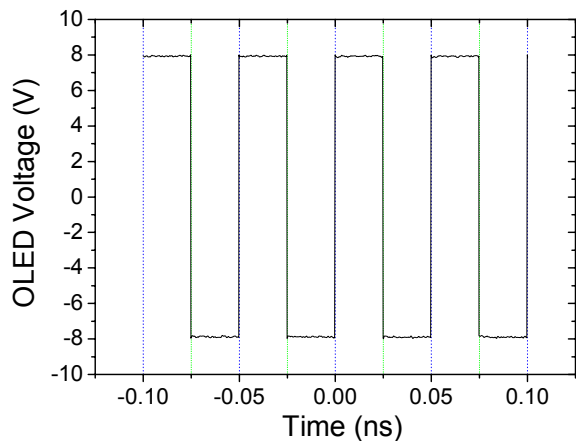


圖 5.2.15 (a) 振幅為 8V 時，綠光 OLED 外加電壓波形圖。

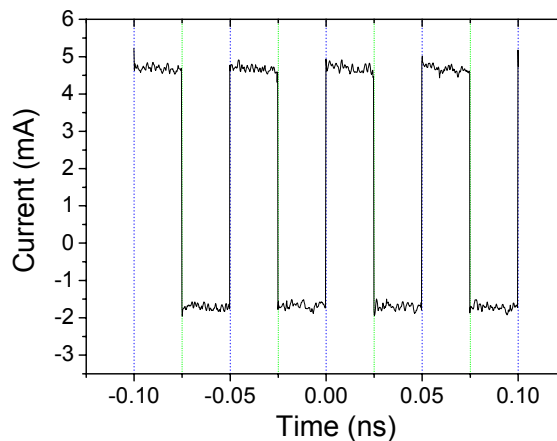


圖 5.2.15 (b) 振幅為 8V 時，綠光 OLED 的電流波形圖。

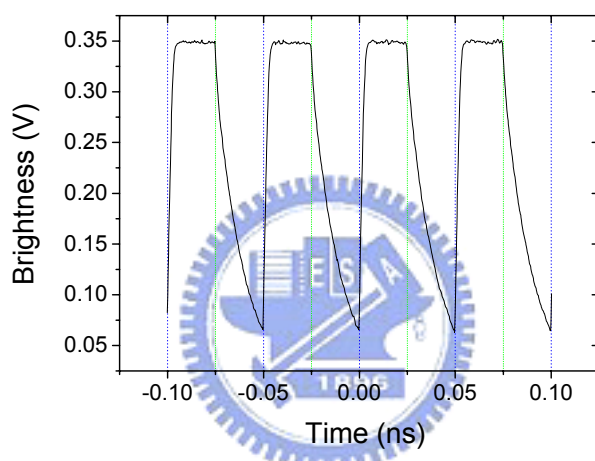


圖 5.2.15 (c) 振幅為 8V 時，綠光 OLED 外加電壓與亮度波形圖。

5-3 OLED 的模型化與參數粹取分析與討論

本章從兩個方向來研究 OLED 的模型化與參數粹取，第一個是小訊號電路模型，第二個是簡化的 OLED 等效電路模型與陷阱分析來探討。小訊號電路模型的方法假設 OLED 的發光會與電特性參數相關，最好的情形是希望能夠在 OLED 出廠的時候就能準確地預測出其使用壽命。在我們的實驗中成功地利用直流 I-V 量測與 OLED 的頻率響應，將 OLED 小訊號模型參數粹取出來，並且用 PSPICE 模擬其頻率響應特性與實驗所得結果吻合。但由於缺乏可使用的 OLED

樣品，所以在 OLED 小訊號模型參數與發光特性的關聯性就沒有繼續作下去。

第二個方法是利用直流B-I-V量測與交流梯形電壓波量測B-I-V曲線，利用兩者的偏差值，將OLED的ETL與HTL的電容參數粹取出來，這個方法也是用直流與交流量測才能把參數粹取出來，陷阱分析也是需要梯形波來將OLED中陷阱的數量估計出來。本章中由於樣品的不穩定性且沒有梯形波電壓波產生器，所以沒有辦法將OLED的電容參數粹取出來，不過因此我們也發現到當OLED樣品在直流操作下出現電流驟增的情形，有可能是因為OLED有機層的材料缺陷使得有機層的Al從Alq₃中析出結晶，出現類似導通的通道，使得從有機層通過的電流遠小於發光區的OLED，因而無法發光。而在陷阱分析上受制於無法產生出梯形波，所以只作到方波的量測，觀察到OLED發光在電壓下降的時候會持續到下一個上升電壓處，有可是OLED材料均勻性不佳，所出現的疊和結果。

雖然小訊號模型可以將 OLED 參數粹取來，但是因為模型化的方式簡單也比較缺乏物理意義，所以比較不能夠快速地量測並且反映出樣品的好壞，而簡化的 OLED 等效電路模型與陷阱分析的參數是比較具有物理意義，應該會是比较好的方法，但是受限於樣品與訊號源，沒有粹取出這些參數。

第六章 總結

6-1 結論

在本論文中嘗試以高頻的微波與低頻電路來測試 OLED 樣品的響應，希望能夠從中發現能夠反映出 OLED 的發光特性的參數，在微波量測中使用兩種方法來量測：第一種是直接以微波天線來量測 OLED 的吸收頻譜，第二種是以尖端探針讓微波經過 OLED 的兩極量測吸收頻譜。但是從這些量測的結果看來，在大於 50 MHz 的微波無法分辨出不同色光的 OLED 樣品，對於可以發光與無法發光的 OLED 樣品也無法反映出之間的差異。但是在使用 SMA 接頭為微波天線的量測實驗中，發現到在 OLED 的較明顯的吸收頻段會有異常傳波現象，當我們將頻域的量測轉為實域的脈衝傳波時，脈衝會超越參考波，也就是脈衝的群速度會小於零。而為了證實有機層會有脈衝超前的現象，我們使用商用的拇指天線量測藍色 OLED 樣品中的有機發光層也會出現脈衝群速度小於零的現象。而且在 OLED 樣品中因為外層的玻璃基板與覆蓋層在微波波段幾乎是透明的，所以我們有效的厚度比其之前的文獻中小很多，所以相對應的群速度會比較大。

低頻的電路測試中，我們試圖建立出 OLED 的電路模型，並且與 OLED 的發光特性作連結。其中我們使用小訊號電路模型與簡化的 OLED 電路模型兩種法來測試。在小訊號電路模型中，我們將 OLED 視為 RC 的等效電路，成功地藉由直流 I-V 量測與頻率響應量測將 RC 參數粹取出來，並且以 PSpice 電路模擬軟體驗證參數的可靠性。但是因樣品的因素，沒有繼續將這些參數與 OLED 發光特性作連結。在簡化的 OLED 電路模型中，將 OLED 的 ETL 與 HTL 的電路特性以電容來取代，經由 AC 梯形波量測與直流 B-I-V 可以將電容參數粹取出來，並且估計出 OLED 樣品中的陷阱的數量。但是因為樣品與良好的波形產生器的緣故，我們在直流的 B-I-V 量測中就發現到在 OLED 為發光前會出現電流驟增的現象。經過進一步的研

究後，我們發現到有可能是因為OLED有機層的缺陷區產生另外的通道，使得通過OLED的電流驟增。當OLED會出現這種情形的狀況下，正常的加壓過程就可能會讓缺陷區擴大出現銀白色小點，以致使得OLED無法再發光。因此我們推測銀白色小點可能是因為Alq₃層中的Al析出結晶，造成的通道。而且在我們的所有實驗過程中，無法發光的OLED幾乎都會出現銀白色的小點。所以如果能夠在正常的樣品定義出缺陷區的情形，應該也可以作為檢驗製程的穩定度的方法。

6-2 未來工作

雖然以小訊號電路模型的方法可以粹取 OLED 的電路參數，但是因為使用的模型與實際上的 OLED 的物理機制有差異，所以可能不能夠很精確的描述 OLED 的發光特性。而從簡化的 OLED 電路模型中，雖然沒有粹取出電路參數，但是因為與 OLED 的結構特性較相似，所以在評估 OLED 的使用壽命上，可能會比小訊號電路模型來得更精確。



參考文獻

- [1] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes," *Applied Physics Letters*, Vol. **51**, pp. 913-915, 1987.
- [2] Z. Deng, S. T. Lee, D. P. Webb, Y. C. Chan, W. A. Gambling, "Carrier transport in thin films of organic electroluminescent materials," *Synthetic Metals*, Vol. **107**, pp. 107, 1999.
- [3] R. G. Kepler, P. M. Beeson, S. J. Jacobs, R. A. Anderson, M. B. Sinclair, V. S. Valencia, and P. A. Cahill, "Electron and hole mobility in tris(8-hydroxyquinolinolato-N1,O8) aluminum," *Applied Physics Letters*, Vol. **66**, pp. 3618-3620, 1992.
- [4] S. A. Van Slyke, C. H. Chen, and C. W. Tang, "Organic electroluminescent devices with improved stability," *Applied Physics Letters*, Vol. **69**, pp. 2160-2162, 1996.
- [5] M. Stößel, J. Staudigel, F. Steuber, J. Blässing, and J. Simmerer, "Space-charge-limited electron currents in 8-hydroxyquinoline aluminum," *Applied Physics Letters*, Vol. **76**, pp. 115-117, 2000.
- [6] A.A. Shoustikov, You Yujian, and M.E. Thompson, "Electroluminescence color tuning by dye doping in organic light-emitting diodes" *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. **4**, (1), pp. 3-13, 1998.
- [7] P. E. Burrows, Z. Shen, V. Bulovic, D. M. McCarty, and S. R. Forrest, "Relationship between electroluminescence and current transport in organic heterojunction light-emitting devices," *Journal of Applied Physics*, Vol. **79**, pp. 7991-8006, 1996.
- [8] M . Matsumura and Y. Jinde, "Voltage dependence of light-emitting zone in

- aluminum-hydroxyquinoline layers of organic heterojunction EL devices,” IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. **44**, (8), pp. 1229-1231, 1997.
- [9] C. W. Tang, “An Overview of organic electroluminescent materials and devices,” Journal of the SID, Vol. **5**, (1), pp. 11-14, 1997.
- [10] B. J. Norris, Characterization of Organic Light-Emitting Diode, The Thesis of Master Degree of Oregon State University, USA.
- [11] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 1999.
- [12] L. Brillouin, Wave Propagation and Group Velocity, Academic Press, New York, 1960.
- [13] S. Chu and S. Wong, Linear pulse propagation in an absorbing medium, Phys. Rev. Lett. **48**, 738-741, 1982.
- [14] E. E. Mikhailov., V. A. Sautenkov, I Novikova, and G. R. Welch, “Large negative and positive delay of optical pulses in coherently prepared dense Rb vapor,” Physical Review A **69**, 0638081, 2004.
- [15] O. F. Siddiqui, S. J. Erickson, G. V. Eleftheriades, and M. Mojahedi, “Time-Domain Measurement of Negative Group Delay in Negative-Refractive-Index Transmission-Line Metamaterials,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. **52**, (5), 2004.
- [16] D. R. Solli, C. F. McCormick, C. Ropers, J. J. Morehead, R. Y. Chiao, and J. M. Hickmann, “Demonstration of superluminal effects in an absorptionless, nonreflective system,” Physical Review Letters, Vol. **91**, (14), 143906, 2003.
- [17] D. R. Solli, C. F. McCormick, R. Y. Chiao, S. Popescu, and J. M. Hickmann, “Fast light, slow light, and phase singularities: A connection to generalized weak values,” Physical Review Letters, Vol. **92**, (4), 043601, 2004.
- [18] S. Longhi, M. Marano, and P. Laporta, “Superluminal optical pulse propagation

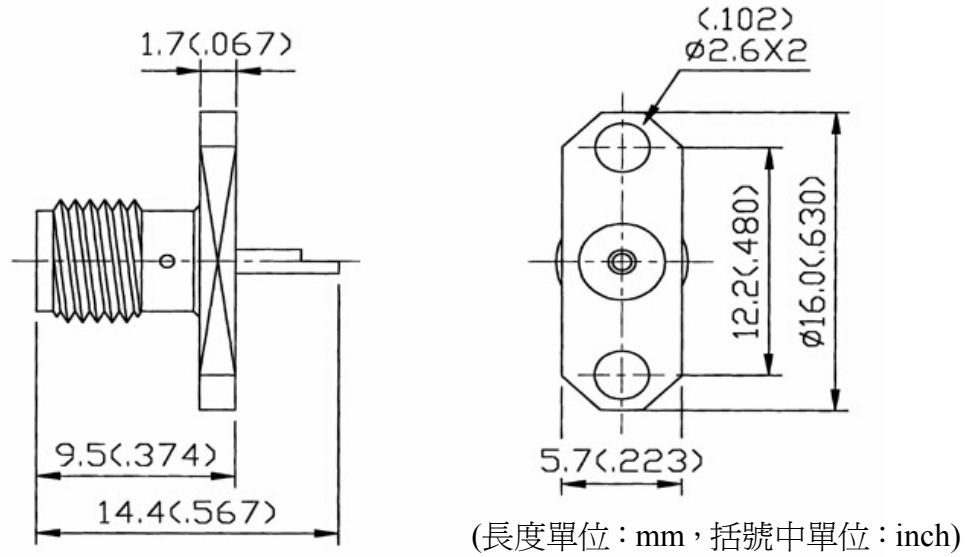
- at 1.5 μm in periodic fiber Bragg gratings,” *Physical Review E*, Vol. 64, 055602, 2001.
- [19] S. Longhi, M. Marano, M. Belmonte, and P. Laporta, “Superluminal pulse propagation in linear and nonlinear photonic grating structures,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 9, (1), pp. 4-16, 2003.
- [20] Y. S. Lee, J. H. Park, J. S. Choi, and J. I. Han, “Admittance Spectroscopic Characteristics and Equivalent Circuit Modeling of Small Molecule-Based Organic Light Emitting Diodes,” *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1*, Vol. **42**, pp. 2715 – 2718, 2003.
- [21] E. Hecht, *Optics*, 4th ed., Addison Wesley, pp. 294-302, 2002.
- [22] Bahaa. E. A. Saleh, M. C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, John Wiley & Sons, pp. 179-181, 1991.
- [23] K. T. McDonald, “Negative group velocity,” *American Journal of Physics*, Vol. 69, (5), pp. 607-614, 2001.
- [24] D. Zou, M. Yahiro, and T. Tsutsui, “Effects of reverse-bias on device performance in organic light emitting diodes,” *Journal of the SID*, 1998. in press.
- [25] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, pp.196-199, 1998.
- [26] S. Barth, P. Müller, H. Riel, P. F. Seidler, W. Rieß, H. Vestweber, and H. Bässler, “Electron mobility in tris(8-hydroxy-quinoline)aluminum thin films determined via transient electroluminescence from single- and multilayer organic light-emitting diodes,” *Journal of Applied Physics*, Vol. **89**, (7), pp. 3711-3719, 2001
- [27] B. Ruhstaller, S. A. Carter, S. Barth, H. Riel, W. Riess, and J. C. Scott, “Transient and steady-state behavior of space charges in multilayer organic

light-emitting diodes,” Journal of Applied Physics, Vol. **89**, (8), pp. 4575-4586,
2001

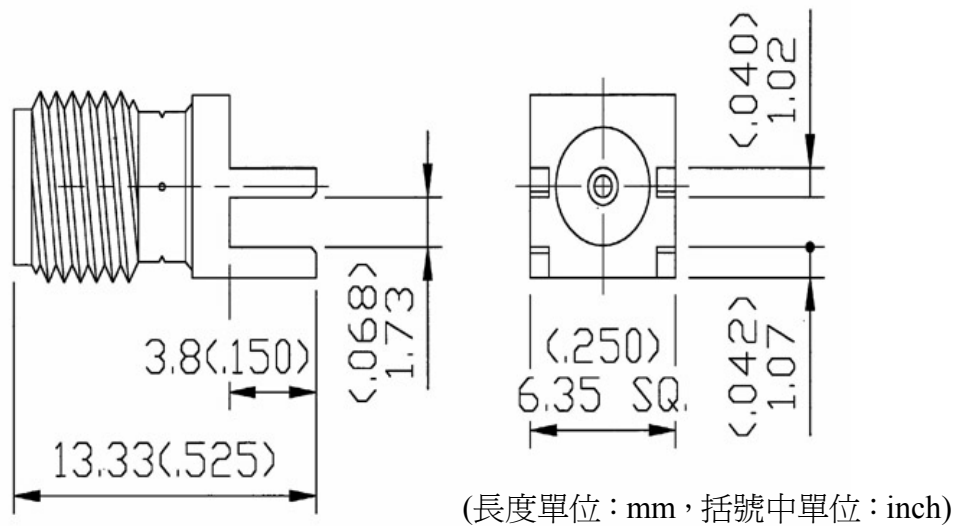


附錄 A：SMA 接頭

阻抗 $50\ \Omega$ 的 2 Hole Flange Jack Receptacle SMA 接頭



阻抗 $50\ \Omega$ 的 End Launch Jack Receptacle SMA 接頭

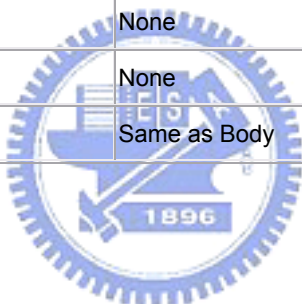


Electrical :

| | |
|-----------------|--|
| Impedance | 50 ohm |
| Frequency Range | 0 to 18.0 GHz • for RG-402 & RG-405 semi-rigid cable-0 to 18.0 GHz • for flexible cable→max operation frequency of cable per MIL-C-17 (12.4 GHz max) |

Material :

| | Material | Plating |
|----------------|-------------------------|---------------------------------|
| Connector Body | Stainless steel | Passivated or gold |
| | Brass | Nickel or gold |
| Center Contact | Male:Brass | 50 μ " gold over 100 μ " nickel |
| | Female:Beryllium Copper | 50 μ " gold over 100 μ " nickel |
| Insulation | Teflon | None |
| Gasket | Silicone Rubber | None |
| Crimp Ferule | Annealed Copper | Same as Body |



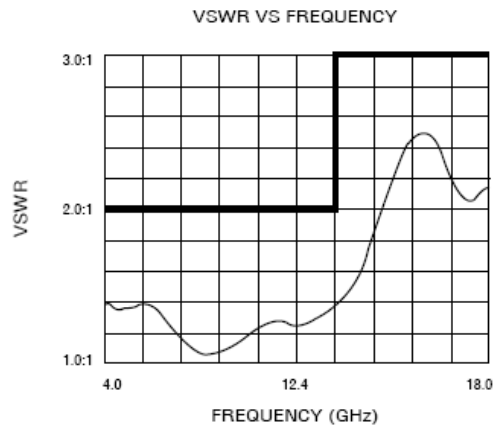
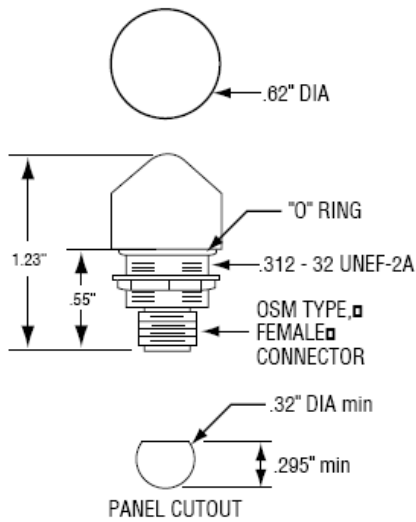
附錄 B：C-Band, X-Band, and Ku-Band **Stub Antenna**

拇指形天線

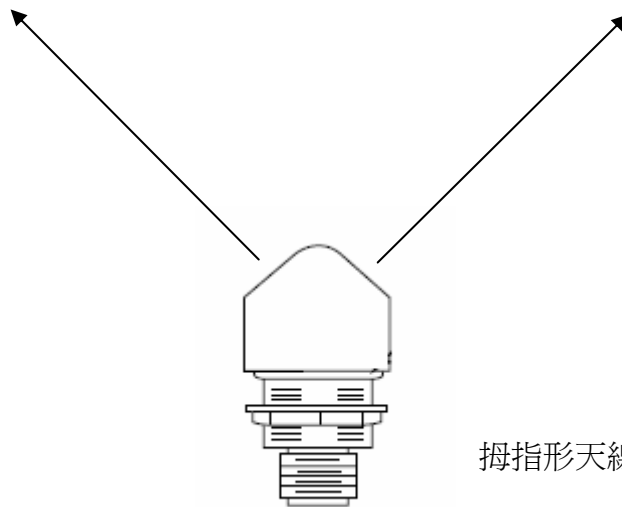
Herley Industries INC. No. 845CX-10



外觀尺寸圖



單位：mm



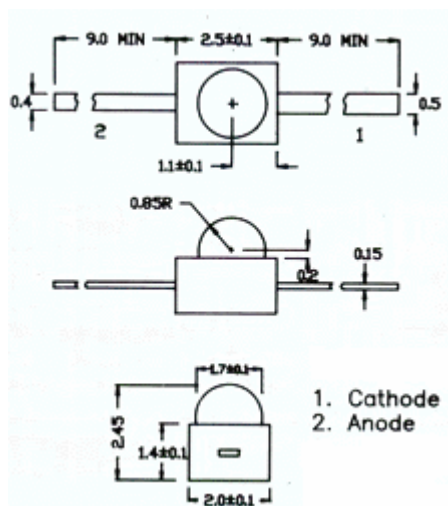
拇指形天線電磁波發射方向

附錄 C：SY-10PD 光接收二極體

光電特性：

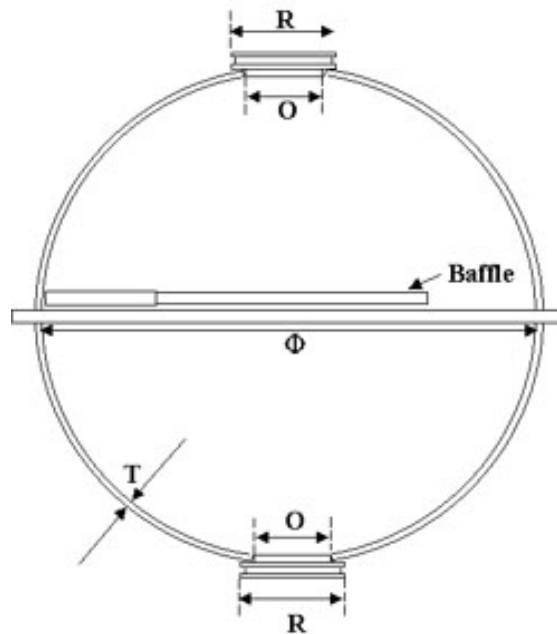
| Part Number | Open Circuit Voltage | Short Circuit Current | | Dark Current | | λP | $\Delta \theta$ | Topr (°C) | Package |
|-------------|----------------------|-----------------------|----------|--------------|--------|-------------|-----------------|-----------|--------------------------|
| | Vop Typ (V) | Ish Typ (μA) | Ev (Lux) | ID Typ (nA) | Vr (V) | Typ (nm) | Typ (deg) | | |
| SY-10PD | 0.35 | 10.0 | 1000 | 30 | 10 | 900 | ± 15 | -20~+80 | Epoxy resin (A-1) |
| SY-12PD | 0.35 | 2.5 | 1000 | 30 | 10 | 900 | ± 50 | -20~+80 | Ceramic Epoxy resin(A-2) |
| SY-15PD | 0.35 | 3.4 | 1000 | 30 | 10 | 900 | ± 70 | -20~+80 | SOT-23 (A-3) |

外觀尺寸圖



附錄 D： Light Port 兩孔積分球

外觀尺寸圖



單位：mm

| | | | |
|-------------|----|---|----|
| \emptyset | O | T | R |
| 50 | 14 | 2 | 20 |

積分球規格表：

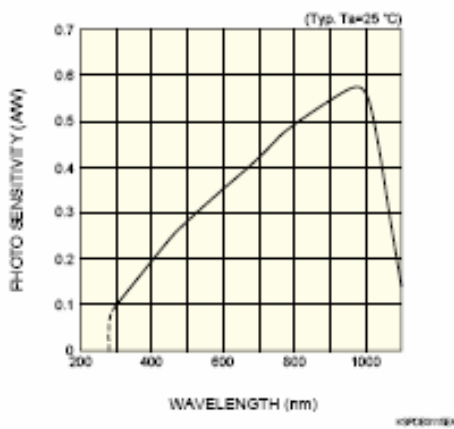
| Description | Typical | Unit | Remark |
|--|---------|-------------------|-----------------|
| Output Port Diameter | 14 | mm | |
| BaSO ₄ thickness | 0.5 | mm | |
| Reflectance | >98% | | 380~1100mm |
| Output port uniformity area (Variation<2%)** | Dia. 45 | mm | 以二十公分積分球為例 |
| Damage Threshold | 1.5 | J/cm ² | 532nm YAG Laser |

附錄 E：Hamamatsu S2387-1010R 光接收二極體

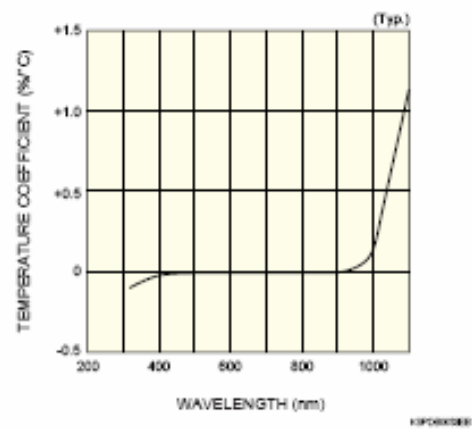
規格：

| | | | |
|--------------|-----------|-----------------|-------------------|
| 封裝大小 | 有效面積 | 最大反向電壓 | 操作溫度 |
| 15mmX16.5mm | 10mmX10mm | 30 V | -20~60 度 |
| 頻譜範圍 | 最敏感波長 | 暗電流(反相電流=10 mV) | 上升時間 (負載為 1k ohm) |
| 320nm~1100nm | 960nm | 200 pA | 33 μ s |

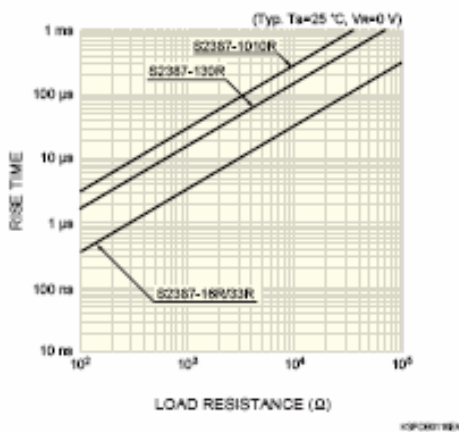
■ Spectral response



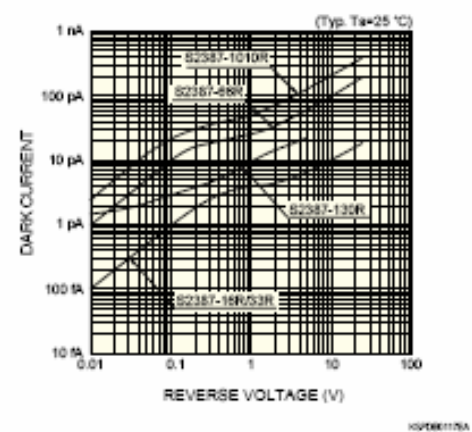
■ Photo sensitivity temperature characteristic



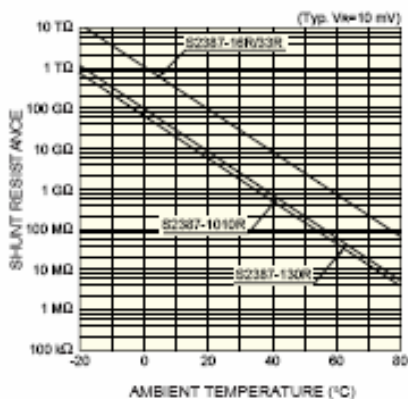
■ Rise time vs. load resistance



■ Dark current vs. reverse voltage

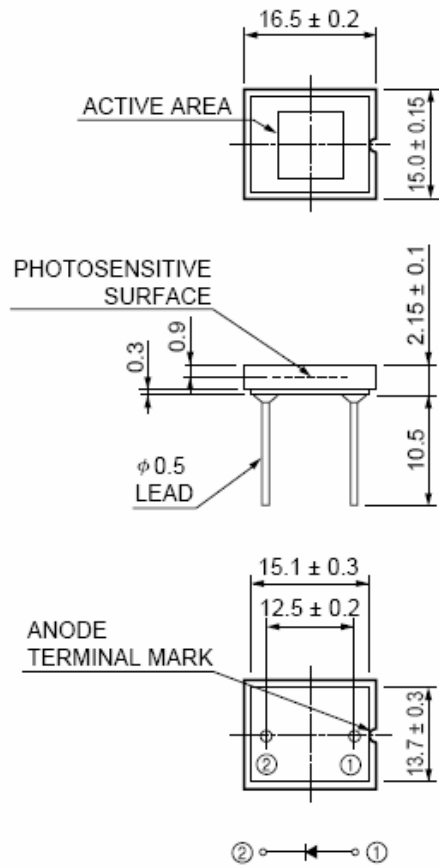


■ Shunt resistance vs. ambient temperature



外觀尺寸：單位：mm

④ S2387-1010R



Resin coating may extend a maximum of 0.1 mm above the upper surface of the package.

作者簡歷



本論文作者：戴晟傑(Sheng-Chieh Tai)

台灣省台中市人。畢業於台中二中，2003年取得清華大學原子科學系學士學位。2005年於交通大學光電所取得碩士學位。

研究專長：微波、光電量測實驗，光學設計。

會議論文：

Sheng-Chieh Tai, Jyh-Long Chern, Yueh-Chuan Huang, Mei-Rurng Tseng, and Hsien-Kuang Lin, "Anomalous characteristics of organic light emitting diode under microwave transmission," Proceeding of OPT(Optics and Photonics Taiwan), 2004.

期刊論文：

Sheng-Chieh Tai, Jyh-Long Chern, Yueh-Chuan Huang, Mei-Rurng Tseng, and Hsien-Kuang Lin, "Evidence of Birefringence and Anomalous Electromagnetic Pulse Propagation in an Organic Light Emitting Diode," Microwave and Optical Technology Letters, Vol. **45**, (5), pp. 452-456, 2005.