

壹、緒論

1.1 前言

平面顯示器 (Flat Panel Display, 簡稱 FPD) 是目前最重要的光電產品之一，也和日常生活緊密相關性，使的光電產業多年來莫不持續地努力研發新型的平面顯示器，以追求更完美的功能。主流的平免顯示器技術一路從陰極射線管 (Cathode Ray Tube, 簡稱 CRT) 顯示器發展到了液晶顯示器 (Liquid Crystal Display, 簡稱 LCD)。尤其當進入 21 世紀後，為了符合未來生活的需要並迎接“3C”(即電腦，Computer、通訊，Communication、消費性電子產品，Consumer Electronics) 及“3G”(即第三代行動電話) 時代的來臨。而有機發光二極體具有輕、薄、短、彩、美、小的特性，是最能符合人們對平面顯示器要求的一項技術，也因此引起國內外的許多產學界以及大廠紛紛投入大量的人力跟資金加以研究，可以說是 21 世紀高科技產業中最具潛力的一項商業應用 [1~5]。

OLED 也簡稱為有機電激發光 (Organic Electroluminescence，在日本常稱為 OLE)，最早是在 1963 年由 Pope 教授所發現，當時他以數百伏特的偏壓施加於 Anthracene 的晶體上，觀察到發光的現象，是最早的文獻報導 [6,7]。但是由於過高的電壓以及不佳的發光效率，在

當時並未受到重視。直到1987年美國柯達公司的C. W. Tang以及Steve Van Slyke 發表以真空蒸鍍法製成多層式結構的OLED元件如圖1-1[8]，使的電洞電子侷限在電子傳輸層與電洞傳輸層之介面附近再結合，大幅提升了元件的性能，其操作電壓與高亮度的商業應用潛力吸引了全球的目光。而在1990年英國劍橋大學的Friend等人成功開發出以塗佈(Spin Coating)方式將多分子應用在OLED上面[9]，即稱為Polymer LED，也稱為PLED，也使的OLED的未來更寬廣。

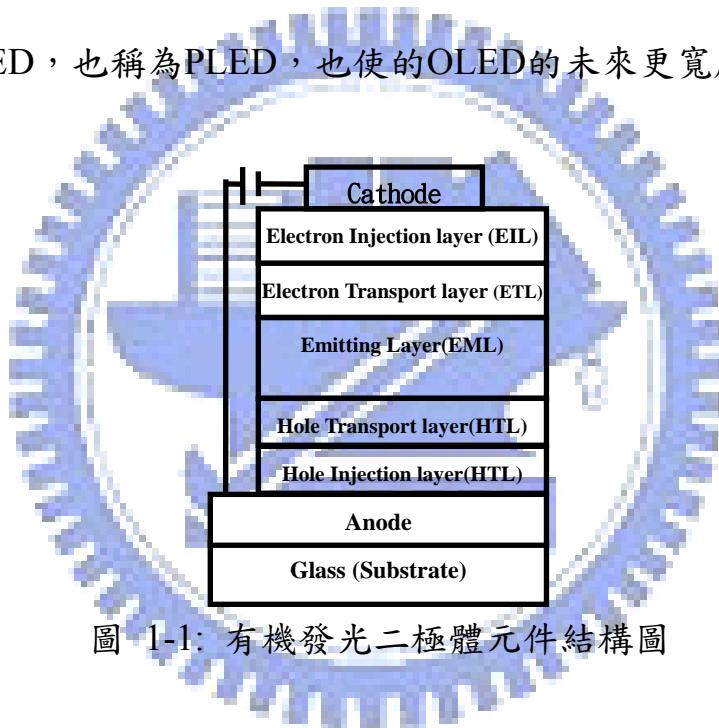


圖 1-1: 有機發光二極體元件結構圖

由於過去的電洞傳輸層單純用NPB或是電子傳輸層單純用Alq₃，會造成外加偏壓增高，因此發展出了利用p型和n型摻當電子以及電洞傳輸層，可以有效的降低電壓達到高效率的目標。p型摻雜物這裡我將介紹 4,4',4''-tris{N,-(3-methylphenyl)-N-phenylamino}-triphenylamine)(m-MTDATA)。在ITO以及螢光間插入一層很薄的導體層如p型或n型摻雜物時，之所以可以有效的降低電性以及提升效率，只要是因為p

型或n型摻雜物提供了對於陽極ITO或是陰極如Al注入發光層的一個有效的能階(barrier)，而p-i-n的元件結構也能有效的提升元件的壽命[10]。Novaled在SID'07時發表了將他們研發的新的n型摻雜材料製成p-i-n白光元件的壽命在 1000 cdm^{-2} 之下， $t_{1/2}$ 可以達到30,000小時，而上發光的p-i-n紅光元件在 1000 cdm^{-2} 之下， $t_{1/2}$ 甚至可以達到250,000小時[11,12]。

為了搭配電子注入層，通常我們會使用低功函數的金屬作為陰極。而陰極我們會用單層的金屬或是以共蒸鍍的方式蒸鍍合金類的金屬，而最低的低功函數的金屬則以鹼金屬為最，以Cs為例，它的功函數低於 2.2 eV [13]，可是鹼金屬通常熔點都比較低而且不穩定[14]，使得蒸鍍這些鹼金屬成膜變的很困難。通常為了要降低陰極和有機層之間的蕭特基能障(Schottky barrier)，我們會再陰極及有機層間加入一層氟化物、氧化物、硫化物、或是鹼金屬的無機鹽類來有效的降低之間的能障。例如我們常用在PLED及OLED的LiF[15~18]以及CsF[19]和一些鹼金屬的氟化物[20]都有成功的被使用在元件上面，也使得元件的效率可以有效的改善。

1.2 OLED的特色

OLED的發展使以全彩化的平面顯示器為最高目標在前進：

1. 高對比、2. 反應時間快($\sim 1\mu s$)、3. 自發光、4. 全彩化、5. 可薄型化($< 2\text{ mm}$)、6. 高亮度、7. 可應用於可撓式面板、8. 廣視角($>170^\circ$)、9. 降低操作電壓($3\text{~}9V$)。由於這幾年來，很多公司都積極的開發OLED TV的相關技術以及製成，譬如Samsung在2006年開發出40吋AMOLED TV以a-Si TFT的技術和白光光源搭配RGBW的製程技術[21]，可以有效的將所耗費的功率降至原本的 $1/3$ 。在2007年，Samsung又以*p-i-n*的tandem結構搭配RGBW的製成成功研發出14.1吋的AMOLED[22]，其NTSC ratio可達至80%。Sony也在2007年SID提出了以μC-Silicon TFT搭配dLTA(Diode Laser Thermal Annealing)的製程技術研發出27吋OLED TV的原型[23]，其NTSC ratio更超過了100%。而近幾年來，在可撓式面板方面也有許多突破的技術跟成果，例如Samsung在2006年SID會議上就提出了用不鏽鋼的薄片搭配LTPS TFT做出的5.6吋可撓式全彩的上發光AMOLED的面板[24]，其面板的厚度為 $150\text{ }\mu m$ ，NTSC ratio可達84.5%。而Sony也在2007年的SID會議上，提出了以PES的塑膠基板和上發光元件搭配OTFT研發出2.5吋的全彩化AMOLED面板[25]，其厚度達 0.3 mm ，也是這一次會議上矚目的焦點。

1.3 OLED全彩化的介紹

由於上述的多公司都以將OLED面板全彩化為目標做了許多製成或是材料方面的突破，因此這裡將介紹OLED的主要三個全彩化方法如圖1-2所示，以及近幾年來的各個方法的在技術上面的發展：

1. 紅綠藍畫素並置法(RGB side-by-side pixilation) [26] :

紅綠藍畫素並置法，這是利用熱阻絲依序加熱藍、綠、紅有機發光材料，當在蒸鍍其中之一的發光源時利用光罩(mask)遮蔽其中兩個畫素，然後利用高精密度的對位系統移動光罩，再進行下一個發光源的蒸鍍，達到全彩化 OLED 顯示器的方法，此全彩化技術的好處在於能夠完全表現出藍、綠、紅色有機發光材料的個別 NTSC ratio 和發光效率。但缺點是目前紅藍率三個有機發光材料的元件操作穩定性各不相同，當顯示器經過一段時間驅動後將會出現色偏移的問題；再加上解析度越高，相對地畫素(pixel)需要越小，此時會面臨光罩對位之準確度與光罩的材質因熱漲冷縮所導致變形的問題，這將會造成整個全彩化 OLED 製成良率下降的主要原因。

2. 白光發光源加上彩色濾光片(white OLED + color filter array)[27] :

白色發光源加彩色濾光片法，此全彩化技術是目前TFT-LCD常見的，首先利用藍光發光源加上黃色發光源或是紅、綠和藍色發光源

搭配出自白光OLED發光源來，再利用彩色濾光片呈現所需的紅、綠、藍三種光色，此種全彩化技術好處在於只需要製作大面積的白光發光源，可免除精確的對位問題，而畫素大小則可由TFT以及彩色濾光片來決定，如此整個製程良率可以大幅的提升也可以得到更高的解析度。但缺點是因為彩色濾光片不佳大約只有20~30%，因此透過彩色濾光片後會有60%以上的發光亮度損失，所以要想提升亮度就必須調高驅動電壓，但這會使得白光OLED加速劣化而使得元件的操作穩定度大幅降低；因此，如何製作具有高發光效率高操作穩定度的白光光源是此全彩化技術的關鍵。

3. 藍光發光源加上色轉換材料法(color conversion medium , 簡稱CCM) [28] :

藍光發光源加上色轉換材料法，是利用一個藍色發光源當作激發光源，經由激發綠光以及紅光之色轉換材料，透過能量轉移的方式得到紅、綠、藍三種光色，此種全彩化的優點在於只需要一個藍色發光源，不同於白光需要數個發光源組成，因此製作上相較於白光發光源要簡單。但其缺點是需要一高效率的且操作穩定的藍色發光源，且藍色發光源和綠色或紅色之色轉換材料間的色轉換率也是依大關鍵；再加上出光的時候會有光散涉的問題，造成光色產生加成的現象導致整個顏色偏移，雖然此問題可以加上一個彩色濾光片來

維持其色純度，但是經過一次能量轉換和濾光後，其發光效率已經大幅的下降許多。在2007年，SID會議上，日本Fuji就針對現已有的CCM OLED技術所存在主要的三個問題[29]研發改善的技術，第一的問題就是複雜的製程技術，第二問題就是較低的紅光轉換率，第三個問題就是會受到UV光以及熱的破壞造成不穩定的CCM OLED。Fuji以上發光的元件並利用由藍色光源激發綠色主發光材料(host)後經由能量轉移到紅色的客發光材料(guest)來提升紅光的轉換率，使其NTSC ratio可達80%。

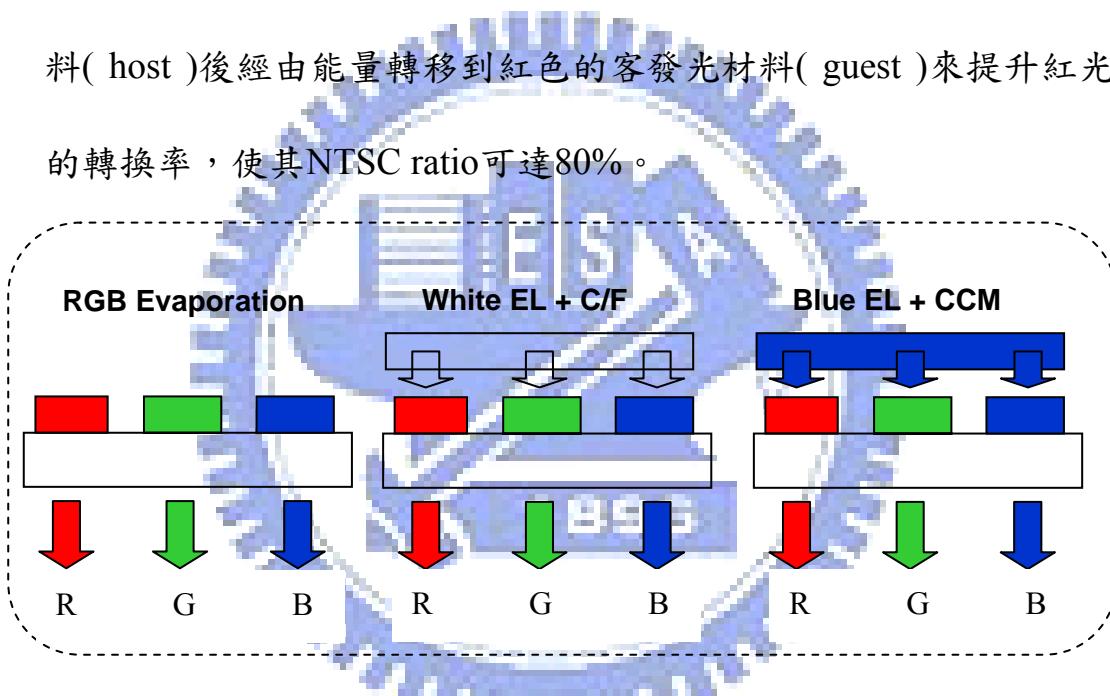


圖 1-2 : OLED 全彩化的三種方式

1.4 白光文獻回顧

白光OLED除了可以搭配彩色濾光片作為全彩顯示器外，也因為磷光技術的發展，使得其也具備作為液晶顯示器以及全彩顯示器的背光源和取代照明燈泡的潛力。白光的光譜涵蓋 400 nm 至 700 nm。

理想的白光光色為 1931 年 CIE(Commission International de l'Eclairage)

座標值為($x=0.33$, $y=0.33$)，而 CRI(color rendition index)之值大於 80，

才是一個優質的白光光源。

小分子白光的發展分為螢光材料和磷光材料兩種。因為螢光材料的發展比較早，也因此開始發展 OLED 以來，有較多的期刊論文是

針對螢光白光；自從 1999 年磷光發展以來，開始有較多的磷光白光

的期刊論文被發表，因為磷光的高效率，使的磷光白光有潛力成為下

一代的照明設備。白光元件中包含主發光體(host)與客發光體

(guest)，其機制可以分為主發光體能量轉移給客發光體，還有可發

光體自行捕捉載子放光。能量轉移包括 Förster energy transfer

(dipole-dipole interaction)和 Dexter energy transfer (electron

exchange)，因此前者的作用距離較遠約 $50\text{--}100\text{ \AA}$ ，而後者的作用牽

扯到電子雲的交換所以距離較近約為 10 \AA 。能量轉移利用高能隙的

主發光體，其通常有較高的最低電子未填滿分子軌域(LUMO)和較高

的最高電子填滿軌域(HOMO)，將低能隙的客發光體的 LUMO 、

HOMO 涵蓋，使得有較高的能量轉換效率，如圖 1-3 所示。載子捕捉

則是因為客發光體有較低的能階，故電子和電洞容易進入造成捕捉。

而螢光跟磷光白光中的深藍光都面臨到找不到能隙夠大的主發光

體，故現在大都認為深藍光是由自行捕捉載子發光，還要特別注意磷

光的深藍光還要考慮夠大的的 Triplet energy 才不會導致深藍光將能量回傳給主發光體造成粹熄。

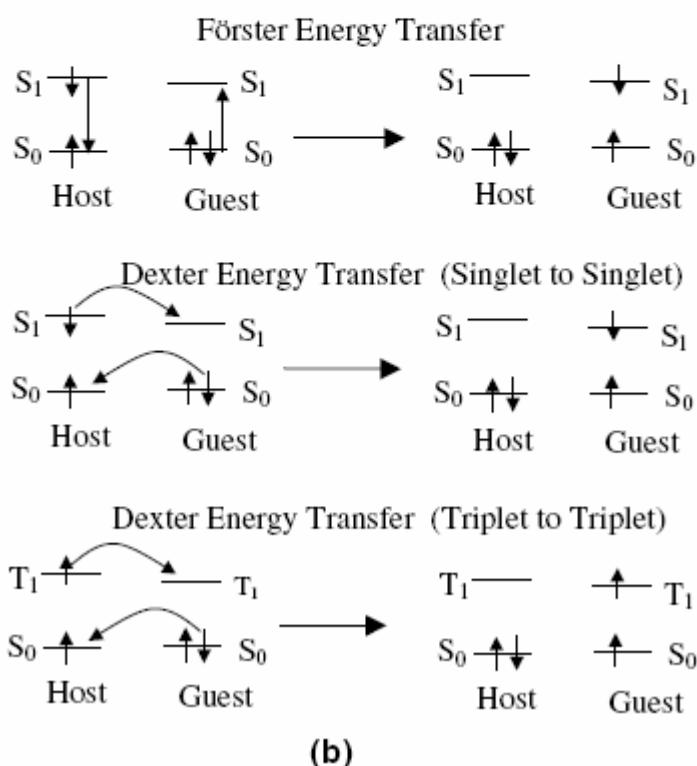
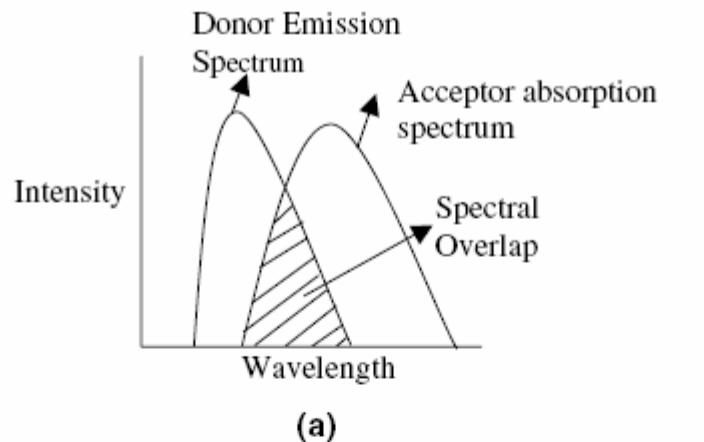


圖 1-3 : (a) 主發光體的放射光譜和客發光體的吸收光譜的重疊 (b) Förster energy transfer 和 Dexter energy transfer 的示意圖

由於本論文在探討三波段的螢光白光元件，因此我們將先介紹單

層式白光元件和多層式白光元件。一般單層式的元件多利用能量轉移的方式來形成白光，因此元件的色度座標比較不會隨著驅動電流改變而改變，但通常客發光體摻雜的濃度都很小故不好控制，為其缺點；多層式元件是利用兩個以上的再結合區放出不同頻譜的光色來達到白光，因為有多個再結合的區域可能使得白光的色座標隨著驅動電流改變而改變。之後我們也將介紹利用 $p-i-n$ 在近幾年內所發展的白光元件，包括多層式的白光元件、串疊式(tandem)的白光元件、和倒置式(inverted)白光元件。

1.4.1 單層式白光

單層式的白光可分為兩類(1)雙波段白光(2)三波段白光，如圖 1-4 所示。

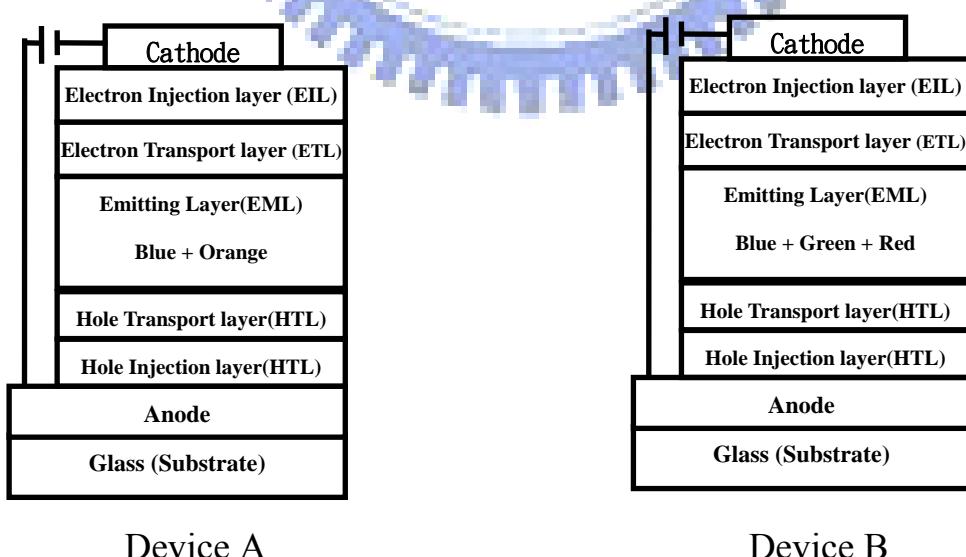


圖 1-4 :單層式結構雙波段及三波段白光示意圖

兩種類型都藉由單層高效率的藍光主發光體，如 DPVBi、JBEM、SAlq、ADN、DCB，自行發光並靠著能量不完全轉移傳給螢光客發光體，如常見的黃光(Rubrene)以及紅光(DCJTB、DCM2) [30~37]；或共摻雜磷光和螢光客發光體[38,39]，藉由調整客發光體的濃度和主發光體的膜厚來調整光色。此系列文章也指出客發光體也能自行捕捉載子發光，是可能造成元件隨不同電流密度下產生的色偏原因。其中作者 Yu Duan et al.[35]發現少量電洞穿過發光層(ADN:0.5%)到達電子傳輸層(Alq_3)而發綠光。作者 Jiang Li at al.[36]發現單層式白光結構中(ADN:0.05% rubrene)，摻雜藍光客發光體(TBADN)，不僅可以提升效率也改善了膜厚的形貌，提升了元件的壽命。作者 S. R. Forrest et al.[40]在文獻中提出一種能量轉移的方式(interlayer sequential energy transfer)， α -NPD(B)/ α -NPD:DCM2(R)/BCP(Blocking layer)/ Alq_3 藉由增加阻擋層的厚度，發現(紅光/藍光)的比例變小，推測此系統的能量轉移方式為 α -NPD 穿過阻擋層傳給 Alq_3 ，在穿回阻擋層傳給 DCM2。以上所述搭配螢光的主發光體和螢光的客發光體的元件效率都不高，而為了達到高效率的白光，作者 Brian W.D'Andrade et al.[38]在高能隙的發光層(UGH2)摻雜的磷光深藍光(Fir6)、綠光($\text{Ir}(\text{ppy})_3$)、紅光(PQIr)藉由能量不完全轉移的發出三波段白光，並測量藍光的生命週期從未摻雜的 $1.6 \mu\text{sec}$ 降低到 $0.75 \mu\text{sec}$ 間接證明藍

光能量轉移給綠光跟紅光。除此之外，作者 Gangtie Lei at al.[41]藉由螢光藍光主發光體摻雜磷光天藍光(Flrpic)和紅光(DCJTB)元件效率可達 9.2cd/A，其中 Flrpic 當作增感劑(phosphorescent sensitizer)。這些元件的結構以及表現整合於表 1-1。

表 1-1：單層式元件結構與效能

Device structure	Performance	Ref.
ITO/NPB/DVBi:0.8%Rubrene /Alq ₃ /LiF/Al	5.8 cd/A@6V 3.11 lm/W@17V (0.34, 0.36)@5V	30
ITO/CuPc/NPB/DPVBi:0.08% DCJTB/ Alq ₃ /LiF/Al	2.45 cd/A@20mA/cm ² 1.75 lm/W@ 20mA/cm ² (0.26, 0.32)@4mA/cm ²	31
ITO/CuPc/NPB/JBEM:Perylene: DCJTB/ Alq ₃ /MgAg	2.88 lm/W @4mA/cm ² (0.32, 0.38)@4mA/cm ²	32
ITO/TPD/SAlq:0.5%DCJTB /Alq ₃ /LiF/Al	2.3 lm/W @1 mA/cm ² (0.34, 0.39)@1.8 mA/cm ²	33
ITO/PEDOT:PSS/TPD/SAlq: 0.3%DCM2/Alq ₃ /LiF/Al	2.3 lm/W @1 mA/cm ² (0.38, 0.44)@4mA/cm ²	34

表 1-1：單層式元件結構與效能

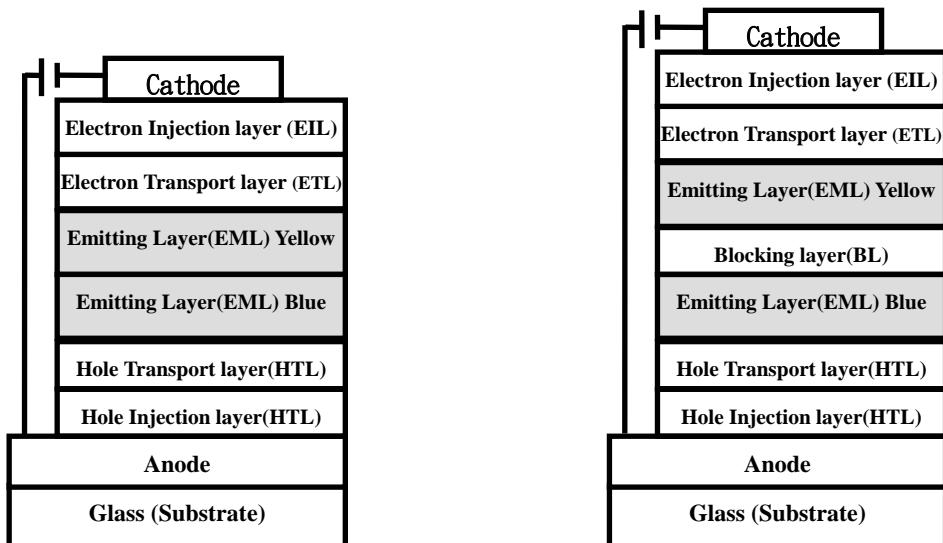
Device structure	Performance	Refs.
ITO/m-MTDATA/NPB/AND: 0.5%Rubrene/Alq ₃ /LiF/Al	6.4 cd/A@6V 2.88 lm/W @4mA/cm ²	35
ITO/NPB/AND:2.5%TADN: 0.025%Rubrene/Alq/MgAg/Ag	20100nits@14.6V 5.59cd/A , CRI=78	36
ITO/m-MTADATA/NPB/Bepp ₂ : 0.2%Rubrene/Alq ₃ /LiF/Al	3 lm/W@5V (0.38,0.36)@6V	37
ITO/NPB/PAP-NPA:0.025% Rubrene/Alq ₃ /LiF/Al	6.11 cd/A@7V 2.92 lm/W @6.5V (0.33, 0.35)@6V	38
ITO/NPB/BNA:Perylene:0.5% DCJTB/Alq ₃ /MgAg	1.65 cd/A@20mA/cm ² (0.33, 0.33)@ 10mA/cm ²	39
ITO/NPD/TCTA/UGH4:20%Fir6 :0.5%Ir(ppy)3:2%PQIr/TPBI/ LiF/Al	CRI = 78 8 lm/W@1000 nits (0.43, 0.45)@ 0.1mA/cm ²	40
ITO/NPB/DCB:8%Firpic:0.4% DCJTB/BPhen/MgAg	9.2 cd/A (0.32, 0.36)@9V	41
ITO/PEDOT:PSS/PF:PBD: Rubrene(5wt%)/Cs ₂ CO ₃ (0.2wt%) /Al	(0.33,0.43)@25mA/cm ² 14 lm/W@1000nits	42

1.4.2 多層式白光

多層式發光層白光元件的機制大致如單層式發光層，包括能量轉移和載子捕捉，不同的是可能越過不同的發光層進行能量轉移，其中以磷光的激發子擴散距離較遠，其因激發子的生命週期(lifetime)較長，而螢光的能量轉移距離雖然較短，但藉由介面處的結合區域，載子可越過介面處進行能量轉移。更重要的是，可以適當的選擇不同的發光層，藉由各層的能障以及其厚度調節和摻雜濃度的最佳化，使得結合區內的載子重新分布進而調整各發光層光色的比例。然而此種多層式白光架構相對複雜了元件的製程，且元件可以隨著操作電壓而改變，再結合區域的偏移也使得元件的顏色改變。我們這裡將介紹兩種多層式白光結構，如圖 1-5 所示。

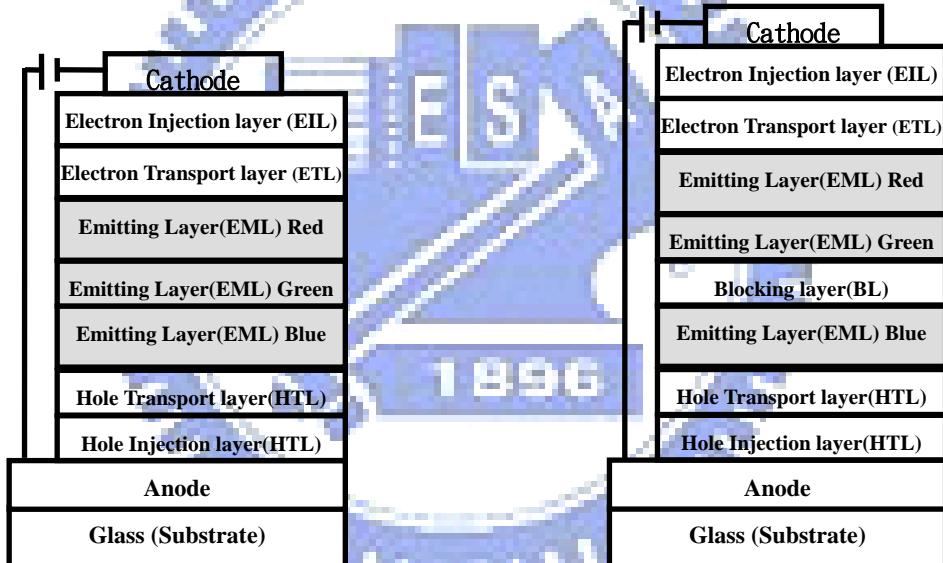
(1) 雙層式白光：

利用一螢光藍光發光源，可藉由單層藍光發光體或是摻雜藍光客發光體，加上螢光黃光或紅色發光源，但這樣的元件結構會造成綠光以及深紅光區域的問題，可利用摻雜螢光的綠光客發光體或是深紅色發光體的系統，或是利用雙摻雜系統來解決[43~51]，但摻雜濃度需要準確的控制為其缺點。作者 M. Li et al.[46]在文獻中提出，黃光客發光體(rubrene)在 NPB:0.7% rubrene (8 nm)系統內，在低電流密度下大部分以能量轉移發光而在高電流密度下以自行載子捕捉發光。



Device A without BL

Device A with BL



Device B without BL

Device B with BL

圖 1-5 :多層式結構示意圖

為了提高元件的效率，摻雜磷光的客發光體是一項不錯的選擇

[57]，螢光和磷光在不同的發光層[52, 55]或在同一發光層的螢光和磷光[53, 54, 56]，藉由高效率高能隙的磷光當作感光劑利用能量轉移 (triplet-singlet energy transfer)[58,59]傳給低能隙的螢光。

R. S. Forrest 在此文獻中 CBP:10% Ir(ppy)₃:1%DCM2 提出 Ir(ppy)₃ 的生命週期為 100 ns 比在 CBP:10% Ir(ppy)₃ 系統中的生命週期 500 ns 並且間接證明了 Ir(ppy)₃ (phosphor-sensitized)的確透過能量轉移給 DCM2(fluorescent dye)。除此之外，若將客發光體摻雜到電洞和電子傳輸層中，藉由電子傳輸層和電洞傳輸層間所造成的能障，使得結合區落在此介面[60,61]。

雙層式白光中，如果在兩層發光層中，引入一層阻擋層，藉由調整其厚度重新分布結合區或是避免能量轉移來達到調整不同光色的比例[62~67]，但其阻擋層和發光層間的能障，若不能有效的侷限電子，則元件可能會隨著不同的電流密度使其結合區會偏移造成色偏；若能有效的侷限載子和避免激發子的擴散便能使色偏減低。

為了簡化雙層式白光結構，將能隙小的捕捉載子的黃光或紅光客發光體不摻雜於主發光體中，而以極薄的厚度直接當作發光層捕捉載子[68~76]。這些元件的結構及表現整合在表 1-2。

表 1-2：雙層式元件結構與效能

Device structure	Performance	Refs.
ITO/NPD/Zn(BTZ) ₂ (B)/ Zn(BTZ) ₂ : DCM2(0.8%)(B+R)/Alq ₃ /LiF/Al	0.27 lm/W@11.2V (0.36, 0.43)@2410 nits	43
ITO/TPD:6%DCDM/CAN(R+G)/BCP(B)/Alq ₃ /MgAg/Ag	0.5~0.6 lm/W (0.34, 0.35)	44

表 1-2：雙層式元件結構與效能

Device structure	Performance	Refs.
ITO/CuPc/NPB/DPVBi:Rubrene (0.25%)(B+Y)/DPVBi(B)/Alq ₃ /CsF/Al	11 cd/A 6 lm/W@5.8V	45
ITO/CuPc/NPB(B)/NPB:Rubrene (0.7%)(B+Y)/TPBI/ Alq ₃ /LiF/Al	2.1 lm/W@5.5V (0.29, 0.30)@6V	46
ITO/PEDOT:PSS/NPD/NPD: DCM2(0.2%)(R)/DPVBi(B)/ Alq ₃ /LiF/Al	3.1%(E.Q.E) 3.8 lm/W@100nits (0.33, 0.36)@6V	47
ITO/2-TNATA/NPB(B)/ 24MeSAlq:DCJTB(0.5%)(R) /Alq ₃ /LiF/Al	1.74%E.Q.E& 1.82 lm/W@8.4V (0.32,0.28)@8.4V	48
ITO/CuPc/NPB/DPVBi:DCM2 (0.0025%)(B+Y)/Alq ₃ :C ₆ (0.1%) (G)/ Alq ₃ /LiF/Al	5 lm/W (0.30, 0.36)@1000nits	49
ITO/PEDOT:PSS/NPB/NPB: DCM2(0.33%)(R)/ DPVBi : BCzVBi(9.1%)(B+G) / Alq ₃ /LiF/Al	1.151 lm/W@7.75V (0.31,0.32)@7V	50
ITO/CuPc/NPB/NPB:TBRb(1.2%) / MADN:DSA-Ph (3%)/Alq ₃ /LiF/Al	12.8 cd/A@20mA/cm ² (0.31, 0.38)@ 20mA/cm ²	51
ITO/NPB(B)/CBP:Dembpy-Re(2%) (Y) / BCP/LiF/Al	5.1 cd/A@2410nits (0.36, 0.43)@2410nits	52

表 1-2：雙層式元件結構與效能

Device structure	Performance	Refs.
ITO/NPB(B)/CBP:Ir(ppy) ₃ (3%): DCJTB (2%) (R)/BCP/LiF/Al	6 cd/A@4V 6.1 lm/W@100nits (0.28, 0.38)@100nits	53
ITO/NPB/DPVBi:DSA(B)/CBP: Ir(ppy) ₃ :PR(G+R)/BCP/ Alq ₃ / LiF/Al	10.6 cd/A&6.1 lm/W (0.28, 0.38)@100nits	54
ITO/m-MTADATA/NPB(B)/ TPBI:Ir(ppy) ₃ (4%):Ir(piq) ₂ (acac) (2%)(G+R) /Alq ₃ /LiF/Al	10.7 lm/W@4V (0.44,0.44)@4V	55
ITO/NPB/DPVBi(B)/CPB:Ir(ppy) ₃ (8%):Rubrene(0.5%)(G +Y) /BCP/Alq ₃ /LiF/Al	9.22cd/A@0.9mA/cm ² (0.30,0.37)@1000nits	56
ITO/NPB/DCB:FIrpic(8%)(B)/ CPB:Ir(piq) ₂ (acac)(7%)(R)/ BPhen/Mg:Ag	10.5cd/A@295nits (0.28,0.37)@6V	57
ITO/NPB/TCTA:TPP(2%)(B)/ BCP:Ir(piq) ₃ (0.4%)(R)/Alq ₃ / Mg:Ag	3.23cd/A@0.032mA/cm ² (0.32,0.26)@10V	60, 61
ITO/SA(B)/PBD/Alq ₃ :DCM (1%)(G+R)/Alq ₃ /Mg:Ag		62
ITO/CuPc/NPD/DPVBi(B)/NPD /Alq ₃ :Rubrene(5%)(Y)/Alq ₃ / LiF/Al	0.8 lm/W@220nits (0.31, 0.33)@11V	63

表 1-2：雙層式元件結構與效能

Device structure	Performance	Refs.
ITO/PEDOS:PSS/NPD/CDBP: (CF ₃ ppy) ₂ Ir(pic)(1%)(B)/BAIq/ CDBP: (CF ₃ ppy) ₂ Ir(acac)(3%) (R)/BAIq/LiF/Al	18 cd/A&10 lm/W (0.31, 0.33) @0.01 mA/cm ²	64
ITO/NPB(B)/BCP/Alq ₃ (G)/LiF/Al	4.4 cd/A@1.6 mA/cm ² (0.32, 0.43)@5V	65
ITO/NPB/NPB:C545T(1%):DCJTB (1%)(R)/NPB/DAN(B)/BCP/Alq ₃ /LiF /Al	12cd/A@7.8mA/cm ² (0.34,0.39)@12V	66
ITO/NPB/NPB:TBRb(1.5%)(Y)/BAIq/ MADN:DSA-Ph(3%)(B)/ NPB/ MADN:DSA-Ph(3%)(B)/ Alq ₃ /LiF/Al	9.9cd/A@20mA/cm ² (0.30,0.41)@ 20mA/cm ²	67
ITO/NPB/DCM(0.5A)(R)/DPVBi(B)/ Alq ₃ /LiF/Al	1.7 lm/W@125nits (0.34, 0.36)@6V	68
ITO/m-MTADATA/NPB/Rubrene(1A)/ TPBI/Alq ₃ /LiF/Al	2.94 lm/W@20mA/cm ² (0.39,0.41)@4V	69
ITO/NPB/TBVB(B)/Rubrene(15A) (Y)/ Alq ₃ /LiF/Al	3.2 cd/A@6V (0.33, 0.34)@4000nits	70
ITO/NPB/Rubrene(1A)(Y)/DPVBi(B)/ Alq ₃ /LiF/Al	4.8 cd/A@6V (0.30, 0.33)@11V	71

表 1-2：雙層式元件結構與效能

Device structure	Performance	Refs.
ITO/NPB/DPVBi/DCM: Alq ₃ (1%)/ LiF /Al	(0.35,0.29)@12V@ 8010nits	72
ITO/NPB/Ir(L) ₃ (1):CBP(5%)/ [FIrPic]:mCP(8%)/TPBI/LiF/Al	17.8cd/A@7.6 lm/W 0.31,0.41)@4.2V	73
ITO/NPB/NPB:DCJTB (1%)/DNA /BCP/ Alq ₃ /LiF/Al	13.6 cd/A@16000nits (0.35,0.34)@7V	74
ITO/MeO-TPD:F ₄ -TCNQ(4ml%)/ Spiro-TAD /NPB:Ir(MDQ)2(acac) (5wt%)/TCTA:Ir(ppy) ₃ (8wt%)/TCTA :TPBi(2:1)/Spiro-TPVBi/Bphen/ Cs ₂ CO ₃ :Bphen/Al	16.3cd/A@100nits CRI= 85@100nits 17.4 lm/W@2.95V @100nits	75
ITO/CF _x /NPB/FIrpic:mCP(9%)/ Pt(F-bt)acac:mCP(30%)/BAIQ/ Alq ₃ / LiF/Al	(0.40,0.44)@1mA/cm ² 18.18cd/A@1mA/cm ² 11.63%(E.Q.E)@1mA/cm ²	76

而本實驗室，由 J. W. Ma at al.[77]發表了在 *p-i-n* 的雙層式白光結構中，NPB 在整個元件中所扮演的角色，可以幫助電洞注入以及分散在黃光客發光體 rubrene 的濃度，因此造成電壓降低以及黃光比例較低的現象，而有效的使色偏 x, y 值減低至 0.02。

(2) 三層式白光：

將藍、綠和紅光分別獨立成一發光層，透過不同的主發光體及摻雜濃

度的最佳化調整各光色的比例。相對的層數越多也越複雜了元件的製程，也導致元件的再結合區可能隨著不同偏壓而改變[78~81][85~88]。如果在兩層發光層中，引入一層阻擋層，藉由調整其厚度重新分布結合區域或避免能量轉移到調整不同光色的比例[79~84]，但其阻擋層和發光層間的能障，若不能有效的侷限載子，則元件可能隨著不同的電流密度其結合區會偏移而造成色偏；若能有效的侷限載子和避免激發子的擴散使的色偏減低。S. R. Forrest et al.[84]在文獻中利用螢光的藍色客發光體(BCzVBi)搭配磷光的綠光(Ir(ppy)₃)和紅光(PQIr)客發光體，藉由主發光體25%單從激發態傳給螢光藍光、75%三重激發態傳給磷光而達到高效率的白光，這些元件與表現將整合與表1-3。

表1-3：三層式白光元件結構與效能

Device structure	Performance	Refs.
ITO/CuPc/α-NPD/DPVBi(B)/ α-NPD/Alq(G)/Alq:DCM1(2%) (R)/Alq/LiF/Al	5.14cd/A@4.82mA/cm ² (0.35,0.35)@6V	82
ITO/NPB(B)/TPBI/Alq(G)/DCM (1A)(R)/TPBI/Alq/LiF/Al	1.31 lm/W@5V (0.45,0.38)@6V	83

表 1-3：三層式白光元件結構與效能

Device structure	Performance	Refs.
ITO/NPD/CBP:BCzVBi(5%)(B)/CBP/CBP:PQIr(4%)(R)/CBP:Ir(ppy) ₃ (5%)(G)/CBP/CBP:BCzVBi(5%)(B)/TPBI/Alq/LiF/Al	28.8 lm/W@500nits (0.40,0.41)@1mA/cm ²	84
ITO/NPD/10%BCzVBi:CBP/5%PQIr:CBP/6%Ir(ppy) ₃ :CBP/CBP/10% BCzVBi:CBP/Bphen/Bphen:Li/Al	19 lm/W@0.028mA/cm ² (0.37,0.42)@10mA/cm ² CRI = 83	85
ITO/m-MTADATA/TCTA/CBP:8wt% Ir(ppy) ₃ /CBP:8wt%FIrpic/CBP:8wt% Ir(ppq) ₂ (acac)/BCP/Alq/LiF/Al	(0.44,0.43)@17.9cd/A @6.3 lm/W 9.9 lm/W@4V	86
ITO/NPD/CBP:10wt%BCzVBi/CPB /CPB:8wt%Ir(ppy)3:0.08wt%DCJTB /CPB/CBP:10wt%BCzVBi/Bphen /LiF/Al	(0.38,0.42), 21 lm/W @800nits CRI=79	87
ITO/NPB/anthracene/TPBI:11% Ir(ppy) ₃ :0.5%Ir(piq) ₂ (acac)/Mg:Ag	(0.33,0.33)@6389nits 6.4cd/A@100mA/cm ²	88

在2007年SID會議上，Konica Minolta的T. Nakayama et al.[89]也發表了高效率以及高壽命的三波段白光，其元件壽命在1000 nits下，其 $t_{1/2}$ 可達至10,000小時，同時效率也達至64 lm/W，而偏壓也降至3.6V，CIE_{x,y}達到(0.37, 0.42)。而UDC也在2007年的SID會議上，由B.

D'Andrade et al.[90]等人發表了由紅光以及藍光的磷光材料所製成的白光元件，其元件壽命在1000 nits下，其 $t_{1/2}$ 可達至21,000小時，而CIE達到(0.38, 0.39)。而Idemitsu也在2007年SID會議中，由H. Kuma et al.[91]以新開發的螢光材料搭配新開發的電洞注入層材料以及電子傳輸層材料，元件結構採以在紅光及藍光間插入一層阻擋層，其元件的驅動電壓可降低至3.6V，效率可達至20 cd/A，CIE(x, y)達到(0.37, 0.40)，元件壽命也在1000 nits下，其 $t_{1/2}$ 可達至45,000小時。

1.5 *p-i-n* 元件結構

1.5.1 *p-i-n* 簡介

隨著 OLED 的商業化，其所要求的低電壓以及高效率，由一般傳統的元件結構似乎很難達到此目的，因而開發出另一種藉由類似半導體的 *p* 型以及 *n* 型摻雜物，不但可以有效的降低電壓，還能提升元件的效率[92]，也對於元件的壽命有顯著的改善，因此，我們將先介紹 *p-i-n* 的元件結構具有的特性。在相同的驅動電壓下，*p-i-n* 的元件結構能提供較傳統元件結構更高的電流密度，因此可以有效的提升元件的效率。這是由於 *p* 型或是 *n* 型的導體層能有效的增加電子以及電洞的注入能力，因此可以有效的降低傳輸層間的電壓，我們將由第二小節來說明其工作原理。

1.5.2 *p-i-n* 的基本原理

由有機材料所製成的元件，不像無機半導體一樣，會常用到摻雜的結構，其主要原因是由於很難再有機材料中找出一個可以好控制又穩定的材料，然而如果要將有機材料運用到摻雜的結構，這一點又是必要的條件。由半導體的費米能階(Fermi level)來解釋的話，我們可以藉由移動費米能階使其能階可以到達電洞或是電子的傳輸區，這樣可以有效的降低從電極端到傳輸層的電壓並且可以減少歐姆損耗。能有這樣的結果其主要是因為在電極以及傳輸層間我們增加了其蕭特基介面或是pn介面，使其電洞或是電子可以沿著這些介面往傳輸層移動，而這個原理就類似於無機半導體的原理。所謂p型摻雜意即電洞傳輸層將在HOMO狀態的電子傳給摻雜物的LUMO狀態，此類的摻雜物如氧化劑SbCl₅ [93]、FeCl₃ [94]、I (iodine) [95]、F₄-TCNQ [96]、TBAHA [97]、B (bromine) [98]、V₂O₅ [99]、WO₃ [100]、M₀O₃ [101]，此p型摻雜層可以當作有效的電洞注入層。以電洞傳輸層NPB和F₄-TCNQ摻雜物為例，由於NPB的HOMO能階與F₄-TCNQ的LUMO能階相近，因此NPB的HOMO的電子可以跳躍至F₄-TCNQ的LUMO能階，使得電洞傳輸層形成自由電洞，因而增加電洞傳輸層的導電度[102]；反之如果摻入雜質，會讓電子傳輸層的HOMO能階和雜質的LUMO能階相近時，使得電子傳輸層在HOMO狀態的電子跳躍至雜質

的LUMO狀態而形成n型摻雜。作者W. Gao et al.[103]，提出使用thermoelectric effect (Seebeck effect)的結果與使用XPS/UPS/IPES來良測有機材料的介面偶極矩(interface dipole)、HOMO能階以及LUMO能階相吻合。Seebeck effect 是一個簡單又有用的工具，可以準確的良測費米能階(E_F)與傳導能階(E_μ)的差值，公式如下所示。

$$S(T) = \frac{1}{e} \left(\frac{E_F - E_\mu}{T} \right) + A$$

作者K. Harada et al.[104]也提出分子 $[\text{Ru}(\text{terpy})_2]^0$ 和 $\text{F}_4\text{-TCNQ}$ 摻雜至ZnPc分別當作n型摻雜還有p型摻雜。如圖1-6所示。

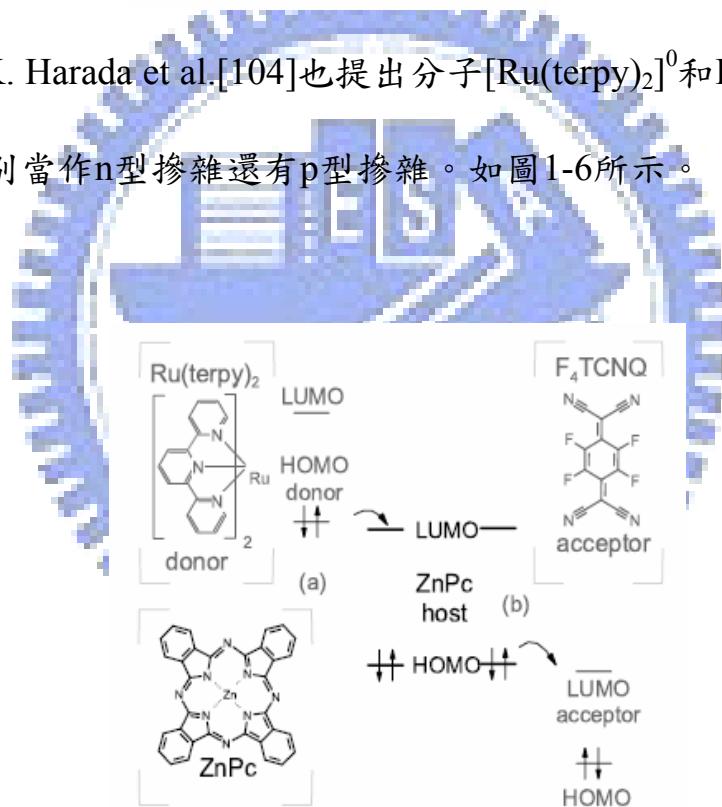


圖 1-6 : (a) *n* 型摻雜的能階圖 (b) *p* 型摻雜的能階圖

本實驗室也開發一種新的*p*型摻雜 WO_3 [105]，摻雜至NPB和2-TNATA都能有不錯的效果。所謂*n*型摻雜意即雜質將其HOMO狀態的電子傳給電子傳輸層的LUMO狀態。此類雜質如鹼金屬如Li 和Cs，最早是

由Kido教授發表以Li摻雜至Alq₃中，Kido並以Alq₃薄膜與摻雜Li的Alq₃薄膜比較其UV-vis吸收光譜，發現有摻雜Li的薄膜收值降低許多，顯示Li可能與Alq₃發生反應產生Li⁺Alq₃⁻錯合體[106]。因為Li和Cs反應性高需要特殊的裝料與蒸鍍設備，因此許多研究者試圖找出其他替代品，如鹼金屬的鹽類。在2006年，作者C. I. Wu et al.[107]藉由量測UPS光譜，證明Cs₂CO₃就是一個n型摻雜物。更重要的是要避免這些激發子被這些電性摻雜物如Li⁺、Cs⁺或F₄-TCNQ所猝熄，才能維持較高的發光效率。因此在發光層與p型或n型傳輸層之間，必須分別加入中間層(interlayer)，這些中間層的主要目的是為了避免發光層和p型或n型傳輸層直接接觸，降低猝熄的機率。而p-i-n結構仍有一些特性如圖1-7所示。

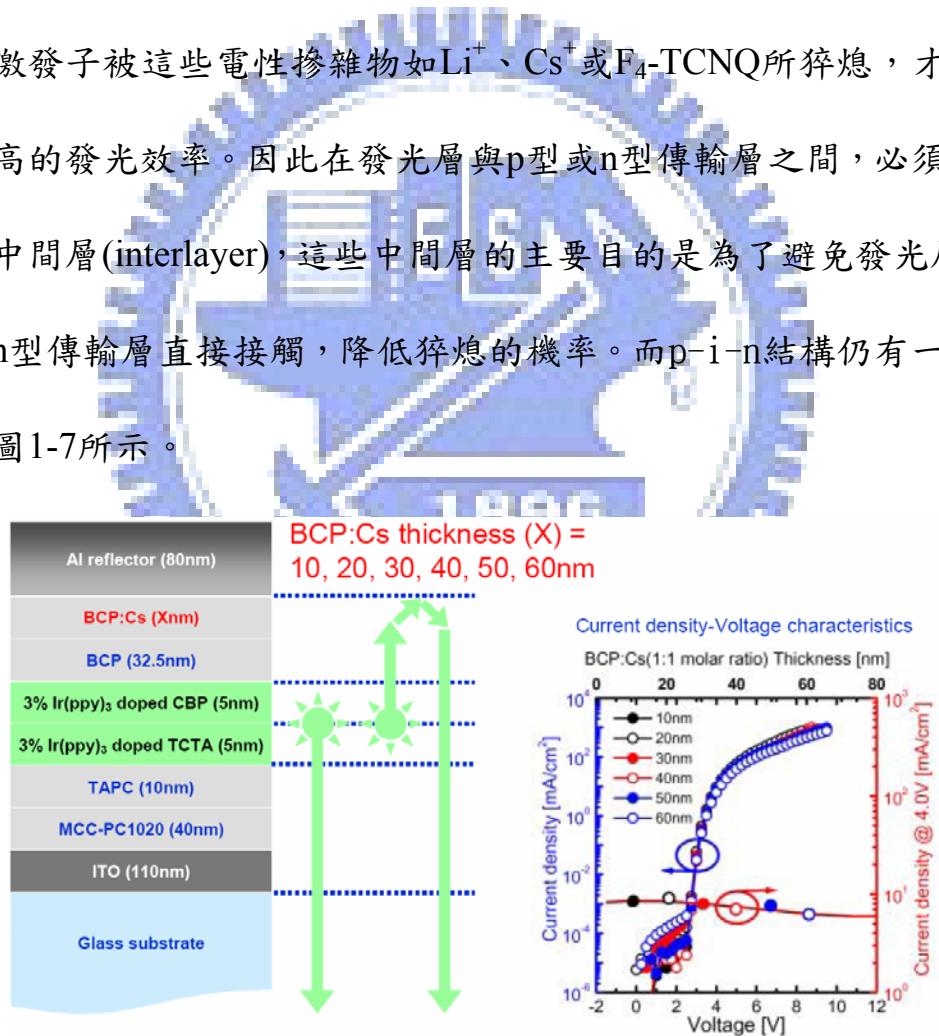


圖 1-7：在不同的n型摻雜的電子注入層的厚度與其電性的特性示意圖

在不同的p型掺杂电洞注入层或是n型的掺杂电子注入层厚度之下，其电性都保持一定，也因为此特性，我们可以藉著在不改变其驱动电压的条件下，来调整其光程差来获得我们所需要的光色。而这个特性尤其在下一节中的tandem结构中格外重要。

1.5.3 串叠(tandem)结构

若将两个p-i-n元件串叠起来，不仅可以提升效率，更重要的是在相同亮度下元件寿命更长，串叠式OLED的概念是由日本山形大学Kido教授首次提出，如图1-8所示。

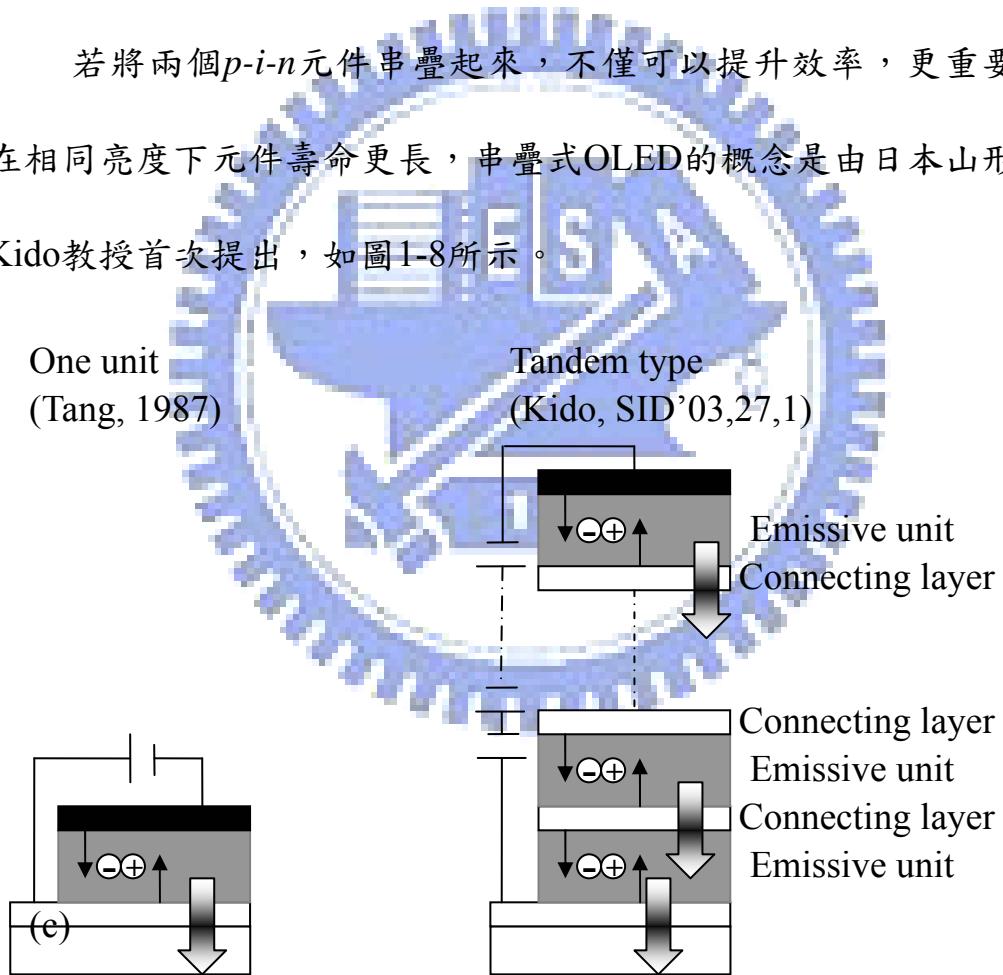


圖 1-8: 1-unit和tandem OLEDs結構示意圖

他们是利用Cs:BCP/V₂O₅当作透明的连接层[93]，将数个发光元件串叠起来，串叠式OLED拥有较高的发光效率，其发光效率可以随

隨著串疊的元件個數，呈倍數成長，而且在相同的電流密度的測試下，串疊式OLED與一個unit的OLED的劣化特性是一樣的，但由於串疊式OLED的初始亮度較大，因此換算成同樣的初始亮度時，串疊式OLED的壽命比傳統的還長，但這種元件的驅動電壓會隨著串疊的元件個數呈倍數成長。

2004年，交通大學OLED研究團隊發表了以Mg:Alq₃/WO₃作為連接層，在調整WO₃的厚度時發現了一個有趣的現象，當WO₃的厚度為30 nm時，串疊兩個元件的效率會剛好是傳統元件的兩倍，但隨著WO₃厚度的減少，效率可以達到傳統元件效率的四倍到五倍，此增幅福的效應是否為共振腔還有待釐清。

作者T. Y. Cho et al.[108]提出了一種平面波展開來計算有機發光二極體的光學效應。分別可計算四種模態存在有機層的波導(waveguid mode)、存在玻璃間的波導，沿著金屬表面傳遞的表面波(plasmon mode)以及可出光而被人眼接受的。在此篇論文中計算tandem OLEDs的光學，結果如圖1-9所示。我們可以發現當距離金屬越遠時，其電漿模態(plasmon mode)趨近於零；當有機層後度增加時波導增加，且到厚度增加到某一程度時最後呈現震盪模式。

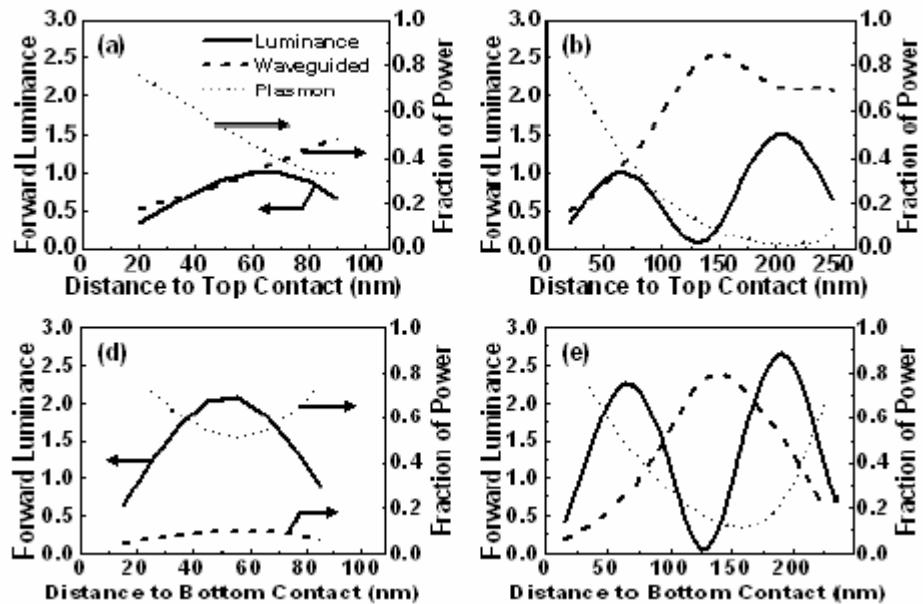


圖1-9：(a)在1-unit的四種模態的比例 (b)在2-units的四種模態的比例

作者利用高穿透度的ITO當陽極，高反射的鋁當陰極，這是非共振的

模式，其元件的結構如下所示。1-unit :Glass/ITO(120

nm)/m-MTDATA :2wt%F₄-TCNQ(20nm)/NPD:2wt%F₄-TCNQ(8nm)/

NPD(10nm)/TCTA(10nm)/TCTA:8wt%Ir(ppy)₃(5nm)/TAZ:8wt%

Ir(ppy)₃(10nm)/TAZ(10nm)/BPhen(10nm)/BPhen:20mol%Cs(27nm)/Al(

1nm)/Ag(150nm);2-units :Glass/ITO(120nm)/m-MTADATA :2wt%F₄-TC

NQ(20nm)/NPD:2wt%F₄-TCNQ(10nm)/NPD(10nm)/TCTA(10nm)/TCT

A:8wt%Ir(ppy)₃(5nm)/TAZ:8wt%Ir(ppy)₃(10nm)/TAZ(10nm)/BPhen(10

nm)/BPhen:20mol%Cs(40nm)/NPD:2wt%F₄-TCNQ(40nm)/NPD(10nm)/

TCTA(10nm)/TCTA:8wt%Ir(ppy)₃(5nm)/TAZ:8wt%Ir(ppy)₃(10nm)/TA

Z(10nm)/BPhen(10nm)/BPhen:20mol%Cs(40nm)/Al(1nm)/Ag(150nm)

，作者將tandem OLEDs的光學計算結果如圖1-10所示。

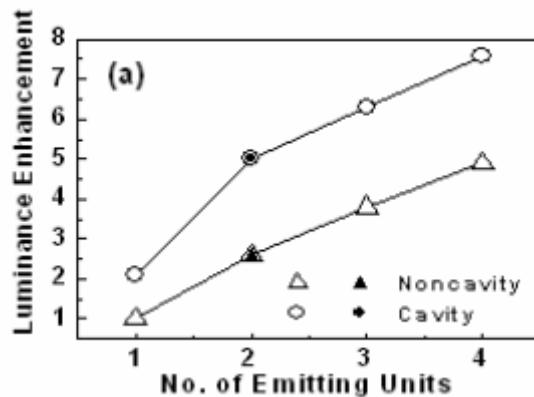


圖 1-10：單位個數與正面光強度的特性

我們可以發現當2-units其正面光最大可以增加2.6倍。而在今年2007年Kodak的J. Spindler et al.[109]也發表了用藍紅黃綠四層的tandem結構光色在 20mA/cm^2 下可以達到(0.32, 0.35)，驅動電壓為9.3V，在500 nits下， $t_{1/2}$ 可達到140000小時。

而在2007年SID會議上，Novaled由J. Birnstock et al.[110] 發表了

-i-n綠光的螢光以及磷光系統的效能特性、紅光的螢光及磷光系統的效能特性、以及螢光白光系統的效能特性，我們將之整合於表1-4中。

表 1-4 : *p-i-n* 元件效能

<i>p-i-n structure</i>	<i>type</i>	<i>performance</i>
綠光磷光	Top	1000,000hur@500nits
綠光螢光	Bottom	200,000hur@500nits
紅光磷光	Top	(0.68, 0.31), 31 cd/A 19 lm/W, 2.7V@1000nits 250,000hur@1000nits
紅光螢光	Bottom	(0.67, 0.33), 7 cd/A 2.8V@1000nits 1000,000hur@1000nits
三波段螢光白光	Bottom	6%E.Q.E,(0.23, 0.31) @1000nits 29,000hur@1000nit



而 Hitachi 也在 2007 年提出了以螢光藍光層結構(monochromatic emission unit)以及磷光綠光以及紅光結構(pолychromatic emission unit)在這兩個結構中插入一層電荷產生層(charge generation layer, CGL)的多層光子發光(multi photon emission, MPE)的白光結構，而此篇論文的 CGL 是採用 V_2O_5 ，而此元件結構如圖 1-11 所示[111]。

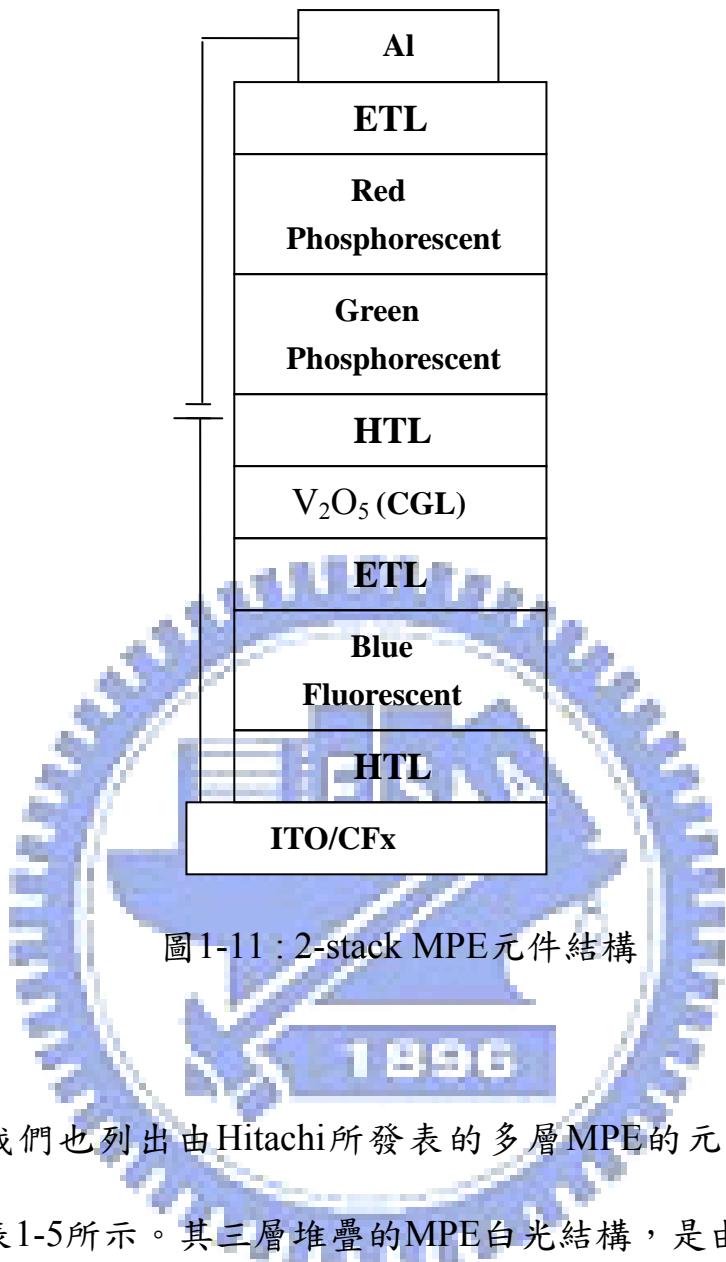


圖1-11：2-stack MPE元件結構

而我們也列出由Hitachi所發表的多層MPE的元件CIE_{x,y}值部分，如表1-5所示。其三層堆疊的MPE白光結構，是由藍綠紅所組成；而四層堆疊的MPE白光結構，是由藍藍綠紅所組成，而元件的壽命在1000nits下，其 $t_{1/2}$ 也可達至11000小時。而由表1-5也顯示隨著堆疊層數越多，其光色越接近純白光的(0.33, 0.33)，但其電壓也隨著堆疊個述的增加，在四層堆疊時，1000nits下，其電壓已經達到30V。

表 1-5 : 多層MPE白光結構的CIE_{x,y}

stack MPE structure	CIE (x , y)
3-stack MPE (R/G/B)	(0.39 , 0.39)
4-stack MPE (R/G/B/B)	(0.31 , 0.32)

1.5.4 倒置式(inverted) OLEDs

倒置式OLED元件是以ITO為陰極，而Al為陽極，是將傳統的元件結構反過來。而之所以會發展這個結構是由於要搭配a-Si TFT，由於a-Si TFT對於電子的傳遞較佳，因此發展出直接將ITO長在a-Si TFT的電極上，如此直接由ITO傳遞電子給OLED元件而發光。然而，而ITO的功函數不利於傳送電子，因此由本實驗室所開發出在ITO電極與電子注入層間插入一層薄鎂層[112]，薄鎂層可以使得ITO跟電子注入層間的能障彎曲，而增加電子注入的機會。然而我們也發現加入鎂的倒置式元件結構其壽命均很長，其*p-i-n*白光的元件在400 nits下，其t_{1/2}可達至34000小時。在2007年的SID會議上由Samsung的J. H. Lee et al.[113]發表了可以大幅減少微共振腔效應的OLED的結構，除了可以改善倒置式結構所存在的濺鍍(sputter)透明電極而會破壞有機層的問題，也能改善上發光元件結構所面對的微共振腔的問題。此篇論文有提及主要是在元件結構中加入由Samsung自行發展的電子傳輸層材

料、電子注入材料以及新的陰極材料，來改善因倒置式結構所會造成的濺鍍而破壞有機層；另外一項值得注意的就是此新的結構可以藍紅綠三個獨立發光層的厚度調整成一致，這點就克服了上發光元件所要考慮的微共振槍的問題，然而改善了這兩個問題，但其藍光以及綠光的色純度卻較低，而為了補償此色純度的問題，對於藍光的要求也極為嚴格，必須要讓藍光的色純度到(0.13, 0.07)，因此仍是一項挑戰。

而穿透式OLED元件也在近幾年有所發展，在2006年，由本實驗室發表的由p-i-n結構並且配合以金為陽極，ITO為陰極的倒置式白光元件，其總發光效率為上下電極發光效率的總合[114]；在SID'06會議上，由香港大學[115]所發表的利用非倒置式的結構製程了穿透式的OLED元件，其結構如下所示：Glass/ITO/ m-MTDATA(40 nm) / NPB (10nm)/Alq₃:C545T(2wt%,30nm)/BCP(20nm)/LiF(1nm)/Al(3nm)/Ag(70 nm):CF_x-plasma/m-MTADATA(40nm)/NPB(10nm)/Alq₃:C545T(2wt%,30 nm)/BCP(20 nm)/LiF(1 nm)/Al(3 nm)/Ag(25 nm)，此結構是利用一個強的微共振腔配合另一個弱的微共振腔來達到穿透式元件的效能，在1000 nits下，其上電極的效率可達9.9 lm/W，下電極則可達8.6 lm/W。

貳、研究動機

WOLED可提供和傳統顯示器不同的應用，尤其是在產業界，為了節省成本以及降低功率損耗，WOLED是個不錯的選擇。而其主要應用以LCD的背光模組以及照明為主。為了達到更高的NTSC ratio，我們以發展白色純度更高的OLED來達到此目的；而另一個應用是用在照明，在前面我們曾經提到，OLED如果要運用於照明，其CRI值必須至少要達到80。

而由於雙波段白光的CIE(x, y)值較難達到(0.33, 0.33)，所以本論文以三波段白光來達成此目的，而為了降低驅動電壓，也以p-i-n的結構來搭配白光的元件結構，而由於傳統的螢光白光系統在效率上都只達到 $5 \sim 6 \text{ cd/A}$ ，所以希望能更進一步的希望能提升螢光白光的效率。

參、實驗部分

3.1 元件材料

以下是*p-i-n*螢光三波段白光元件所使用的材料：

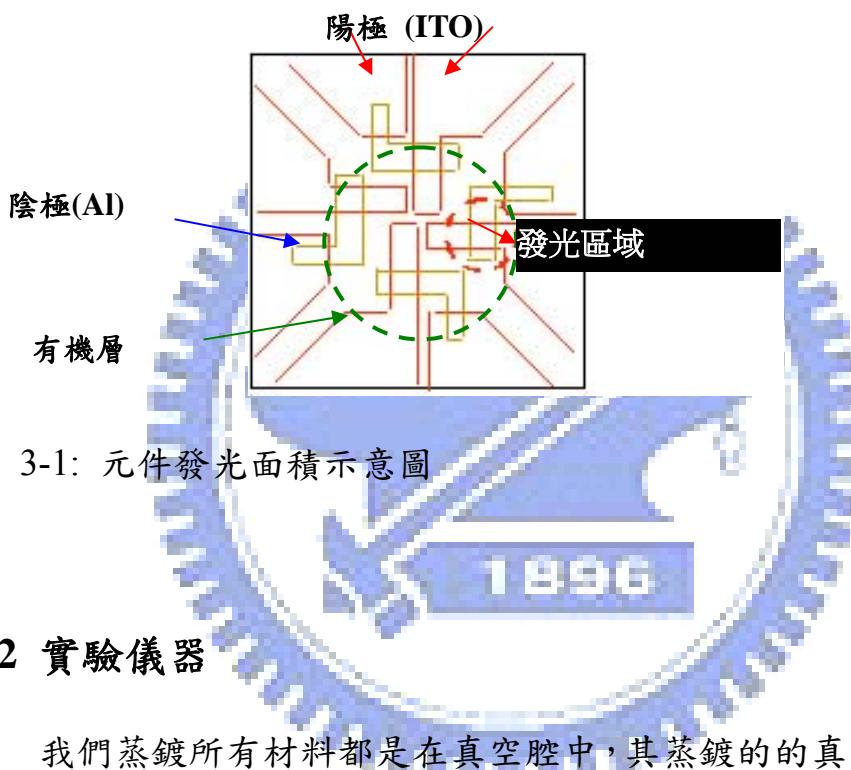
- (1) ITO：陽極電極材料。其面電阻為 $20\Omega/\square$ ，由AUO所提供。
- (2) NPB (N,N'-diphenyl-N,N'-(2-naphthyl)-4,4'-diamine)：電洞傳輸層材料。
- (3) Alq₃ (Tris(8-quinolinolato)aluminum)：電子傳輸層材料。
- (4) BPhen (4,7-Diphenyl-1,10-phenanthroline)：電子傳輸層材料。
- (5) MADN (2-methyl-9,10-di(2-naphthyl)anthracene)：螢光主發光體材料。
- (6) Rubrene (5,6,11,12-tetraphenylnaphthacene)：螢光黃光客發光體材料。
- (7) WO₃ (tungsten oxide)：*p*型摻雜材料。
- (8) LiF (lithium fluoride)：電子注入層材料。
- (9) Cs₂CO₃ (cesium carbonate)：*n*型摻雜材料。
- (10) DCJTB(4-(dicyanomethylene)-2-*t*-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran)：紅光客發光體材料。
- (11) α,α -MADN：螢光主發光體材料。

(12) BpSAB：深藍光客發光體材料。

(13) C545T：綠光客發光體材料。

(14) Al (aluminum)：陰極金屬。

ITO 塗佈在玻璃基板上的面積為 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$ 。而發光面積為 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 。如圖 3-1 所示。



3.2 實驗儀器

我們蒸鍍所有材料都是在真空腔中，其蒸鍍的的真空度壓力範圍為 10^{-5} 到 10^{-6} Torr。我們之所以會用真空系統主要是因為要避免水氣以及氧氣對有機層的破壞。而此真空系統 (vacuum coater) 如圖 3-2 所示，並且其裝備的作用如以下的描述。

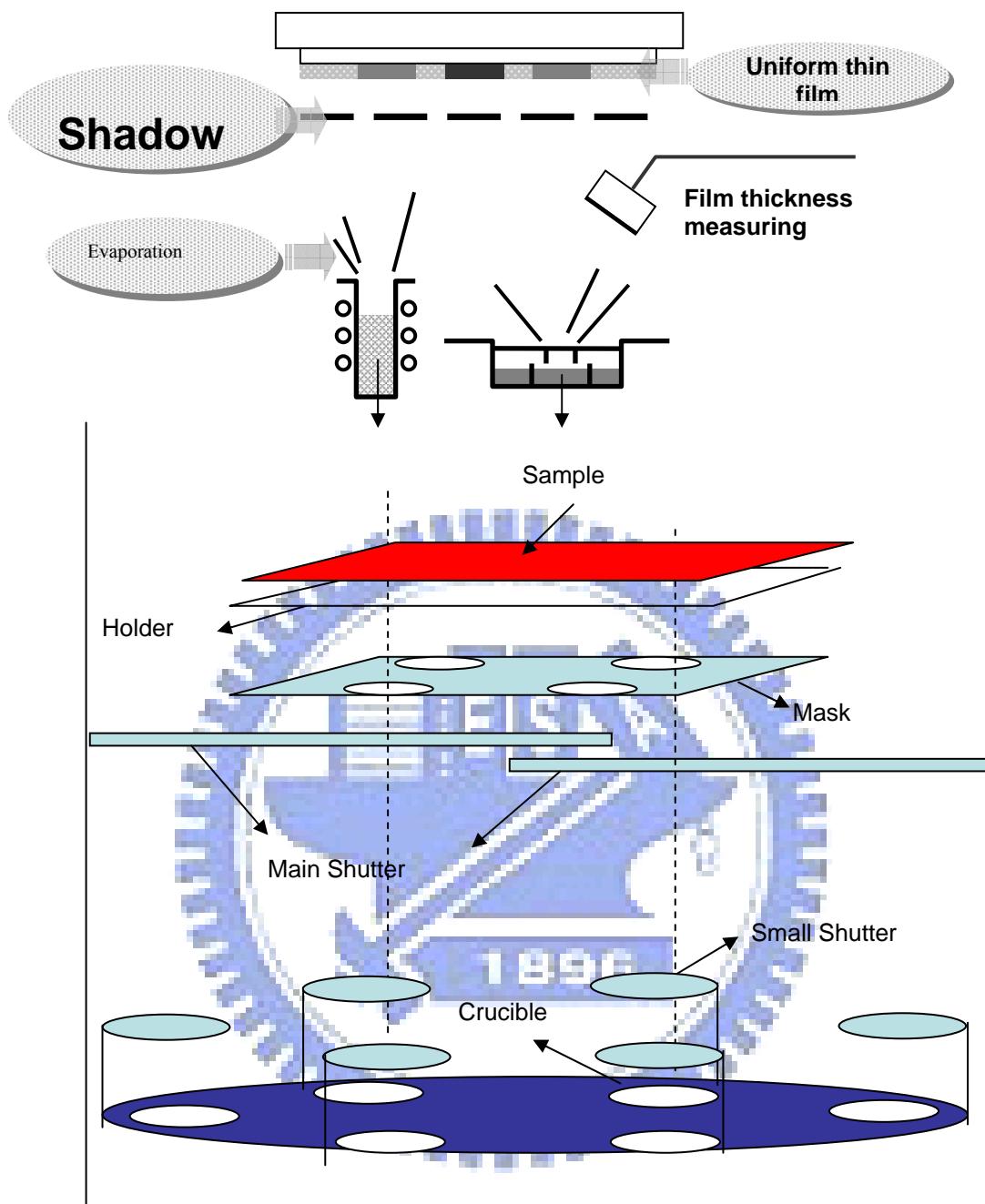
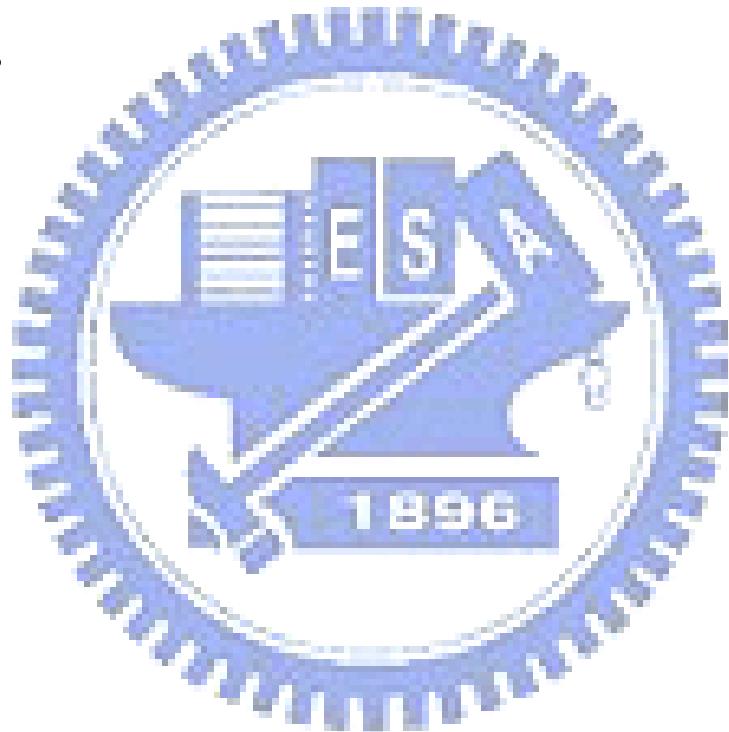


圖 3-2：真空腔體的示意圖

- (1) **Holder**：將實驗的基板放於此，經由儀器的ROTATE，可使鍍上的膜均一化。
- (2) **Thickness/rate monitors**：此裝置可以經由晶體振盪器偵測膜厚及

鍍率。

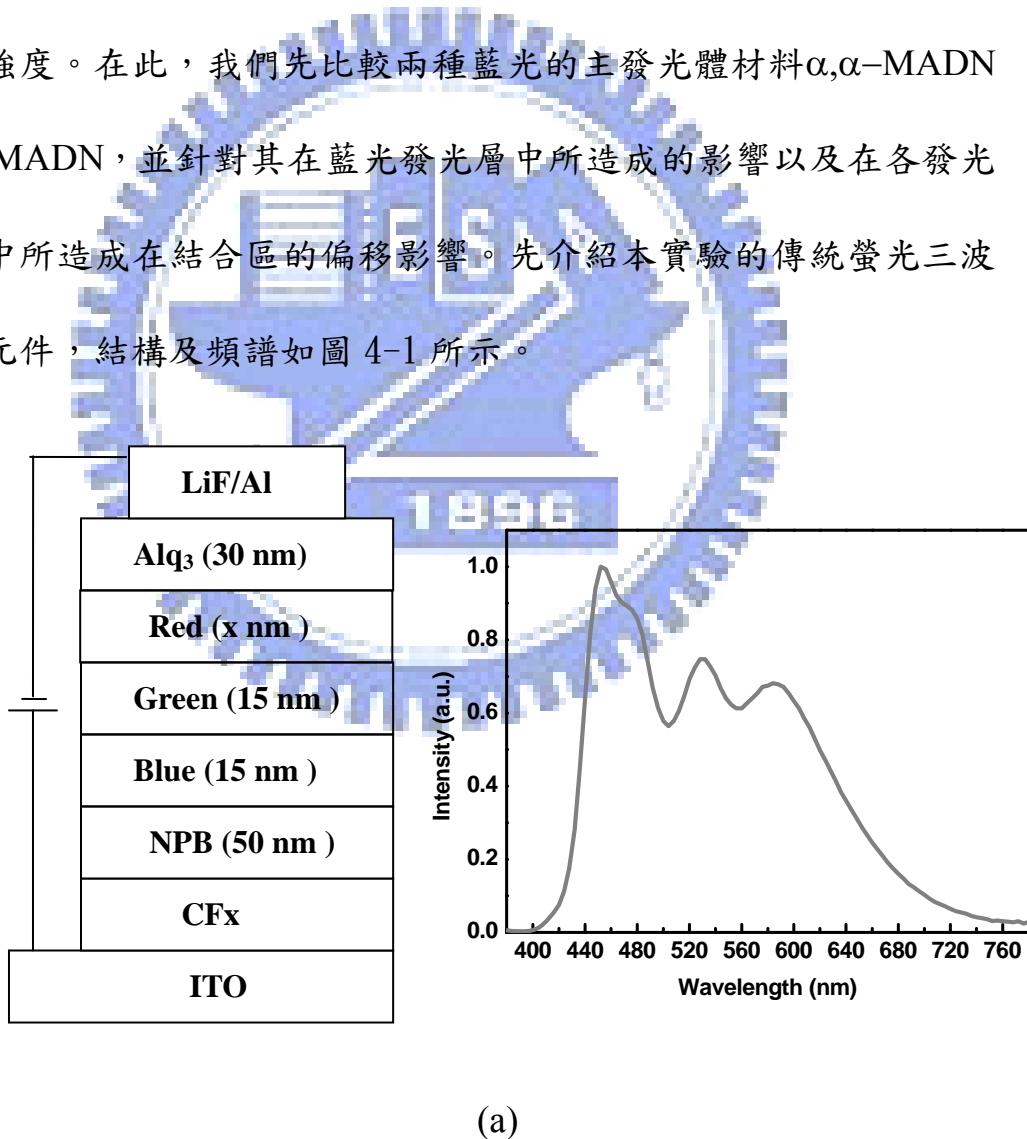
- (3) **Shutter**：當shutter打開時，可以鍍上我們要的有機材料，而當膜厚到我們要的膜厚時，將shutter關閉。
- (4) **Crucible**：我們放材料在此裝置中。藉由鎢絲線來加熱此裝置，使得裝置中的材料因加熱而蒸鍍在元件上。
- (5) **Heater**：加熱器有兩種型式：一種是直流加熱器，另一種是交流加熱器。



肆、結果與討論

4.1 *p-i-n* 螢光三波段 WOLED

三波段白光的系統中，深藍光的部分扮演了很重要的角色。由於傳統上三波段白光基於深藍光的強度不夠，而造成了白光的色度不夠純，因此在這篇論文中，我將探討如何提升三波段的深藍光強度。在此，我們先比較兩種藍光的主發光體材料 α,α -MADN與 MADN，並針對其在藍光發光層中所造成的影响以及在各發光層中所造成在結合區的偏移影響。先介紹本實驗的傳統螢光三波段元件，結構及頻譜如圖 4-1 所示。



(a)

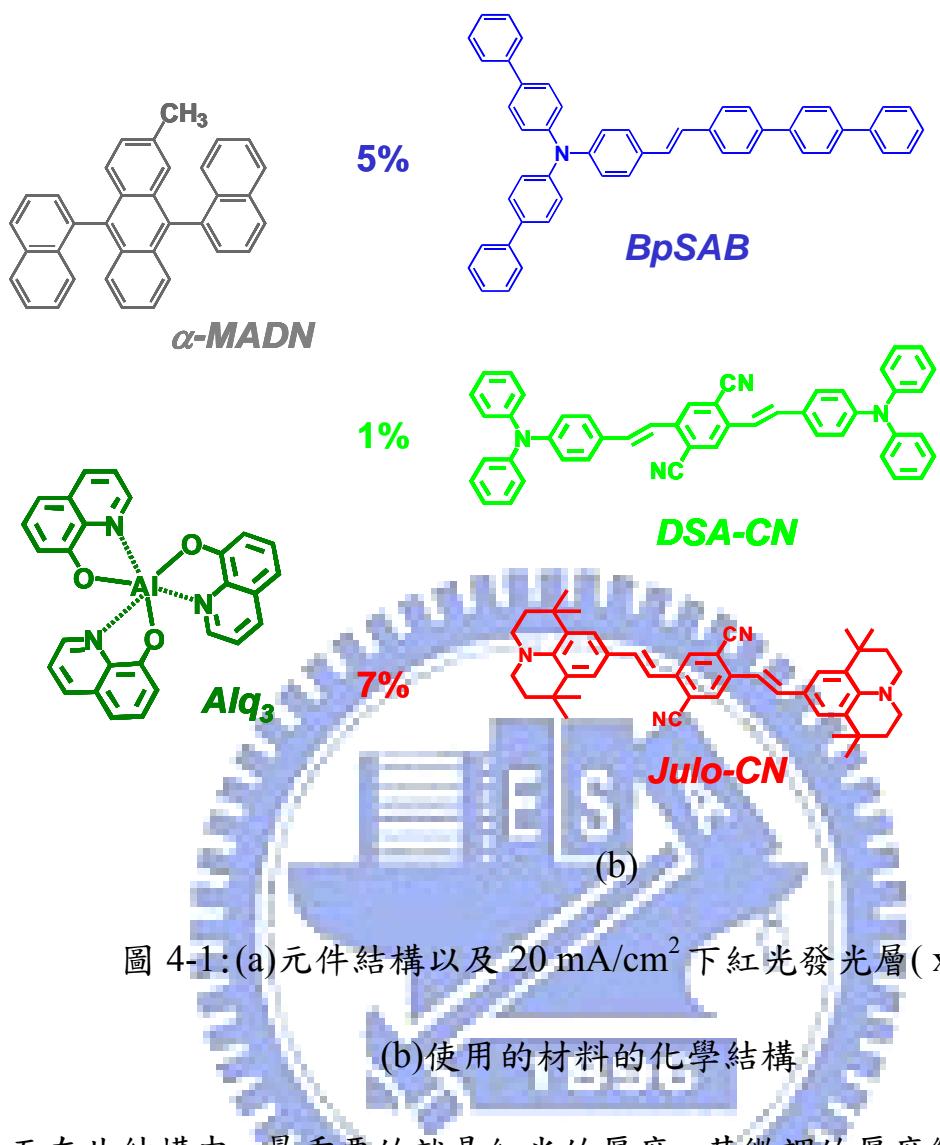


圖 4-1:(a)元件結構以及 $20 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 下紅光發光層(x:2)的頻譜

(b)使用的材料的化學結構

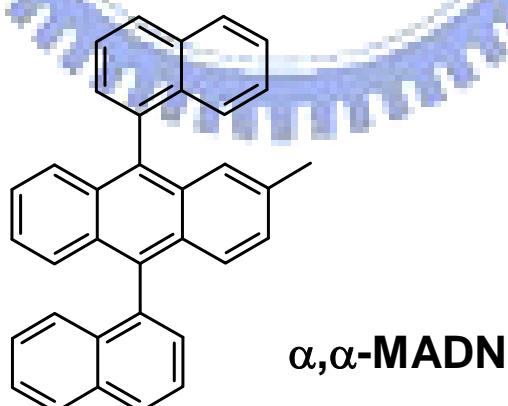
而在此結構中，最重要的就是紅光的厚度，其微調的厚度變化可以影響其元件的光色。元件的效能如表 4-1。

表 4-1：在 $20 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 下的元件效能 (x:2 vs. x:1)

Device	Voltage (V)	Yield (cd/A)	Efficiency (lm/W)	CIE (x, y)	NTSC (%)
15/15/2	6.7	5.2	2.4	(0.31, 0.33)	68.1
15/15/1	6.9	6.5	3.0	(0.33, 0.38)	66.0

而由於傳統的三波段元件是採用單一的主發光體材料 MADN，由元件的效能，我們可以看出當紅光發光層的厚度為 2 nm 時，其藍光強度會往下掉紅光會往上升，造成 NTSC ratio 達到 68%；相反的，當紅光發光層厚度為 1 nm 時，其綠光跟紅光會往下掉，造成 NTSC ratio 為 66%，尤其是在經過彩色濾光片後，更可發現其元件部份的三個波段的純度仍然不足，而這些結果我將在後面跟已改善的元件結構做比較。

而我們為了改善三波段白光元件的純度，首要的事情就是要選擇一個好的藍光主發光體的材料，因此我們這裡將比較 α,α -MADN 與 MADN 的元件特性，其元件所使用的材料以及結構如圖 4-2 所示。我們先以綠光以及藍光的雙發光層結構來探討主發光體材料對於電子電洞的再結合區有何影響。



(a)

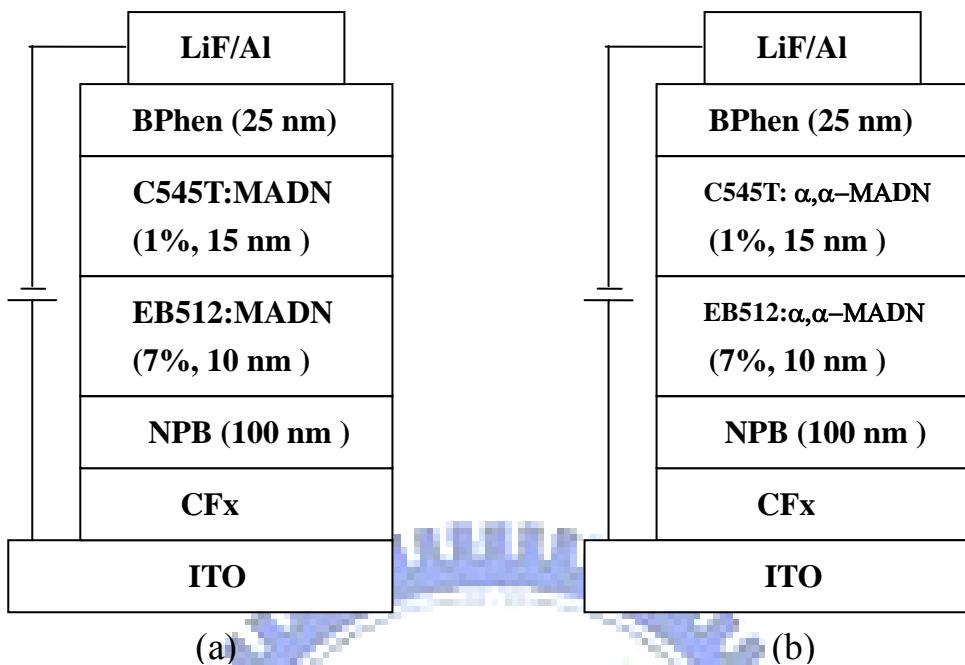


圖 4-2 : (a) : 使用的藍光材料結構 (b) : Device A 元件結構 (c) :

Device B 元件結構

而此兩元件的頻譜如圖 4-4 所示。從圖 4-3，亮度對電壓的圖

中，我們可以得知在相同的電壓情況下，Device A 的亮度是比

Device B 高，但是從圖 4-4 的頻譜中，我們卻發現在相同亮度之

下，Device B 的藍光強度卻比 Device A 的藍光強度強，我們推測

這個內部的機制是由於我們控制了電子電洞的再結合區而導致發

光的機制，並非藉由能量轉移由藍光傳給綠光而發光。我們也知

道電洞傳送的速度會比電子快，而從頻譜中，我們也得知由

α,α -MADN為藍光主發光體材料的 Device B 由於相同電壓下，其

藍光強度比以 MADN 為藍光發光體材料的 Device A 強，所以我們也推測 α,α -MADN比起 MADN 有較強的傳電子能力。

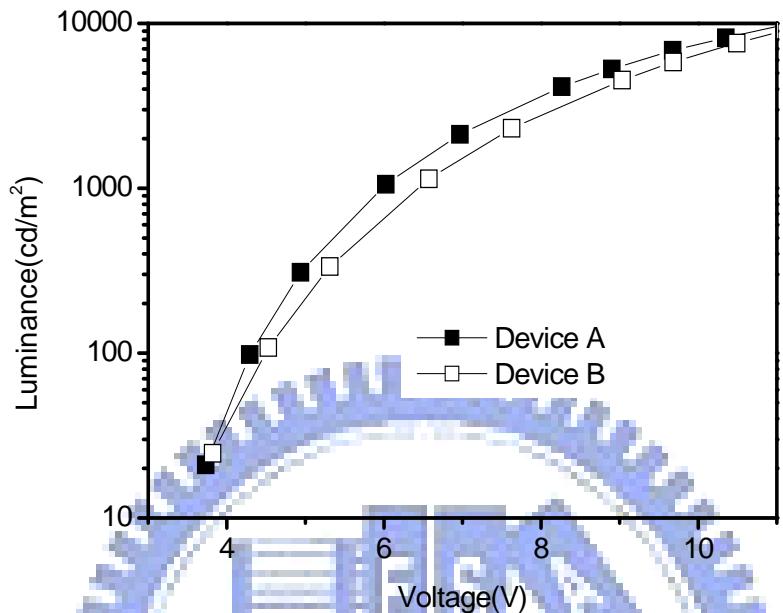


圖 4-3 : Device A 和 Device B 亮度 vs. 電壓的特性

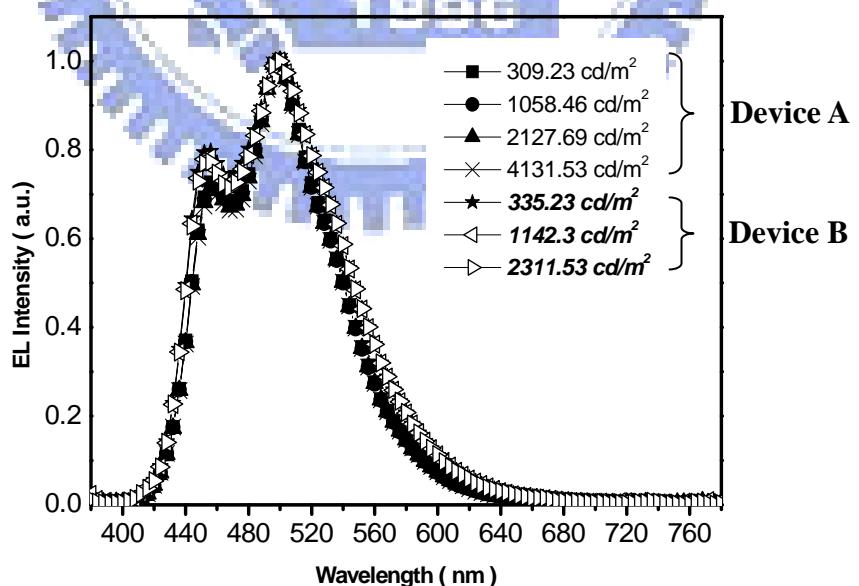


圖 4-4 : Device A 和 Device B 在不同亮度下的頻譜變化

我們也以能階示意圖來解釋為何 α,α -MADN比起 MADN 有較好的電子傳輸的能力，如圖 4-5(a)所示。

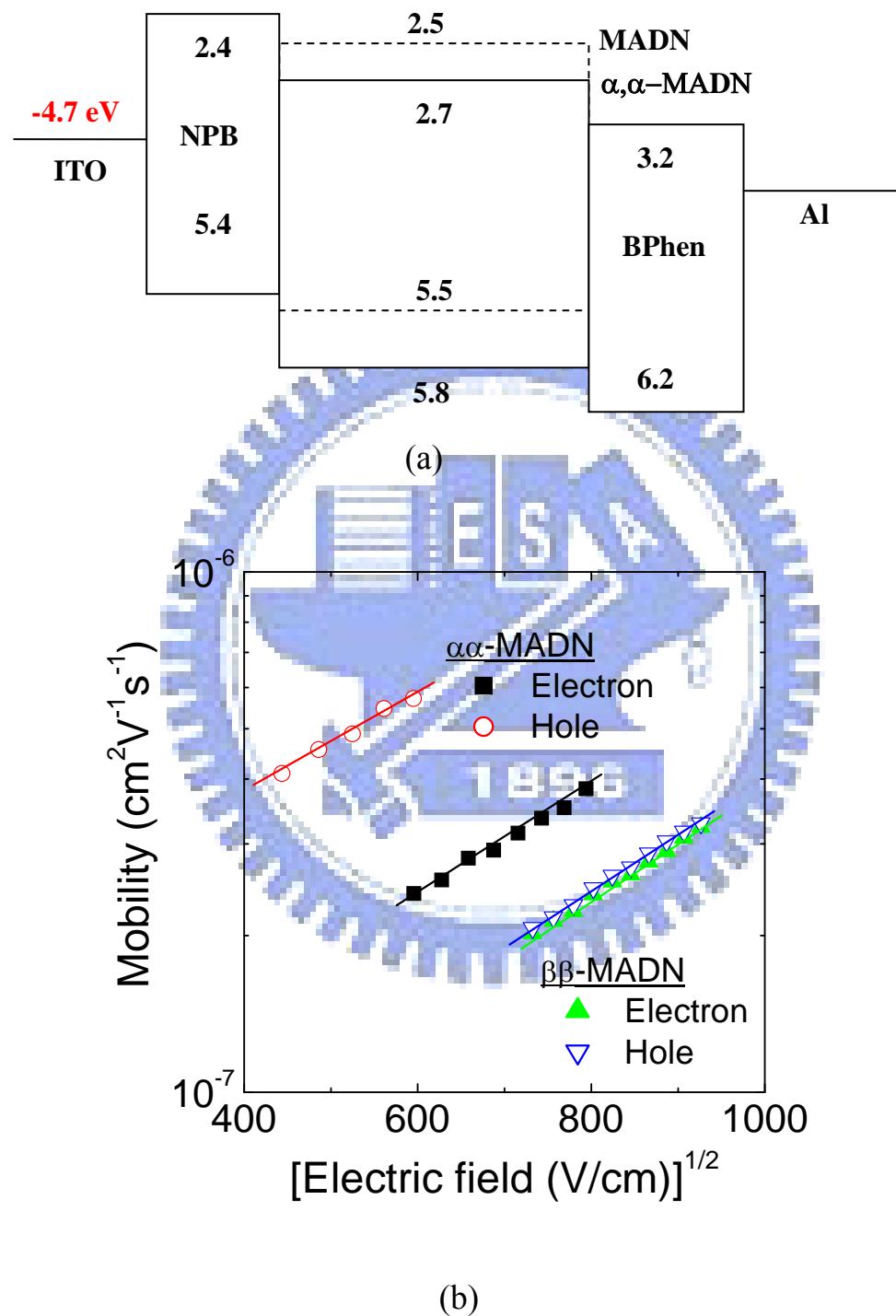


圖 4-5 : (a) Device A 與 Device B 的能階示意圖 (b)電洞電子遷移率的比較

由於 α,α -MADN比起 MADN 有較低的 LUMO，故它可使得電子較容易傳輸到藍光發光層，造成在相同的亮度下，其有較強的藍光強度。而藍光主發光體的材料除了要求其有較好的電子傳輸能力外，效率的部分也是我們所要求的另一個重點。而由 M. H. Ho et al. 在 2006 年所發表的對於 MADN 與 α,α -MADN 在電洞以及電子的遷移率方面的比較如圖 4-5(b)所示。由圖 4-6 的 Device A 與 Device B 的元件效率比較，我們可以很明顯的看到其 α,α -MADN的效率比起 MADN 要來的高，因此我們將繼續以三個獨立發光層的標準白光元件來探討 α,α -MADN的特性。

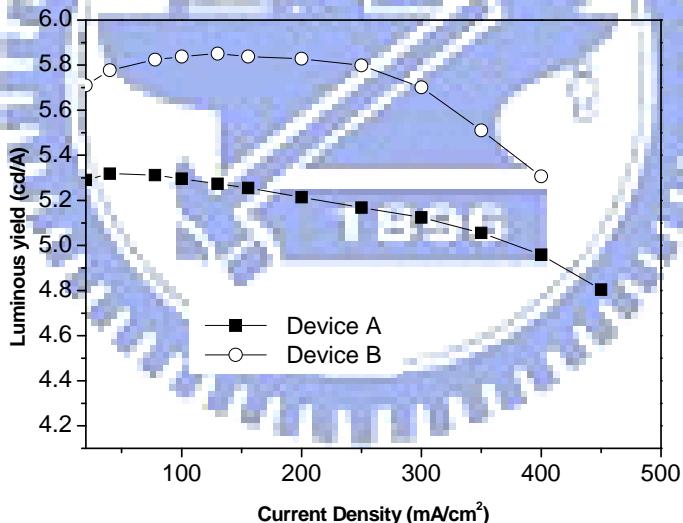


圖 4-6 : Device A 和 Device B 在不同電流密度下的效率特性

我們設計了三個獨立發光層的白光元件，並且分別以 α,α -MADN 及 MADN 為其藍光的主發光體材料做其比較，其結構如圖 4-7 所示。

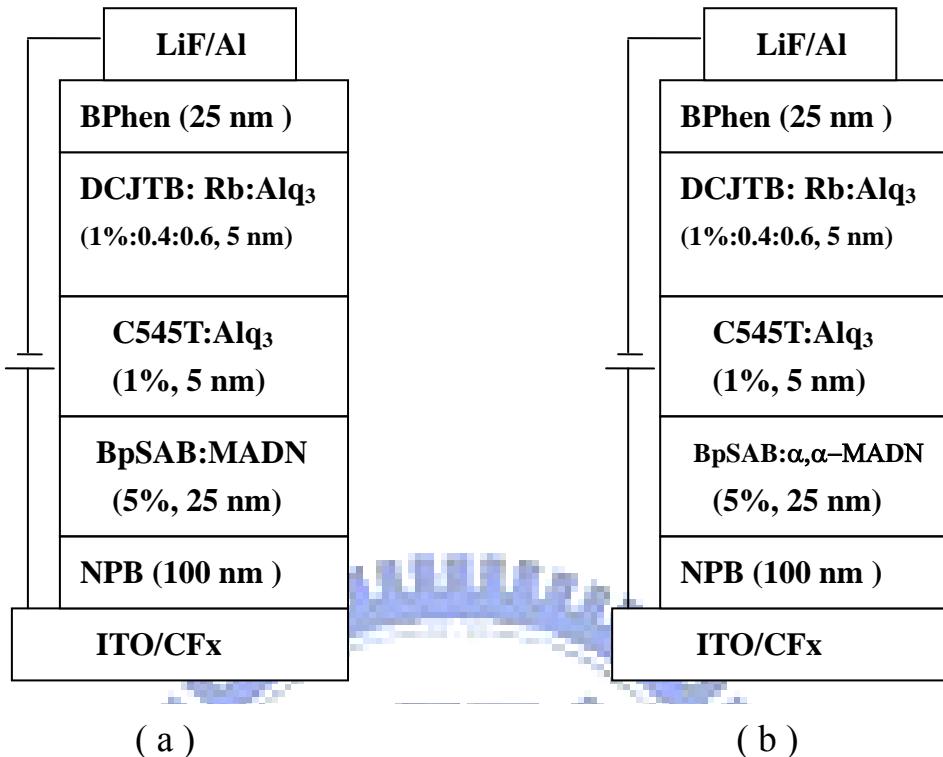


圖 4-7 : (a) : Device C 的元件結構圖 (b) : Device D 的元件結構圖

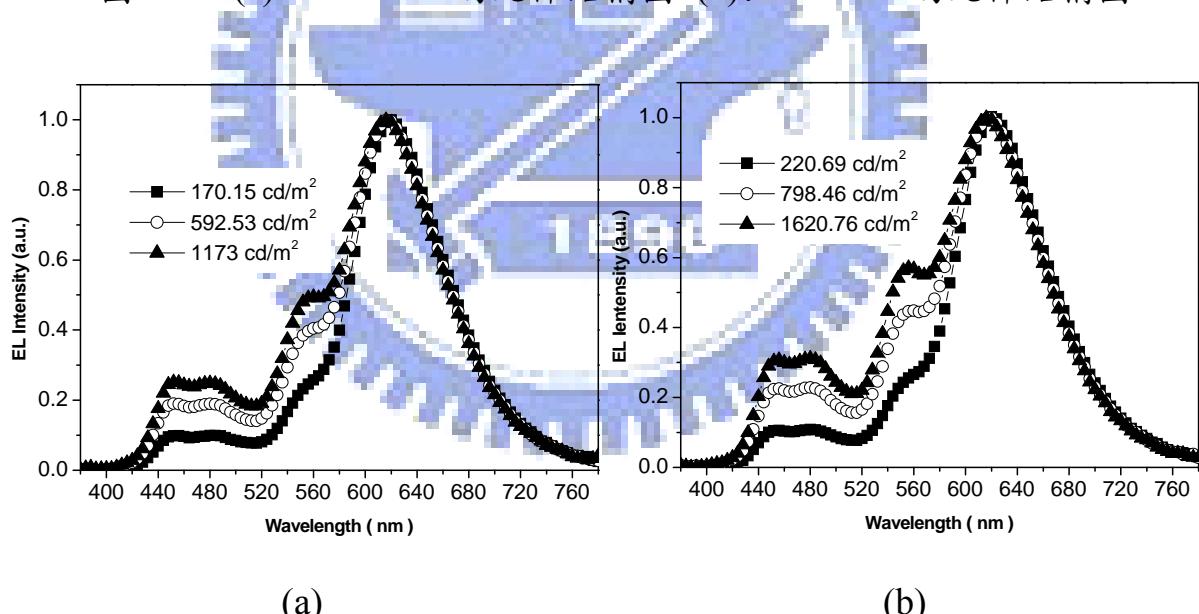


圖 4-8 : (a) : Device C 在不同電流密度下的頻譜變化 (b) : Device D 在
不同電流密度下的頻譜變化

我們從圖 4-8 的頻譜中可以得知，由於元件的再結合區落在綠光

跟紅光並且也發現有黃光(550 nm)出現，且黃光的強度比綠光(525 nm)還強。我們推測有兩個可能的原因導致這樣的結果，第一個就是在紅光發光層中，由黃光能量轉移給紅光時，能量轉移不完全；第二種可能的原因是綠光在此白光元件中，可能發光的強度太弱，造成頻譜上看不出綠光的強度，使得黃光的強度顯現出來。而由此三個獨立發光層的白光元件看來，由於 Device D 的藍光強度較 Device C 強， α,α -MADN確實擁有較強的傳送電子的能力，因此之後的實驗，我們將採用 α,α -MADN探討白光其他結構的特性，進而達到將白光元件結構運用到 $p-i-n$ 的結構時，能將其最佳化。

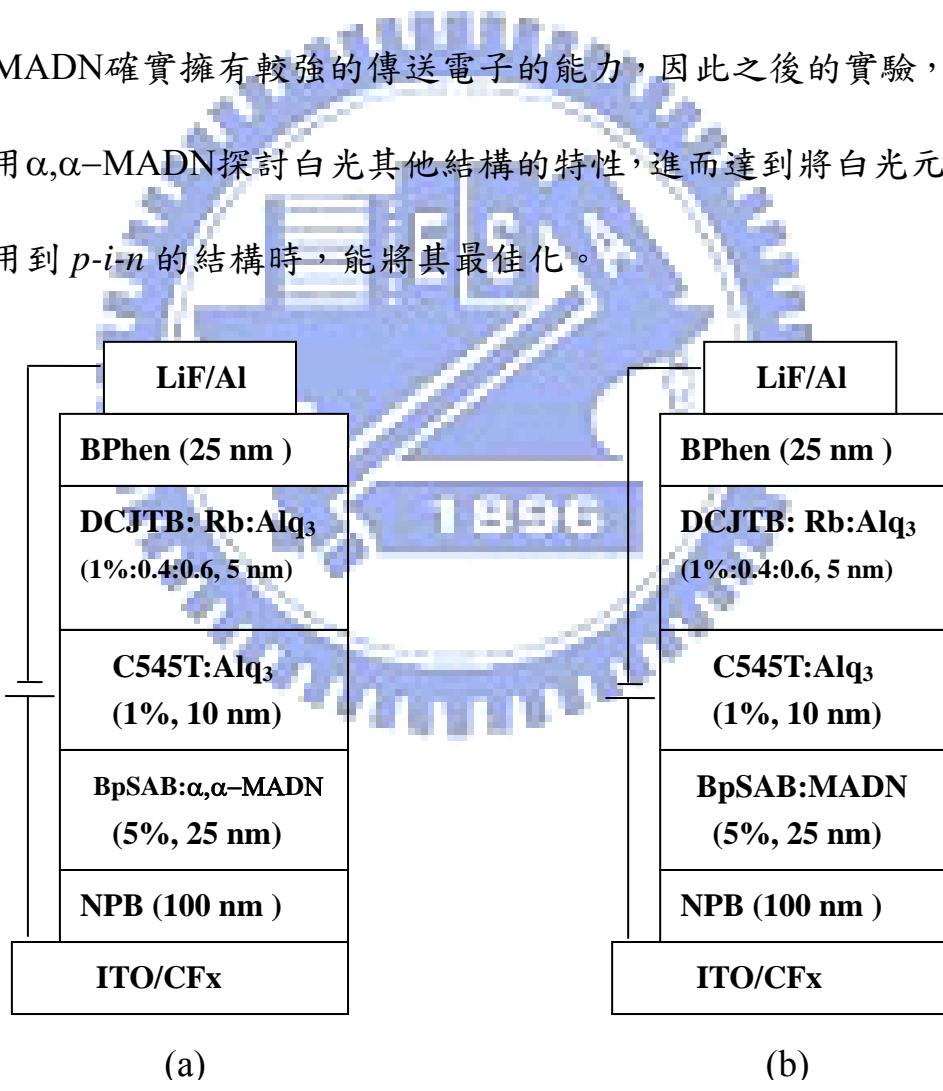


圖 4-9 : (a) : Device E 的元件結構圖 (b): Device F 的元件結構圖

而為了證明到底是由哪個原因導致元件會出現黃光，引此我們先

做了第一假設，假設綠光不發光的話，我們將此綠光發光層的厚度由原本的 5 nm 變厚至 10 nm，來看其頻譜的變化情形，其元件的結構如圖 4-9 所示。其元件的頻譜圖如圖 4-10 所示，由圖 4-10 的頻譜，我們可以看出增加了綠光發光層的厚度後，其頻譜中黃光的強度仍就很強，而且在這兩個元件中，黃光強度幾乎是綠光的兩倍。

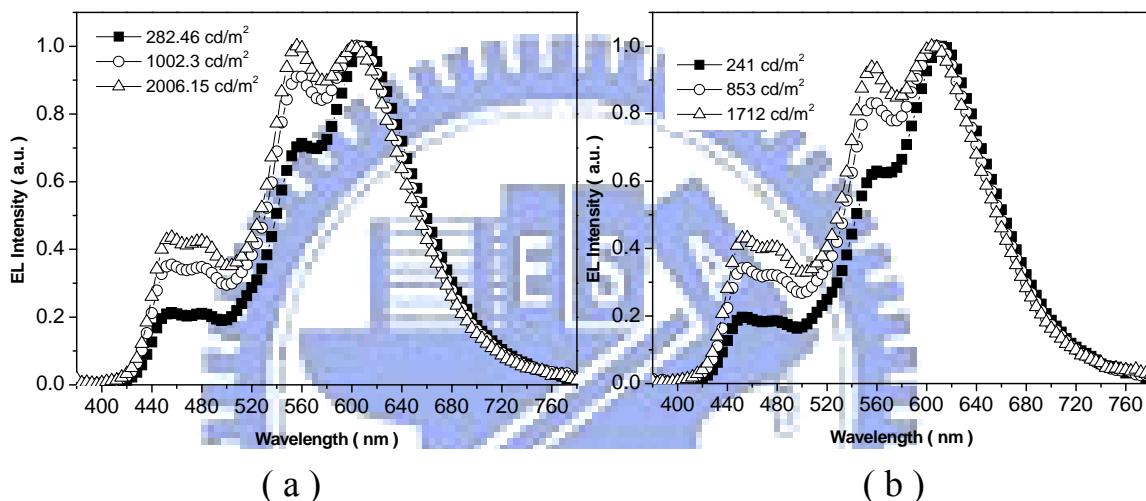


圖 4-10 : (a) : Device E 在不同電流密度下的頻譜變化 (b) : Device F

在不同電流密度下的頻譜變化

故我們假設第二種原因是因為能量轉移不完全所致，主要是因為紅光發光層太薄而致使黃光能量轉移到紅光時不完全，因此根據第二個假設，我們增加了紅光發光層的厚度，由 5 nm 增加到 10 nm，來看其元件的特性為何，是否能有效的抑制黃光的出現，其元件結構如下：Device G: Glass/ITO/CFx/NPB (100 nm)/ BpSAB: α,α -MADN (5%, 25 nm)/C545T:Alq₃ (1%, 10 nm) / DCJTB:Rb:Alq₃(1%: 0.4: 0.6,

10 nm)/BPhen (25 nm)/LiF (1 nm)/Al. 而由此元件結構的頻譜特性，如圖 4-11 所示，我們可以看出，當將紅光發光層的厚度變厚後，其再結合區幾乎都是在紅光發光區。因此我們將以 Device G 的能階示意圖，如圖 4-12 所示，來探討為何發光的現象全部為紅光。

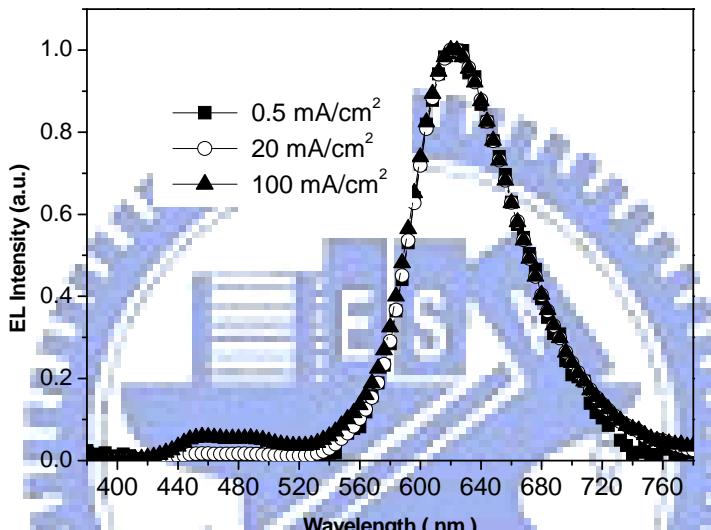


圖 4-11 : Device G 在不同電流密度下的頻譜變化

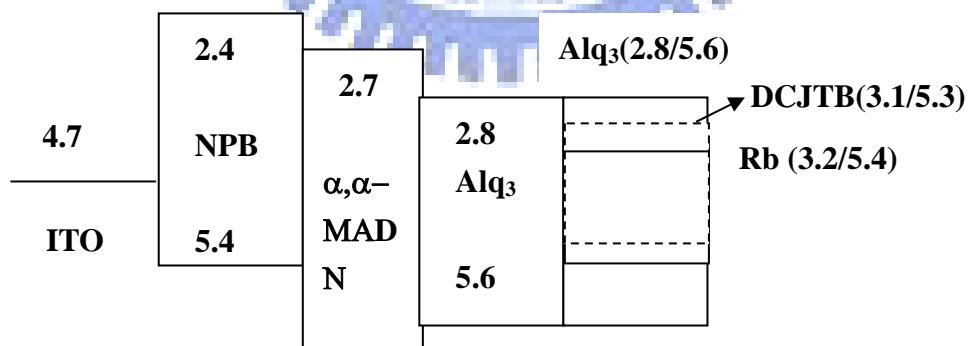


圖 4-12 : Device G 的能階示意圖

由能階示意圖中，我們可以看出 DCJTB 的 LUMO 為 3.1eV 以及

rubrene 的 LUMO 為 3.2eV 都比 Alq₃ 來的低，造成電子很容易會被捕捉在紅光的發光層，又由於電洞的速度比電子快，因而使得再結合區落在紅光區，而又從高低電流密度來看，紅光的強度並沒有隨著高電流密度下而有所減弱，由此我們可以說，紅光發光層式是藉由載子的捕捉而放光的。也因為這個原因，我們設計了將 α,α -MADN 為三個獨立發光層的主發光體材料，而紅光發光層以 Alq₃ 和 α,α -MADN 的比例為 1:4 當作雙主發光體材料，另一個元件我們也將綠光設計成以 Alq₃ 和 α,α -MADN 的比例為 1:4 當作雙主發光體材料，看看是否紅光是因為 DCJTB 及 Rubrene 的捕捉載子而放光，如果將主發光體材料換成 α,α -MADN 的 HOMO 較高的情況下，是否再結合區會往綠光以及藍光移動。將雙主發光體材料放入綠光以及紅光發光層中，有另一個目的是為了要使得電子注入到藍光更加容易，因此如果此結構證明了紅光的強度有明顯的降低，而藍光的強度有明顯的增加的話，就能證明紅光發光層在我們的系統中，是不適合放在靠近電子注入層的位置。而我們所設計的元件結構如圖 4-13 所示。而由上述的圖 4-5 以及圖 4-12 所示，我們可以看出電子必須先克服 BPhen 以及 α,α -MADN 之間的能障，約有 0.5eV，才能讓電子從紅光發光層傳輸到綠光以及藍光，而且此能障也比 BPhen 和 rubrene 來的大。而隨著電

流密度的變大，其再結合區也會往藍光發光層移動，其元件的頻譜由圖 4-14 所示。

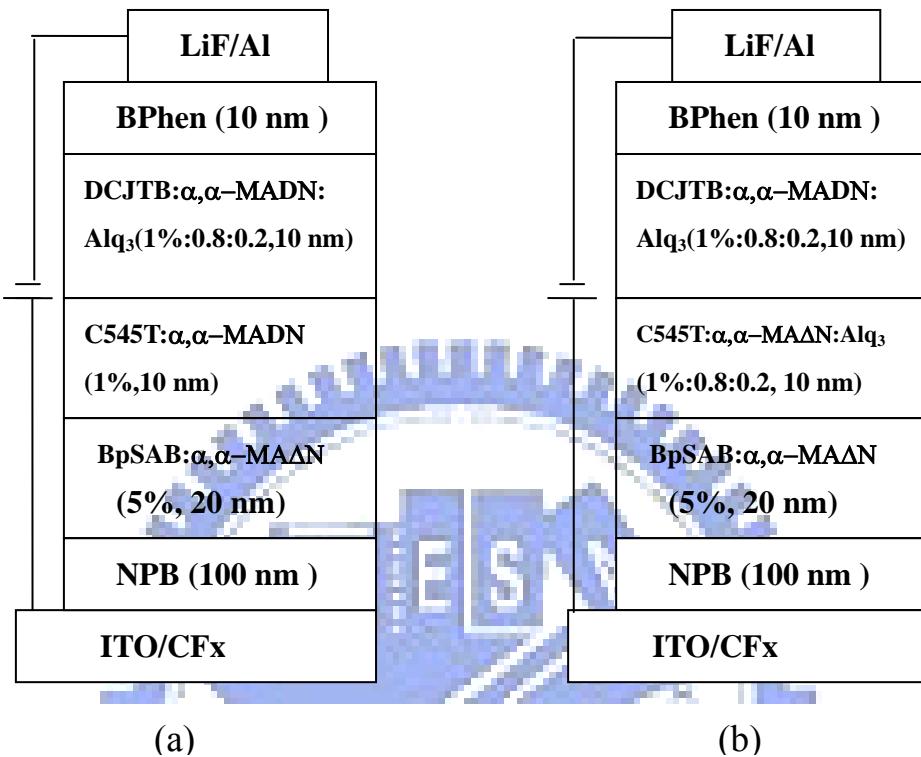


圖 4-13 : (a) : Device H 的元件結構圖 (b):Device I 的元件結構圖

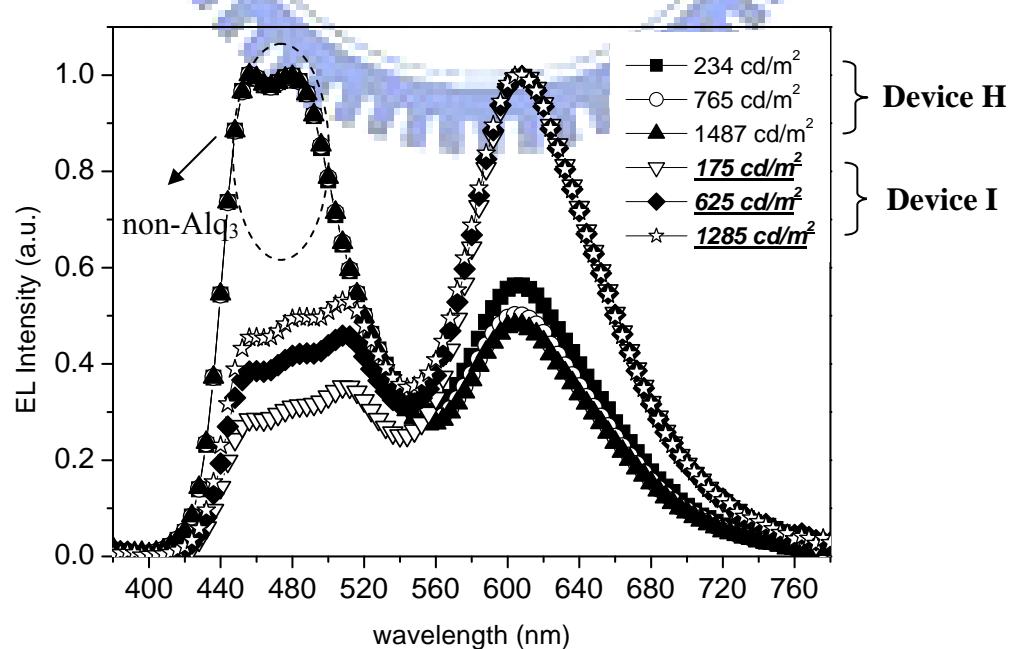


圖 4-14 : Device H 和 Device I 在不同電流密度下的頻譜變化

而我們從圖 4-14 中，我們也可以發現在綠光發光層中，由於 Device I 是利用雙主發光體材料由 α,α -MADN 以及 Alq₃ 所組成，由其頻譜，我們可以判斷其綠光的波長由 500 nm 移至 525 nm。然而 Alq₃ 的 LUMO 為 2.8eV 比 α,α -MADN 來的低，因此在雙主發光體的綠光系統中，其綠光發光層會發光也可能是由於綠光發光層的 Alq₃ 捕捉載子而發光所導致。Device H 也是因為在綠光發光層沒有用 Alq₃ 因此電子很容易可以注入到藍光發光層而使得藍光的強度變強但紅光強度卻降的太低了，變成只有原來強度的一半。因此這裡也整理出 Device H 與 Device I 在 20 mA/cm² 下的元件效能，如表 4-2 所示。

表 4-2：Device F 和 Device G 在 20 mA/cm² 下的元件效能

Device	Voltage (V)	Yield (cd/A)	Efficiency (lm/W)	E.Q.E (%)
H	8.6	3.8	1.4	2.3
I	7.5	3.1	1.3	1.6

而由上述的實驗，我們也可以證明了紅光發光區的捕捉載子機制的確是因為 DCJTBT 以及 rubrene 的捕捉電子而導致元件的再結合區落在紅光發光層。下面我們仍採以 Device H 的結構，並以不同的藍光客發光體材料的濃度 5% 和 7% 加以探討其對元件特性有何影響，其

元件結構如下所示：Device J: Glass/ITO/CFx / NPB (100 nm) / BpSAB: α,α -MADN (7%, 20 nm)/C545T: α,α -MADN (1%, 10 nm)/DCJTB: Alq₃: α,α -MADN (1%: 0.2: 0.8, 10 nm)/BPhen (10 nm)/LiF (1 nm)/Al 並且針對不同的藍光客發光體材料的濃度和 Device H 做比較。而 Device J 的頻譜如圖 4-15 所示。而我們也將 Device H 和 Device J 的元件效能整合在表 4-3 中。

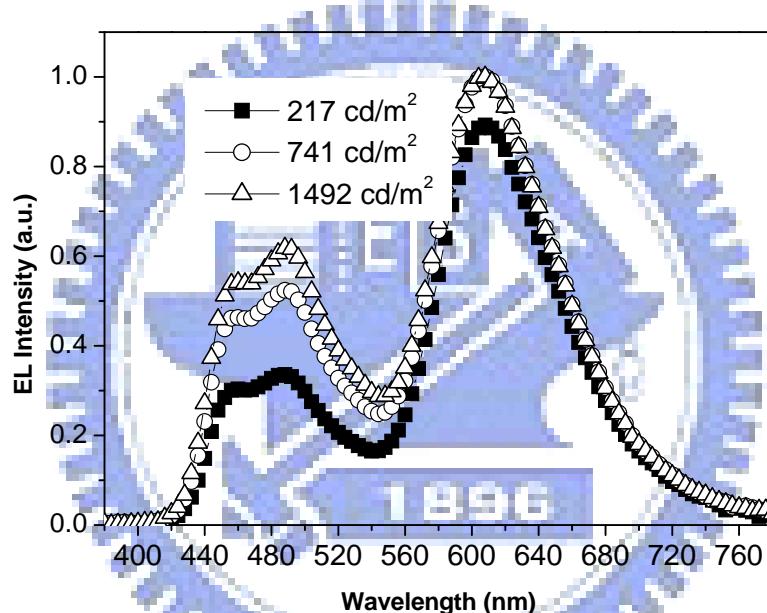


圖 4-15 : Device J 在不同電流密度下的頻譜變化

表 4-3 : Device H 和 Device J 在 20 mA/cm² 下的元件效能

Device	Voltage (V)	Yield (cd/A)	Efficiency (lm/W)	E.Q.E (%)
H	8.6	3.8	1.4	2.3
J	6.2	3.7	1.9	2.1

從圖 4-14 與圖 4-15 中，我們可以看出當使用藍光客發光體材料濃度為 5%時，其所表現的藍光強度會比 7%強；然而使用 5%的元件，其驅動電壓也較高，達到 8.6V 而使用 7%元件只有 6.2V，這是由於 5%的藍光客發光體濃度是採用自行捕捉載子而放光，如第一章所敘述，通常深藍光的發光都是由於客發光體自行捕捉載子而放光。而由表 4-3，也可看出在其他效能方面兩者式差不多的，故我們將以 5%的藍光客發光體濃度配合 $p-i-n$ 的結構，在可以降低驅動電壓的情況下，希望可以達到純白光的目標。然而，如果我們要讓我們的螢光系統配合得宜而得到高純度的白光元件，我們就必須克服紅光發光層所導致的捕捉載子的機制，免除在結合區完全落在紅光。因此我們改變元件的結構，必將紅光發光層的位置從靠近陰極換到靠近陽極，且在藍光以及紅光發光層中插入一層薄薄的電子阻擋層，這裡我們用的材料為 NPB，我們的目的是要讓電子電洞的再結合區落在藍光以及綠光的介面，其元件的結構設計如圖 4-16 所示。其實，由本章一開始所介紹的由於紅光的捕捉機制，因此紅光的厚度必須要很薄，因為厚度如果太厚，會造成兩個問題，第一是驅動電壓變大，第二是捕捉機制會讓元件的再結合區完全落在紅光發光層。而今，我們希望在紅光厚度為 10 nm 的情況下，仍能維持白光的純度以及低電壓的目標下，也是我們需將現有的元件結構加以改變的原因。

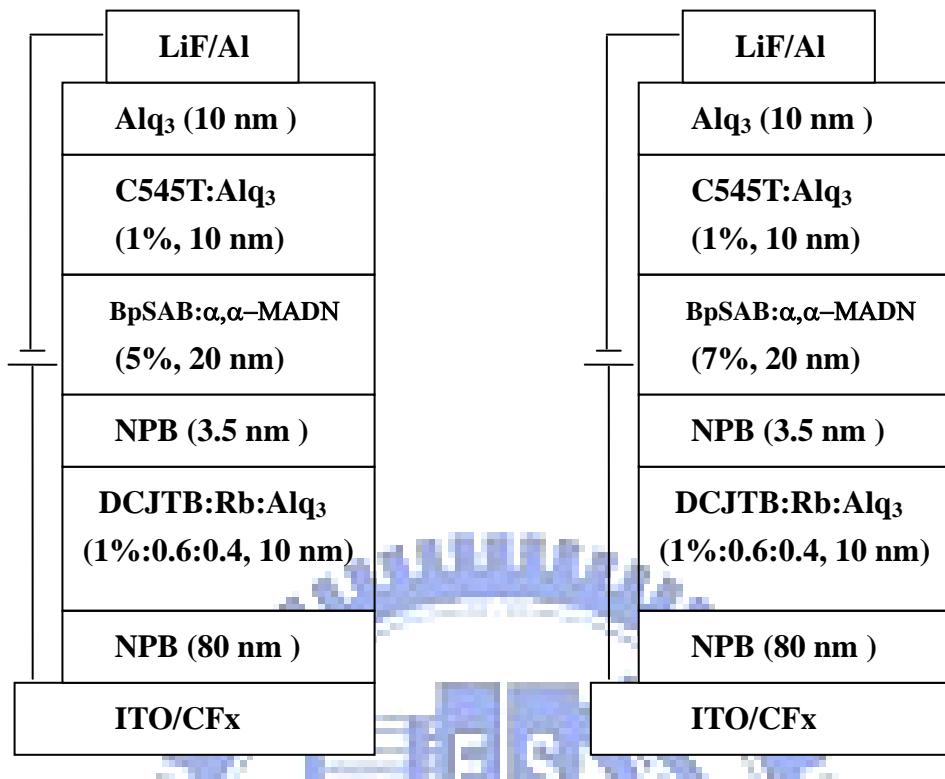


圖 4-16 : (a) : Device K 的元件結構圖 (b) : Device L 的元件結構

其元件的頻譜如圖 4-17 所示。我們仍以此結構比較不同濃度的藍光客發光體材料。

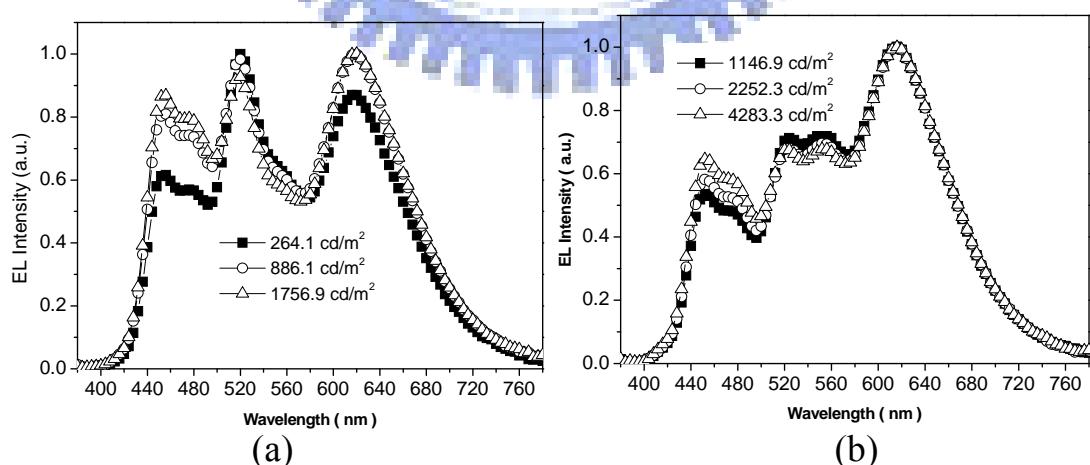


圖 4-17 : (a) : Device K 在不同電流密度下的頻譜變化 (b) : Device L 在不同電流密度下的頻譜變化

而從圖 4-17(b)，當使用的濃度為 7%時，可以看出藍光的強度仍比綠光以及紅光來的弱。而當使用濃度為 5%時，可以由圖 4-17(a)得知，其藍光發光強度隨著電流密的變大，有明顯的增強，而藍綠紅三個波段的強度也比較平均，這個原因如同前面所提的，因為在 5%時，藍光發光層發生了捕捉載子而放光的機制。再者，從圖 4-17 的兩張圖看來，也發現當使用 7%藍光客發光體濃度時，其紅光的強度並未隨著電流密度變化而變化；但在 5%的情況下，當電流密度增加時，其藍光跟紅光的強度隨著增強，這現象也說明了在使用 7%的元件中，其電子電洞的再結合區是落在靠近紅光發光區；相對地，在 5%的元件中，其再結合區是落在藍光以及綠光的介面，這也證明了在 5%情況下，載子捕捉機制發生在藍光發光層中，使得在結合區被牽制在藍綠發光層的介面上。而我們也將這兩個元件的效能整合在表 4-4 中。

表 4-4：Device K 和 Device L 在 20 mA/cm^2 下的元件效能

Device	Voltage (V)	Yield (cd/A)	Efficiency (lm/W)	E.Q.E (%)	CIE (x, y)
K	6.2	5.7	3.1	2.8	(0.39,0.38)
L	5.8	4.4	2.4	2.4	(0.35,0.36)

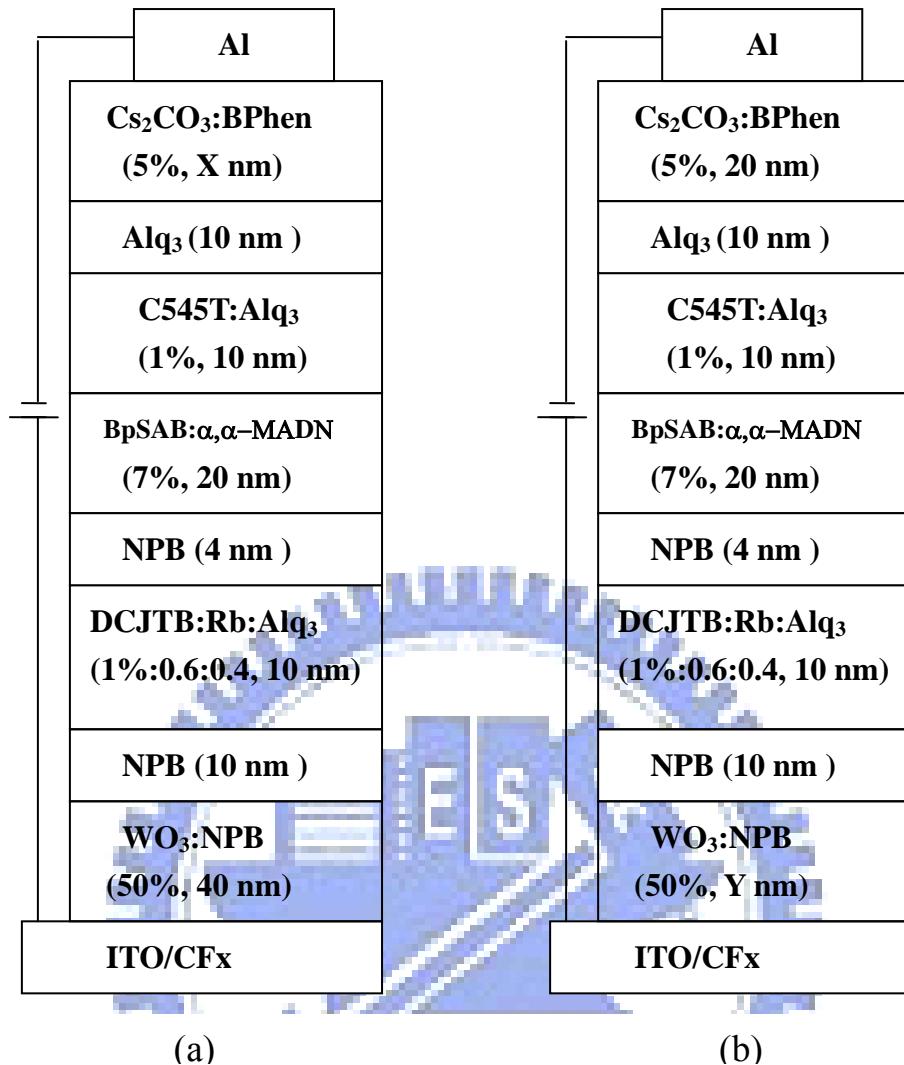


圖 4-18 : (a) : Device M 的元件結構圖，X 為 20 nm 與 60 nm

(b): Device N 的元件結構圖，Y 為 40 nm 與 100 nm

根據以記載的 $p-i-n$ 元件結構的文獻，我們得知 $p-i-n$ 的結構，其電性並不會隨著 p 型摻雜的電洞注入層或是 n 型摻雜的電子注入層的厚度改變而改變，而在第一章我們也曾介紹過此特性是 $p-i-n$ 的一個非常重要的特性，由於不會隨著厚度增加而改變電性，因此可以藉此特性來調整其光程差達到我們所希望的光色，這個特性尤其用在 tandem 的結構，可以在不改變電性的情況下增加元件的效率以其提

升光色的飽和度。而這裡我們也以我們的結構設計了不同厚度的 p 型摻雜的電洞傳輸層以及 n 型摻雜的電子注入層，來探討是否具有此特性。其元件結構如圖 4-18 所示，而其頻譜如圖 4-19 所示。

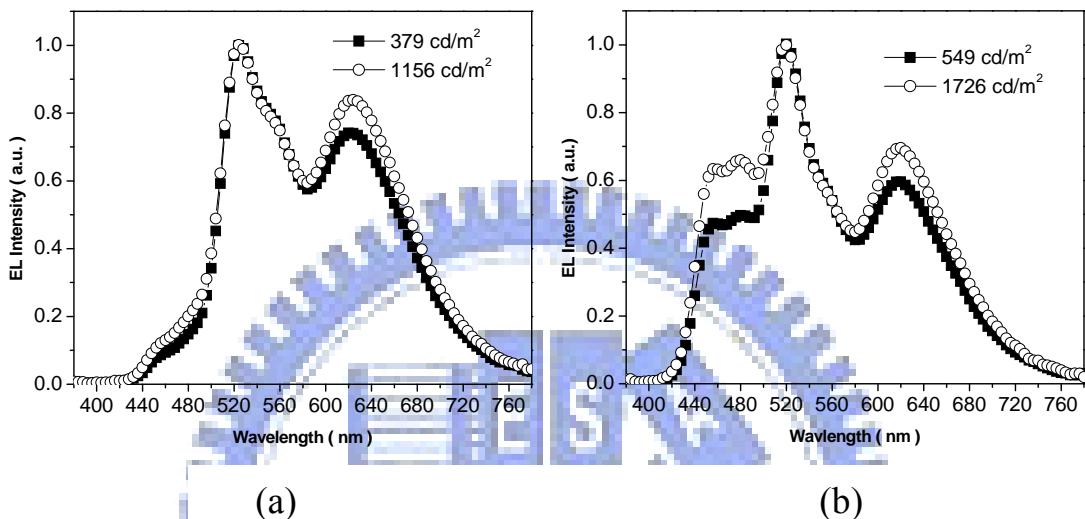


圖 4-19 : (a) : Device M (60 nm) 在不同電流密度下的頻譜變化 (b) : Device M (20 nm) 在不同電流密度下的頻譜變化

由圖 4-19 中，我們可以看出當 n 型摻雜的電子注入層的厚度為 60 nm 時，其電子電洞的再結合區會落在綠光跟紅光發光層，這是由於在低電流密度時，由於電洞傳送的速度會比電子傳送的速度快，加上電子注入層的厚度又厚，又由於 BPhen 的 HOMO 達至 6.2eV 是個很好的電洞阻擋層材料，因此造成絕大部分的光色會集中在綠光發光層，另一個因素則是由於我們選擇的藍光客發光體材料的濃度為 7%，故並沒有捕捉載子的機制發生在藍光發光層中，也使得在低電

流密度下，電子有機會傳到紅光發光層；相對地，當電子注入層的厚度只有 20 nm 時，厚度變薄，造成電子傳輸到藍光發光層的機會變大，不過由於 BPhen 的電洞阻擋層的效果，造成低電流密度下，其光色會集中在綠光發光層中，不過由此兩個頻譜的比較，也得知在藍光不發生自行捕捉載子放光的情況下，藉由調整 n 型摻雜的電子注入層的厚度所能改變元件的光色的程度，由 Device M 我們可以看出其可將藍光的強度增強至綠光強度的一半左右。

而以下我們將來看當改變 p 型摻雜的電洞注入層厚度時，其對白光元件的光色有何影響，其結構如圖 4-18(b)，而其頻譜如圖 4-20 所示。

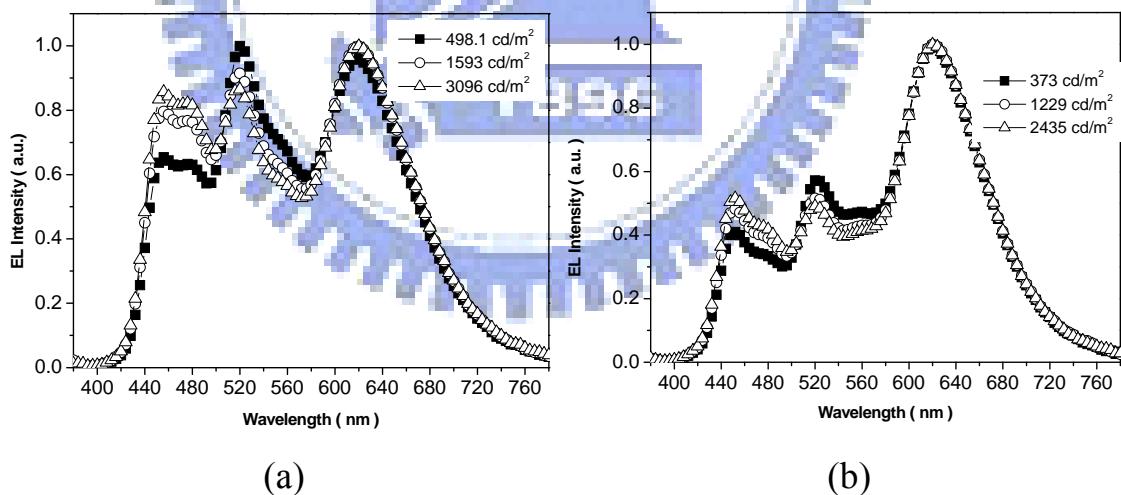


圖 4-20 : (a) : Device N (40 nm)在不同電流密度下的頻譜變化 (b) : Device N (100 nm)在不同電流密度下的頻譜變化

從圖 4-20 中我們可以看出當 p 型摻雜的電洞注入層厚度為 40 nm

時，其紅綠藍三個波段的強度最平均；相對地，而當厚度增加至 100 nm 時，其由於厚度太厚造成電子電洞的再結合區落在紅光發光層比較多，而這個頻譜也跟之前 Device L 很像，隨著電流密度的變化，藍光的強度會隨著電流密度變大而增強，而紅光的強度並沒有太大的變動，這也顯示了當 p 型摻雜的電洞注入層厚度增厚到 100 nm 時，雖電洞的傳輸速度較快，然而卻因厚度變厚造成再結合區幾乎都落在紅光區，其實另一個值得觀察的地方在於當低電流時，如果再結合區落在綠光發光層，則元件的藍光光色就會隨著電流密度的增加使白光的三個波段較平均，反之則否。而我們也整理了 Device M 與 Device N 的元件效能於表 4-5 中。

表 4-5：Device M 和 Device N 在 20 mA/cm² 下的元件效能

Device	Voltage (V)	Yield (cd/A)	Efficiency (lm/W)	E.Q.E (%)	CIE (x, y)
M (X : 20)	5.7	8	4.6	3.8	(0.34, 0.46)
M (X : 60)	5.8	6	2.6	2.7	(0.45, 0.52)
N (Y : 40)	5.7	7	2.4	2.4	(0.36, 0.36)
N (Y : 100)	5.5	6	2.8	2.8	(0.40, 0.38)

近幾年來針對紅綠藍光的各別發光層要調整多少的厚度才能達到最佳化的效果也有顯著的結果[116]。而我們也將上述的結果跟已發表的文獻相對照，看是否我們的螢光系統的三個獨立的發光層厚度以調整我們最佳化的厚度了，圖 4-21 所示的意思為發光層距離陰極以及陽極的距離對應出光的亮度關係。這裡我們列出 1-unit 和 2-units 的圖，並且也標示了紅綠藍三個光層所對應的離陰極與陽極的最佳距離。

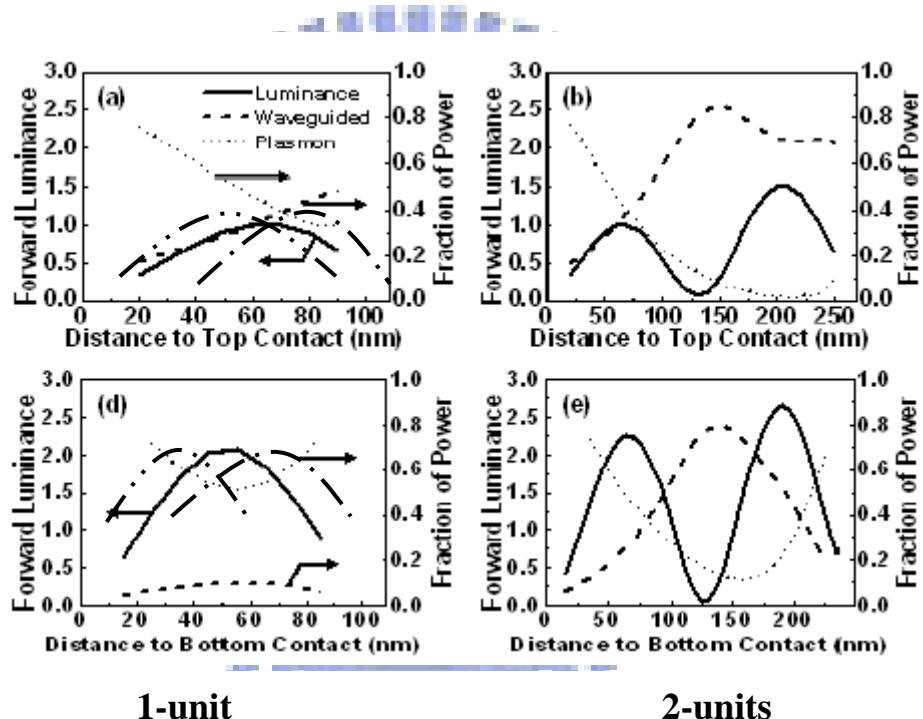


圖 4-21：——：綠光；—···：藍光；—··—：紅光，1-unit 以及 2-units 對於陰極以及陽極的最佳距離擁有最好出光效率的特性

而也由圖 4-21，我們可以得知藍光最好的出光效率其距離陰極或陽極都比綠光以及紅光短，其距離陽極或陰極大略為 30~40 nm，然而我們也發現越接近陰極或陽極，其出光量也相對的被侷限在玻璃

中，因此造成出光的效率不如預期，尤其是藍光部分；相反的，紅光部分由於由於被玻璃所侷限的出光量較少，因此使的在我們上述調整不同 p 型摻雜的電洞注入層以及 n 型摻雜的電子注入層厚度的實驗中，當將 p 型摻雜的電洞注入層或 n 型摻雜的電子注入層厚度調厚，則又因為紅光較不易被玻璃所侷限住，加上紅光的最佳效率為距離陽極或陰極為 70~80 nm，因此使得紅光得以擁有較好的出光率。因此下面，我們藉由圖 4-21，調出最佳化的藍光來達到高純度的三波段白光元件結構。

在白光元件中，電子電洞的再結合區佔了很重要的一環，尤其是三波段白光元件。而控制再結合區的方式有從材料本身改善，也可以藉由電子或電洞注入層的厚度來調控，當然也有藉由調整發光層的厚度來控制再結合區。而為了達到高純度的白光，調整電子電洞的再結合區無非是為了讓電子電洞在發光層中分配不均勻來達成接近(0.33, 0.33)。

而由於本實驗室也於 2006 年 SID 會議上，由 J. W. Ma et al.[77] 發表了以雙波段的白光元件結構，探討過 n 型摻雜的電子注入層的結構，以 Cs_2CO_3 與 Alq_3 及 BPhen 共蒸鍍，而討論其元件的壽命，以及如何調控電子電洞的再結合區。

在本篇論文中，我們以 Cs_2CO_3 摻雜於 BPhen 當成 n 型摻雜的電

子注入層的結構，而我們將討論 n 型摻雜的電子注入層與發光層間的中間層對於電子電洞的再結合區有何影響，其元件結構如圖 4-22(a)所示。

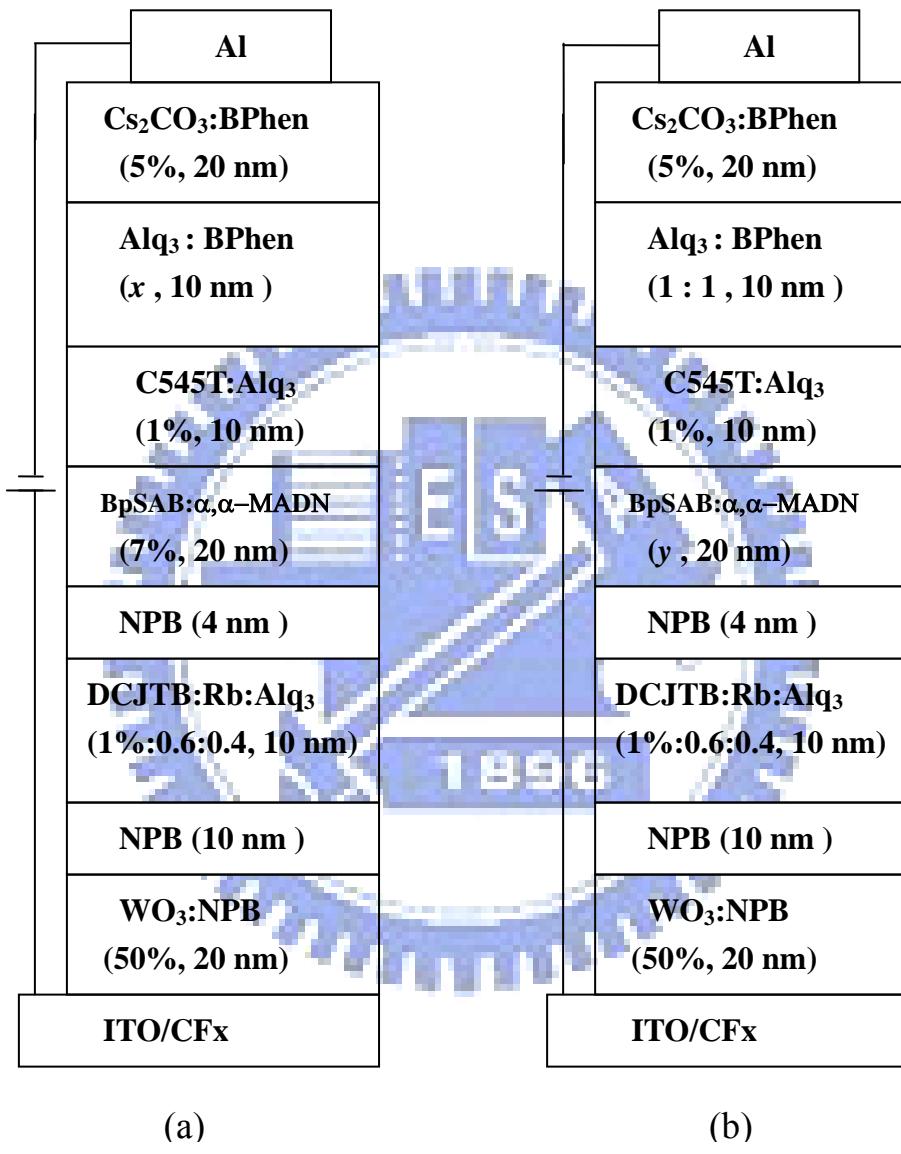


圖 4-22 : (a) :元件結構圖 Device O($x : 1/0$)、Device P($x : 4/1$)、

Device R($x : 1/1$)(b):元件結構圖 Device R($y : 7\%$)、Device S($y : 5\%$)

Device O、Device P、以及 Device R 的頻譜如圖 4-23 所示，由

頻譜我們可以看出隨著 BPhen 的濃度增加，其電子電洞的再結合區由原本的綠光逐漸像紅光以及藍光移動。

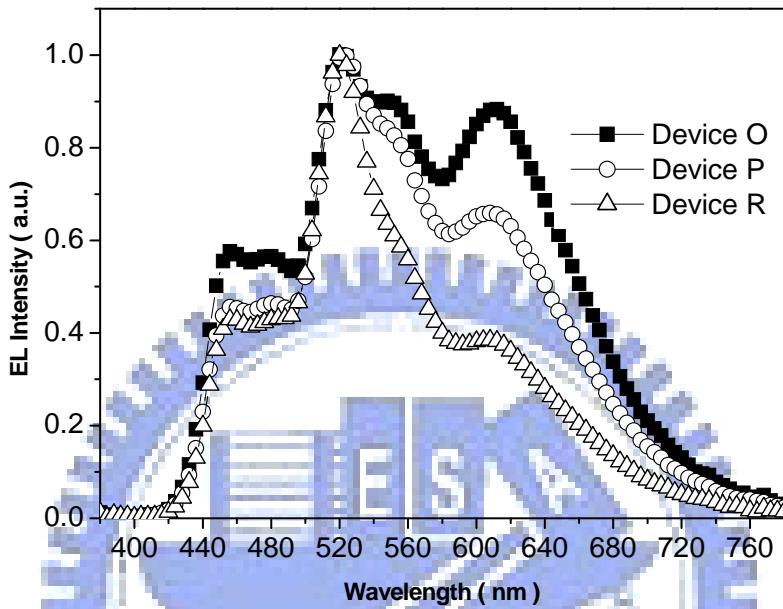


圖 4-23 : Device O($x : 1/0$)、Device P($x : 4/1$)、Device R($x : 1/1$)

在 20 mA/cm^2 下的頻譜特性

這是由於當中間層使用純 Alq_3 時，由於 Alq_3 的電子遷移率關係造成其電子電洞的再結合區落在綠光發光層，而當 BPhen 摻雜在中間層時，由於 BPhen 的電子遷移率較 Alq_3 大，會讓中間層的電子遷移率提升，而使得的電子電洞的再結合區往藍光發光層這邊移動甚至移動到紅光發光層。然而，從圖 4-23 中，我們也發現其三個波段的光色均勻度仍然不均勻，藍光部分仍然強度太弱，而紅光以及綠光仍然太強。我們也將 Device O、Device P、Device R 的發光效率整合在

圖 4-24 中，而 Device O、Device P、Device R 的效能特性整合在表 4-6 中。

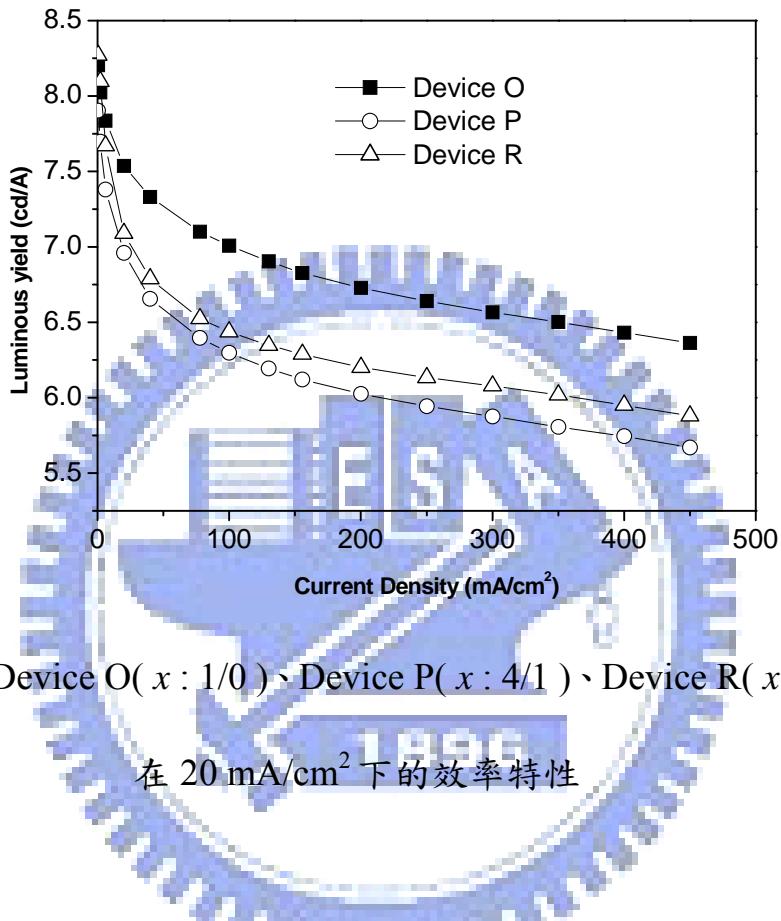


圖 4-24 : Device O(x : 1/0)、Device P(x : 4/1)、Device R(x : 1/1)

在 $20 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 下的效率特性

表 4-6：Device O、Device P 及 Device R 在 $20 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 下的元件效能

Device	Voltage (V)	Yield (cd/A)	Efficiency (lm/W)	E.Q.E (%)	CIE (x, y)
O	5.5	7.1	4.0	2.8	(0.31, 0.44)
P	5.8	7.0	3.7	2.9	(0.35, 0.43)
R	6.2	7.5	3.8	3.4	(0.37, 0.41)

由表 4-6 中，我們可以看出 Device O 具有最高的效率，但其光色仍未達到目標的標準，因此接著我們將藉由藍光客發光體材料的自行捕捉載子的機制，看能否有效的增強藍光的強度。其元件結構如圖 4-22(b)所示。我們分別比較了藍光客發光體材料濃度為 5%以及 7%，由於根據前面我們可以得知當在 5%時，其藍光發光層會發生自行捕捉載子而放光的現象，因此我們由圖 4-25 分別來比較 Device R 以及 Device S 的頻譜。

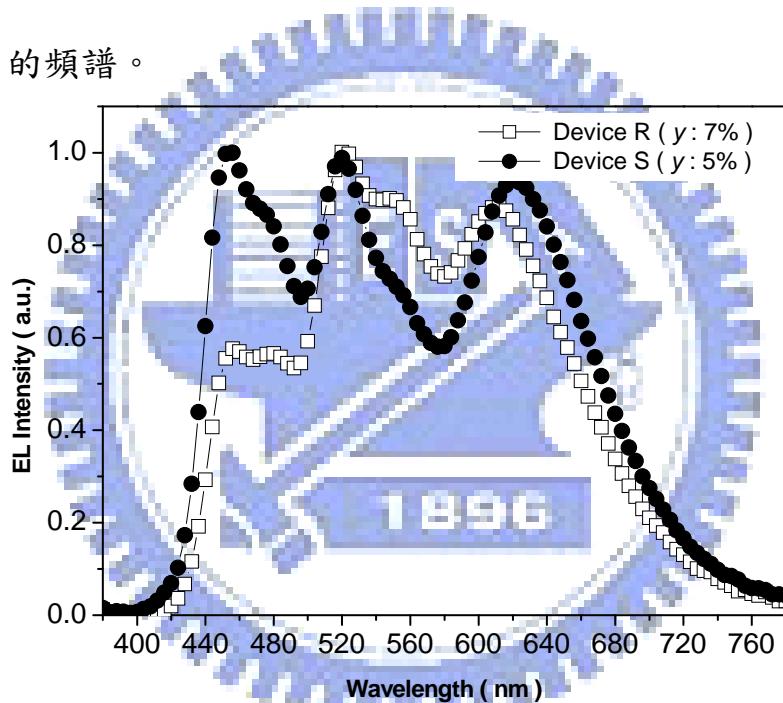


圖 4-25 : Device R、Device S 在 20 mA/cm^2 下的頻譜特性

而由圖 4-25 的頻譜中，我們也可以看到在 5%的藍光客發光體濃度下，其藍光確實有效的藉由捕捉載子的機制而增強了近一倍的強度。並且可以發現當使用 $p-i-n$ 結構可以讓驅動電壓有效的從傳統白光元件的 6.7V 降至 5.5V，而效率也提升了 3 cd/A，元件的 $\text{CIE}_{x,y}$ 值

也改善至(0.33, 0.34)。我們也將 *p-i-n* 的三波段白光元件與傳統的三波段白光元件經由彩色濾光片後，所濾出的結果做比較，如圖 4-26 所示。而兩元件的效能以及經由彩色濾光片後所分濾出的紅綠藍三種光色的 CIE_{x,y} 整合於表 4-7 中。

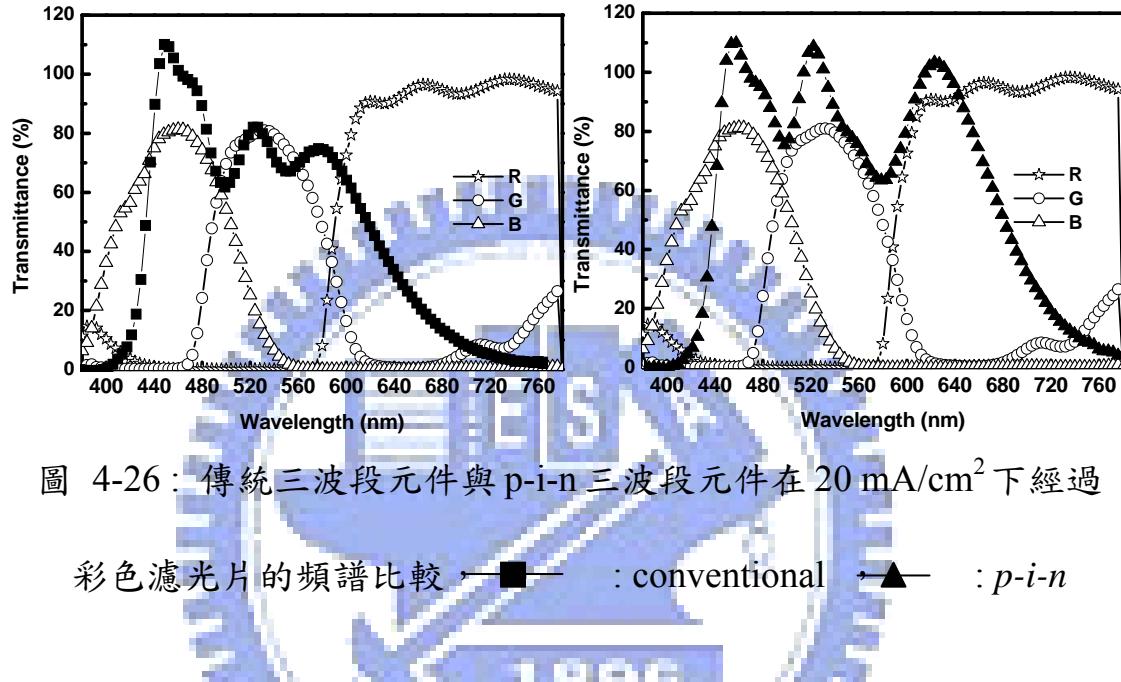


圖 4-26：傳統三波段元件與 *p-i-n* 三波段元件在 20 mA/cm² 下經過彩色濾光片的頻譜比較，■：conventional ▲：*p-i-n*

表 4-7：在 20 mA/cm² 下經過彩色濾光片後的效能

Device	Voltage (V)	Yield (cd/A)	Eff.(lm/W)	NTSC	CIE(x,y)
conventional	6.7	5.2	2.4	68%	R(0.65, 0.35) G(0.29, 0.60) B(0.13, 0.11) W(0.36, 0.35)
<i>p-i-n</i>	5.5	8.0	4.5	73%	R(0.66, 0.33) G(0.27, 0.62) B(0.13, 0.13) W(0.31, 0.32)

由表 4-7 中，我們也能看出由彩色濾光片所濾出的藍綠紅光色，由 *p-i-n* 的結構可以調出較紅以及較綠的光色來，也因此大幅增加了 NTSC ratio 至 73%。

再者，由於 *p-i-n* 結構可以有效的改善其元件的壽命，而圖 4-27 為 *p-i-n* 結構的三波段元件壽命示意圖。其傳統的三波段元件在 100 nits 下， $t_{1/2}$ 為 20,000 小時；而 *p-i-n* 結構的三波段元件在 100 nits 下， $t_{1/2}$ 可以達到 38,000 小時。

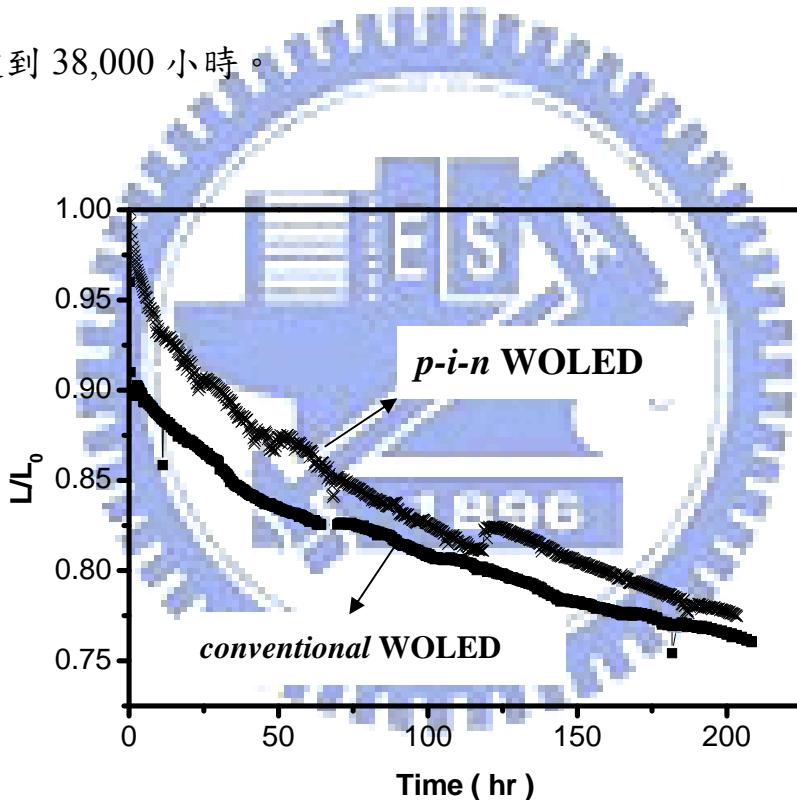


圖 4-27：*p-i-n* 三波段元件與傳統元件的壽命比較圖

而由本實驗室的 P. C. Yeh et al.[117]也在 2007 年 SID 上發表了以 *p-i-n* 的三波段螢光白光結構疊成的 2-units 的結構，其控制電荷產生層的電洞注入層的厚度去探討對 2-units 的白光元件的有何影響。

而其元件隨著不同 CGL 的厚度在 $20\text{mA}/\text{cm}^2$ 下，其元件的頻譜如圖 4-28 所示。其可以看出隨著電荷產生層的變厚，元件會受到如我們上述所提的光學性質所影響，而使得藍光的出光效率受到影響，而逐漸變弱。

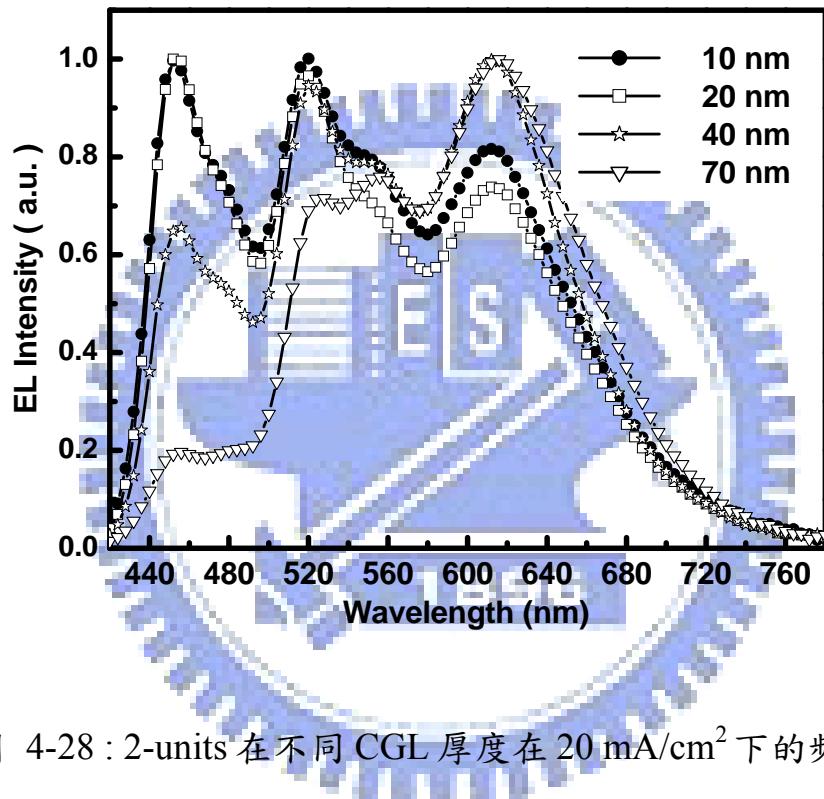


圖 4-28 : 2-units 在不同 CGL 厚度在 $20\text{mA}/\text{cm}^2$ 下的頻譜特性

伍、結論

由於對於三波段白光的色純度來說，其深藍光的出光量占了很重
要的一環。也因此我們在比較了傳統的主發光體材料 MADN 以
及 α,α -MADN 後，在各種元件結構的測試下，決定以 α,α -MADN 作為
藍光主發光材料；我們為了讓電子電洞的再結合區落在藍光以及綠光
發光層的介面，因此藉由調整綠光發光層以及 *n* 型電子注入層間的中
間層的 Alq₃ 和 BPhen 的比例，來控制其電子傳遞的速度使其造成電
子電洞的不平均分配；再者，利用深藍光的自行捕捉載子的機制來增
強，藍光的強度，平衡藍綠紅三個頻譜達到高純度白光。

而我們也藉由 *p-i-n* 的結構來使得元件電壓降低至 5.5V，電流效
率達到 8 cd/A；此外，也利用了 *p* 型電洞注入層以及 *n* 型電子注入層
的厚度來配合文獻已記載的光學模擬得到最佳化的發光層厚度，再藉
由控制中間層的 Alq₃ 和 BPhen 的 1:1 比例以及 5%的最佳藍光濃度，
使得元件可以達到 CIE_{x,y} 值為 (0.33, 0.34)，NTSC ratio 達到 73%。

而 *p-i-n* 結構的另一個優點就是可以提升元件壽命，此論文的白
光元件的壽命也跟傳統的三波段元件比較其在 100 nits 下，壽命提升
了 18,000 小時。

參考文獻

1. L. Zugang and H. Nazare, *Synth. Meter.*, **47**, 111 (2000).
2. Z. L. Zhang, X. Jiang, and S. Xu, *Thin Solid Films* ,**363**, 61 (2000).
3. S. W. Pyo, S. P. Lee, H. S. Lee, and J. S. Kim, *Thin Solid Films* ,**363**, 232 (2000).
4. Z. Y. Xie, J. S. Huang, C. N. Li, and J. C. Shen, *Appl. Phys. Lett.* ,**74**, 641 (1999).
5. R. H. Joudan, A. Dodabalapur, M. Strakelj, T. M. Miller, *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 1192 (1996).
6. M. Pope, H. Kallmann, and P. Magnante, *J. Chem. Phys.*, **38**, 2042 (1963).
7. W. Helfrich and W.G. Schneider, *Phys. Rev. Lett.*, **140**, 229 (1965).
8. C. W. Tang, S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987)
9. J. H. Burroughes, D. D. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackly, R. H. Friend, P. L. Burn, and A. B. Homes, *Nature*, **347**, 539 (1990)
10. S. F. Chen, C. W. Wang, K. T. Kuo, and J. J. Wuu, *Proceedings of 2001 Electron Devices and Materials Symposium*, p.341, Dec. 1, Taiwan, R.O.C (2001).

11. J. Birnstock, T. Canzler, M. Hofmann, A. Lux, S. Murano, P. Wellmann, and A. Werner, *Proceedings of SID'07*, p.1193, May 20-25, California, USA (2007)
12. A. Werner, M. Burghart, S. Murano, O. Schneider, T. Stubinger, M. Limmert, J. Blochwitz-Nimoth, *Proceedings of SID'06*, p.1099, June 4-9, California, USA (2006)
13. H.B. Michaelson, *J. Appl. Phys.*, **48**, 4729 (1977).
14. J. Birnstock, P. Wellmann, A. Werner, T. Romainczyk, M. Hofman, M. Limmert, A. GrüBing and J. Blochwitz-Nimoth, *Proceedings of EuroDisplay*, p.192, Sept. 19-22, Edinburgh, Scotland (2005)
15. T. M. Brown, R. H. Friend, I. S. Millard, D. J. Lacey, J. H. Burroughes, and F. Cacialli, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 174 (2001).
16. T. M. Brown and F. Cacialli, in *IEEE Proc. Optoelectron.*, **148**, 74 (2001).
17. M. Stobel, J. Staudigel, F. Steuber, J. Blassing, J. Simmerer, and A. Winnacker, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 115 (2000).
18. S. E. Shaheen, G. E. Jabbour, M. M. Morelli, Y. Kawabe, B. Kippelen, N. Peyghambarian, M. F. Nabor, R. Schlaf, E. A. Mash, and N. R. Armstrong, *J. Appl. Phys.*, **84**, 2324 (1998).

19. P. Piromreun, H. Oh, Y. Shen, G. G. Malliaras, J. C. Scott, and P. J. Brock, *Appl.Phys. Lett.*, **77**, 2403 (2000).
20. H. Fujikawa, T. Mori, K. Noda, M. Ishii, S. Tokito, and Y. Taga, *J. Lumin.* , **87**, 1177 (2000).
21. K. Chung, N. Kim, J. Choi, C. Chu. J.-m. Huh, *Proceedings of SID'06*, p.1958, June 4-9, California, USA (2006)
22. C. Chu, J. Ha, J. Choi, S. Lee, J. Rhee, D. Lee, J. Chung, H. Kim, and K. Chung, *Proceedings of SID'07*, p.1118, May 20-25, California, USA (2007)
23. T. Hirano, K. Matsuo, K. Kohinata, K. Hanawa, T. Matsumi, E. Matsuda, R. Matsuura, T. Ishibashi, A. Yoshida, and T. Sasaoka, *Proceedings of SID'07*, p.1592, May 20-25, California, USA (2007)
24. D. U. Jin, J. K. Jeong, H. S. Shin, M. K. Kim, T. K. Ahn, S. Y. Kwon, J. H. Kwack, T. W. Kim, Y. G. Mo, H. K. Chung, *Proceedings of SID'06*, p.1855, June 4-9, California, USA (2006)
25. I. Yagi, N. Hirai, M. Noda, A. Imaoka, Y. Miyamoto, N. Yoneya, K. Nomoto, J. Kasahara, A. Yumoto, and T. Urabe, *Proceedings of SID'07*, p.1753, May 20-25, California, USA (2007)
26. J. Kido, K. Hongawa, K. Okutama, K. Nagai, *Appl. Phys. Lett.*, **64**,

- 815(1994).
27. C. Hosokawa, E. Eida, M. Matuura, F. Fukuoka, H. Nakamura, and T. Kusumoto, *Proceedings of SID*, p.1037, June 4-9, California, USA (1997).
28. K. O. Cheon, and J. Shinar, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 1738(2002)
29. C. Li, K. Sakurai, H. Kimura, K. Kawaguchi, Y. Taniguchi, *Proceedings of SID'06*, p.1372, June 4-9, California, USA (2006)
30. Y. D. Zhao, G. Cheng, W. Jiang, J. Li, Z. Wu, J. Hou, and S. Liu, *Semic. Sci. Tech.*, **19**, 32 (2004)
31. X. Y. Zheng, W. Q. Zhu, Y. Z. Wu, X. Y. Jiang, R. G. Sun, Z. L. Zhang, S. H. Xu, *Display*, **24**, 121 (2003)
32. Z. L. Zhang, X. Y. Jiang, W. Q. Zhu, X. Y. Zheng, Y. Z. Wu, S. H. Xu, *Synth. Meter.*, **137**, 1141 (2003)
33. Y. W. Ko, C. H. Chung, J. H. Lee, Y. H. Kim, C. Y. Sohn, B. C. Kim, C. S. Hwang, Y. H. Song, J. Lim, Y. J. Ahn, G. W. Kang, N. Lee, C. Lee, *Thin Solid Films*, **426**, 246 (2003)
34. J. T. Lim, M. J. Lee, N. H. Lee, Y. J. Ahn, C. H. Lee, D. H Hwang, *Curr. Appl. Phys.*, **4**, 327 (2004)
35. J. Li, Y. Duan, Y. Zhao, X. Li, C. Li, J. Hou and S. Liu,

Semic.Sci.Tech., **21**, 148 (2006)

36. L. Wang, G. Lei, and Y. Qiu, *Journ. of Appl. Phys.*, **97**, 114503 (2005)
37. Y. Duan, W. Jiang, J. Li, G. Chen, Y. Zhao , J. Hou, and S. Liu, *Jap. Journ. of Appl. Phys.*, **43**, 7501 (2004)
38. B. W. D'Andrade, R. J. Holmes, and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **16**, 624 (2004)
39. G. Lei, L. Wang, and Y. Qiu, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5403 (2004)
40. R. S. Deshpande, V. Bulovic, S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 888 (1999)
41. G. Lei, L. Wang, and Y. Qiu, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5403 (2004)
42. J. Huang, W. J. Hou, J. H. Li, G. Li, Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 133509 (2006)
43. J. T. Lim, N. H. Lee, Y. J. Ahn, G. W. Kang, C. H. Lee, *Curr. Appl. Phys.* ,**2**,295 (2001)
44. Z. Chen, K. Ogino, S. Miyata, Y. Lu and T. Watanabe, *Journ. of Phys. D : Appl. Phys.*, **35**, 742 (2002)
45. G. Li and J. Shinar, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 5359 (2003)
46. M. Li, W. Li, J. Niu, B. Chu, B. Li, X. Sun, Z. Zhang, Z. Hu, *Solid-State Electr.*, **49**, 1956 (2005)

47. N. H. Lee, M. J. Lee, J. H. Song, C. Lee, D. H. Hwang, *Mat. Sci. and Enginn.*, **24**, 233 (2004)
48. J. T. Lim, C. H. Jeong, J. H. Lee, J. H. Lim and G. Y. Yeom, *Jap. Journ. of Appl. Phys.*, **45**, 1826 (2006)
49. Y. S. Huang, J. H. Jou, W. K. Weng, J. M. Liu, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2782 (2002)
50. J. H. Choi, Y. G. Lee, S. Park, J. Lee and H. H. Lee, *J. Chem. Enginn. of Jap.*, **38**, 588 (2005)
51. T. H. Liu, Y. S. Wu, M. T. Lee, H. H. Chen, C. H. Liao, C.H. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 4304 (2004)
52. F. Li, G. Cheng, Y. Zhao, J. Feng, S. Liu, M. Zhang, Y. Ma, J. Shen, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 4716 (2003)
53. G. Cheng, F. Li, Y. Duan, J. Feng, S. Liu, S. Qiu, D. Lin, Y. Ma, S. T. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 4224 (2003)
54. T. S. Shieh, S. T. Yeh, M. T. Chu, Y. C. Huang, M. R. Tseng, J. M. Liu, *Proceedings of SID'05*, p.145, May 22-27, Boston, USA (2005)
55. W. Xie, Y. Zhao, C. Li, S. Liu, *Semic. Sci. Tech.*, **20**, 326 (2005)
56. Y. Zhang, G. Cheng, Y. Zhao, J. Hou, S. Liu, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 011112 (2005)

57. G. Lei, L. Wang, Y. Qiu, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 103508 (2006)
58. M. A. Baldo, M. E. Thompson, S. R. Forrest, *Nature*, **403**, 750 (2000)
59. B. W. D'Andrade, M. A. Baldo, C. Adachi, J. Brooks, M. E. Thompson, S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1045 (2001)
60. D. Qin, Y. Tao, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 113507(2005)
61. X. Zhou, D. S. Qin, M. Pfeiffer, J. Blochwitz-Nimoth, A. Werner, J. Drechsel, B. Maennig, M. Bold, P. Erk, H. Hartmann, *J. Phys.*, **97**, 044505 (2005)
62. L. Zugang, H. Nazare, *Synth. Meter.*, **47**, 111 (2000)
63. S. S. Lee, T. J. Song, S. M. Cho, *Semic. Sci. and Enginn.*, **B95**, 24(2002)
64. S. Tokito, T. Lijima, T. Tsuzuki, F. Sato, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2459 (2003)
65. J. Xiao, Z. B. Deng, C. J. Liang, D. H. Xu, Y. Xu, *Displays*, **26**, 129 (2005)
66. F. Guo, D. Ma, L. Wang, X. Jing, F. Wang, *Semic.Sci.Tech.*, **20**, 310 (2005)
67. Y. S. Wu, S. W. Hwang, H. H. Chen, M. T. Lee, W. J. Shen, C. H. Chen, *Thin Solid Films*, **488**, 265 (2005)

68. W. Xie, S. Liu, Y. Zhao, *Journ. of Phys. D : Appl. Phys.*, **36**, 1246 (2003)
69. W. Xie, M. Meng, C. Li, Y. Zhao, S. Liu, *Opt. and Quant. Electr.*, **37**, 943 (2005)
70. F. He, H. Zhang, Y. Ma, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 4457 (2004)
71. W. Xie, Z. Wu, S. Liu, S. T. Lee, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, **36**, 2331 (2003)
72. W. C. Shen, Y. K. Su, L. W. Ji, *Journ. of Cryst. Growth*, **293**, 48 (2006)
73. X. M. Yu, H. S. Kwok, W. Y. Wong, G. J. Zhou, *Chem. Mater.*, **18**, 5097 (2006)
74. F. Guo, D. Ma, *Opt. Mater.*, **28**, 966 (2006)
75. G. Schwartz, K. Fehse, M. Pfeiffer, K. Walzer, K. Leo, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 083509 (2006)
76. S. F. Hsu, I. R. Laskar, T. M. Chen, J. W. Ma, S. W. Hwang, C. H. Chen, *Jap. J. Appl. Phys.*, **45**, 951 (2006)
77. J. W. Ma, S. W. Hwang, C. C. Chang, S. F. Hsu, C. H. Chen, *Proceedings of SID'00*, 964 (2006)
78. C. W. Ko, Y. T. Tao, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 4234 (2001)

79. B. W. D'Andrade, M. E. Thompson, S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **14**, 147 (2002)
80. G. C., Y. Zhang, Y. Zhang, S. Liu, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 083512 (2006)
81. P. Jolinat, R. Clergereaux, J. Farenc, P. Destruel, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, **31**, 1257 (1998)
82. J. S. Park, J. W. Lee, Y. M. Kim, S. J. Bae, J. Jang, J. K. Kim, B. K. Ju, *J. The Electr. Soc.*, **152**, 196 (2005)
83. W. Xie, Y. Zhao, C. Li, S. Liu, *Semic. Sci. and Tech.*, **20**, 57 (2005)
84. Y. Sun, N. C. Giebink, H. Kanno, B. Ma, M. E. Thompson, S. R. Forrest, *Nature*, **440**, 908 (2006)
85. H. Kanno, N. C. Giebink, Y. Sun, St. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 023503 (2006)
86. G. Cheng, Y. Zhang, Y. Zhao, Y. Lin, C. Ruan, S. Liu, T. Fei, Y. Ma, Y. Cheng, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 043504 (2006)
87. H. Kanno, Y. Sun, S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 143516 (2006)
88. J. F. Li, S. F. Chen, S. H. Su, K. S. Hwang, M. Yokoyama, *Journ. of The Electr. Soc.*, **153**(11), 195 (2006)
89. T. Nakayama, K. Hiyama, K. Furukawa, and H. Ohtani, *Proceedings*

of SID'07, p.1018, May 20-25, California, USA (2007)

90. B. D'Andrade, J-Y. Tsai, C. Lin, M. Weaver, P. Mackenzie, and J. Brown, *Proceedings of SID'07*, p.1026, May 20-25, California, USA (2007)
91. H. Kuma, Y. Jinde, M. Kawamura, H. Yamamoto, T. Arakane, K. Fukuoka, C. Hosokawa, *Proceedings of SID'07*, p.1504, May 20-25, California, USA (2007)
92. P. Wellmann, M. Hofmann, O. Zeika, A. Werner, J. Birnstock, R. Meerheim, G. He, K. Walzer, M. Pfeiffer, K. Leo, *Journal of the SID*, 13/5, 393, (2005)
93. C. Ganzorig, M. Fujihira, *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 4211(2000)
94. D. B. Romero, M. Schaer, L. Zuppiroli, B. Cesar, B. Francois, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 1659 (1995)
95. F. Huang, A. G. MacDiamid, B. R. Hsieh, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 2415 (1997)
96. J. Blochwitz, M. Pfeiffer, T. Fritz, K. Leo, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 729(1998)
97. A. Yamamori, C. Adachi, T. Koyama, Y. Taniguchi, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 2147 (1998)
98. Y. Yamamoto, K. Yoshino, Y. Inuishi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **47**, 1887

(1979)

99. T. Matsumoto, T. Nakada, J. Endo, K. Mori, N. Kawamura, A. Yokoi, J. Kido, *Proceedings of IDMC'03*, p.413, Feb. 18-21, 2003, Taipei, Taiwan.
100. C. C. Chang, S. W. Hwang, C. H. Chen and J. F. Chen, *Jap. J. Appl. Phys.*, **43**, 6418 (2004)
101. H. Kanno, R. J. Holmes, Y. Sun, S. Kena-Cohen, and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **18**, 339 (2006)
102. B. Maenning, M. Pfeiffer, A. Nollau, X. Zhou, K. Leo, P. Simon, *Phys. Rev.*, **64**, 195208 (2001)
103. W. Gao, A. Kahn, *Org. Electr.*, **3**, 53 (2002)
104. K. Harada, A. G. Werner, M. Pfeiffer, C. J. Bloom, C. M. Elliott, and K. Leo, *Physical Review Letters*, **94**, 036601(2005)
105. C. C. Chang, S. W. Hwang, C. H. Chen and J. F. Chen, *Jap. J. Appl. Phys.*, **43**, 6418 (2004)
106. J. Kido, T. Matsumoto, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2866 (1998)
107. C. I. Wu, C. T. Lin, Y. H. Chen, M. H. Chen, Y. J. Lu, C. C. Wu, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 152104 (2006)
108. T. Y. Cho, C. L. Lin, and C. C. Wu, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 111106 (2006)

109. J. Spindler, T. K. Hatwar, *Proceedings of SID'07*, p.89, May 20-25, California, USA (2007)
110. J. Birnstock, T. Canzler, M. Hofmann, A. Lux, S. Murano, P. Wellmann, T. Romainczyk, and A. Werner, *Proceedings of SID'07*, p.1197, May 20-25, California, USA (2007)
111. S. Ishihara, K. Masuda, Y. Sakaki, H. Kotaki, S. Aratani, *Proceedings of SID'07*, p.1501, May 20-25, California, USA (2007)
112. T. Y. Chu , S. Y. Chen ,C. J. Chen , J. F. Chen and C. H. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 053503 (2006)
113. J. H. Lee, W. J. Kim, S. G. Yang, C. H. Lee, Y. T. Kim, J. H. Shin, J. B. Choi, H. Y. Kim, H. J. Koh, D. S. Zang, H. K. Chung, *Proceedings of SID'07*, p.1695, May 20-25, California, USA (2007)
114. S. Y. Chen, T. Y. Chu, C. J. Chen, J. F. Chen and C. H. Chen, *Proc. of the 6th Intern. Meet. on Inf. Display and the Intern. Display Man. Conf. (IMID/IDMC '06)*, p.1155, Aug. 22-25, Daegu, Korea(2006)
115. J. X. Sun, X. L. Zhu, Z. G. Meng, X. M. Yu, M. Wong, and H. S. Kwok, *Proceedings of SID'06*, p.1193, June 4-9, California, USA (2006)
116. T. Y. Cho, C. L. Lin, C. H. Chang, and C. C. Wu, *Proceedings of*

SID'06, p.1284, June 4-9, California, USA (2006)

117. P. C. Yeh, J. W. Ma, S. W. Hwang, M. H. Ho, S. F. Hsu, C. H. Chen,

Proceedings of SID'07, p.871, May 20-25, California, USA (2007)

118. M. H. Ho, Y. S. Wu, S. W. Wen, M. T. Lee, T. M. Chen, K. C. Kwok,

S. K. So, K. T. Yeung, Y. K. Cheng, Z. Q. Gao, C. H. Chen, *Appl.*

Phys. Lett., **89**, 252903 (2006)



Biogrpphy

Chao-Jung Chen was born in Taiwan in 1981. He received the B.S. degree in electrical engineering from TKU, Taipei, Taiwan, in 2005. He is currently working toward the M.S. degree from National Chiao Tung University (NCTU), Taiwan, R.O.C., under the guidance of Prof. C. H. Chen.

His research interests are device engineering of high purity white OLED device and optical characteristics.

