

白光OLED材料技術

Technology of White Organic Light Emitting Diode

林晉聲

工研院材化所(MCL/ITRI) 研究員

「OLED lighting」儼然已成為OLED顯示器外一個重要的研究主題，同時也被認為是當今最適合作為照明的技術，世界各國均砸下重金開發OLED lighting，無非是希望在市場中能佔有一席之地。不論在元件製作或材料開發，都是相當重要的一環，特別是材料效率及穩定度的開發，將左右OLED整體的發展。本文主要介紹在OLED膜層內有機材料的組成及屬性，包含螢光材料、磷光材料、主發光體材料及電荷傳輸材料等項目。

“OLED lighting” has become another important research topic besides OLED Display. It is also regarded as the most suitable technology in the field of lighting. Countries around the globe are competing to invest in the exploitation of OLED lighting, just hoping to gain a seat in the market. From this phenomenon, the importance of the related fields, be it the making of device or the exploitation of materials, cannot be overlooked. In particular, the exploitation of material's efficiency and stability is particularly important as to influence the development of OLED. The article mainly aims to introduce the components and attributes of organic materials inside OLED, including fluorescent materials, phosphorescent materials, host materials and charge transporting materials, etc.

關鍵字/Key Words

螢光材料(fluorescent material)、磷光材料(phosphorescent material)、主發光體(host material)、電荷傳輸材料(charge transporting material)

一、前言

自從Kodak公司的鄧青雲博士在1987年發表全球第一篇小分子、雙層式結構的有機電激發光元件(organic light emitting-diode; OLED)報導後，由於OLED本身具有自發光性、高對比、廣視角、高應答速度與近乎厘米厚度等優點，使OLED很快成為眾所矚目的新型顯示器之一。近年來OLED產業在有機材料與元件技術進展十分迅速，特別是發光效率已經可超越傳統鎢絲燈泡，使OLED不僅可以應用於顯示器，更可以是一個照明光源，因此有機會和LED產業並列為下世代的新興固態照明(solid-state lighting; SSL)。

二、螢光發光材料

螢光材料主要應用在OLED照明上，除了較穩定的藍光材料之外，其餘綠光及紅光材料皆已有磷光發光材料可以取代，而藍色磷光材料則受限於穩定性的問題，導致壽命目前無法達到理想的規格，因此本文只針對藍色螢光發光材料進行介紹。

(一)藍色螢光材料

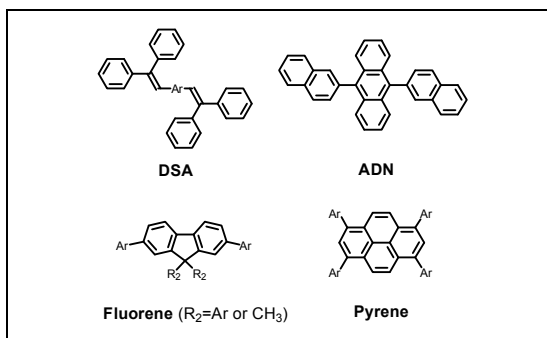
藍色螢光材料主要可分為以下幾類(圖一)：

- (1)distyrylarylene(DSA)；
- (2)diarylanthracene(ADN)；
- (3)fluorene；
- (4)pyrene。

其中(3)(4)兩系列在白光OLED中較為少見，故不多加介紹。

1.distyrylarylene 衍生物

OLED發展初期，在藍色螢光材料具有領先地位的日本出光興產(Idemitsu)就以開發distyrylarylene(DSA)衍生物為主，不論在發光效率及穩定性皆有不錯的表現。從表一可看出Idemitsu的藍色螢光材料從2005~2007年之間至少都增加30%以上的壽命，另外在表二中也列出Idemitsu的綠色及紅光螢光材料規格。Idemitsu採用全螢光有機材料(BD、GD、RD系列)所製作的白光OLED元件，元件效率都已接近20 lm/W(@1,000nits)⁽¹⁾。



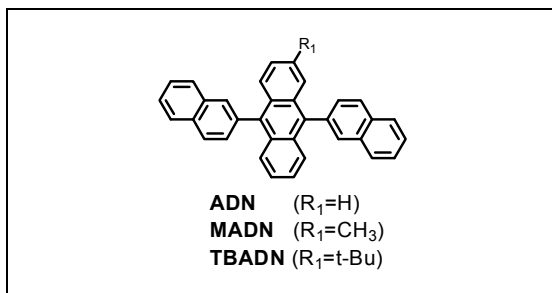
▲圖一 藍色螢光材料

▼表一 Idemitsu藍色螢光材料

ITO/HIM/HTM/NBH:New Dopant/Alq/LiF/Al			
Dopant	CIE(x,y)	L/J(cd/A)	Lifetime(hr)
BD-1(2005)	(0.14, 0.20)	7.9	17,000
BD-3(2005)	(0.14, 0.16)	7.2	12,000
BD-1(2007)	(0.14, 0.20)	8.9	22,000
BD-3(2007)	(0.14, 0.17)	7.2	18,000

▼表二 Idemitsu綠色及紅色螢光材料

ITO/HIM/HTM/NBH:New Dopant/Alq/LiF/Al			
Dopant	CIE(x,y)	L/J(cd/A)	Lifetime(hr)
GD-1(2005)	(0.29, 0.64)	20.5	100,000
GD-1(2007)	(0.29, 0.64)	21.8	280,000
RD-2(2007)	(0.67, 0.33)	11.4	160,000



▲圖二 MADN化合物

2. diarylanthracene 衍生物

美國Kodak公司的OLED研究團隊首先在專利上發表了關於diarylanthracene(ADN)衍生物的結構，並且於2002年開始發表一系列有關該藍色螢光材料的元件特性⁽²⁾，但是薄膜型態較不穩定，且有結晶的現象發生，因此交通大學陳金鑫教授研究團隊發現，穩定ADN分子的最好方法，就是在2號位置加入甲基取代基，形成MADN化合物⁽³⁾(圖二)。由於ADN的對稱性質遭到甲基取代基的破壞，因此MADN較不易在元件中形成結晶現象，同時MADN比ADN具有更好的效率及穩定性。

三、磷光發光材料

OLED應用在白光照明上，由於受制於傳統「螢光有機材料」發光效率上限的限制，初期發展時並未受到太大的矚目，直到「磷光有

機材料」逐漸開發成型，屬於有機電激發光元件的固態照明才開始嶄露頭角。對OLED照明而言，發光效率正逐步往上提升，在未來必定可以達到應用的規格，但克服成本問題則將是未來的一大目標。

因此不論應用在顯示器或照明上，「磷光有機材料」近來已成為OLED材料極重要的發展方向。由於傳統「螢光有機材料」預計只有25%的內部量子效率(internal quantum efficiency；IQE)，因此大部分的能量以不放光的形式損失，而磷光有機材料結構中具有過渡金屬原子(如：銦Ir、鉑Pt、銱Os)，使原本會以熱運動將三重態能量釋放的情況，經由過渡金屬產生的重原子效應而得以放光回到基態。在學理上，磷光有機材料發光效率是螢光有機材料的4倍，所以理論上使用磷光有機材料可以達到100%的內部量子效率，對有機電激發光元件在發光效率上有突破性的進展。

(一)藍色磷光材料

在磷光有機材料方面，綠色與紅色磷光材料已達到目前業界的規格(>30,000小時)，而藍色磷光材料則落後許多，同時在壽命上也差強人意，所以開發新型藍色磷光有機材料是讓OLED lighting成功的關鍵。

一般最常使用的藍色磷光有機材料為

FIrpic(Iridium(III)bis(4,6-difluorophenylpyridinato)picolinate)，但由於光色不夠飽和，其 $CIE_{x,y}$ 色度座標只有(0.17,0.34)，因此只能定義為天空藍色系。2003年Thompson教授發表一系列含有Si原子為中心的主發光體(UGH系列材料)，順便也發表了一個新型藍色磷光材料Fir6(圖三)，將原本的picolinate輔助基團置換成pyrazoly borate輔助基團⁽⁴⁾，在文獻當中將Fir6摻雜在UGH2中時，元件效率高達13.9 lm/W， $CIE_{x,y}$ 色度座標為(0.16,0.26)，使光譜有稍微藍位移，但還不足以定義為純藍光。

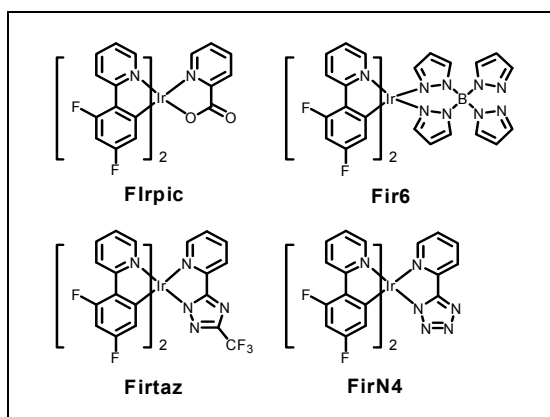
近幾年來國內外陸續有新型藍色磷光有機材料的發表與報導，卻還沒有顯著進展，而在台灣中央研究院陳錦地教授所帶領的實驗團隊，成功開發出FIrtaz與FIrN4兩個磷光有機材料⁽⁵⁾(圖三)。兩化合物的最大放射波長約460nm(FIrpic發光波長為470nm)，因此將FIrtaz與FIrN4兩者拿來製作藍色有機電激發光元件時(摻雜於新型主發光體材料SimCP中，如圖九)，元件所發光的 $CIE_{x,y}$ 色度座標分別為(0.14, 0.18)與(0.14, 0.24)，皆較FIrpic所構成的元件要往藍色波長移動。

雖然FIrpic屬於天空藍色系，但是由於在藍色磷光材料中相對穩定，因此還是常作為藍光元件效率的指標之一。2008年日本Kido教授就曾經發表高達46 lm/W的藍色磷光元件(@1,000nits)，其中所使用的藍色磷光材料就是FIrpic，接著再搭配紅色磷光材料所構成的雙波段白光OLED元件，效率可達到44 lm/W(@1,000nits)，再加上光取出技術的改善，效率更可以增進到70 lm/W(@1,000nits)以上⁽⁶⁾。

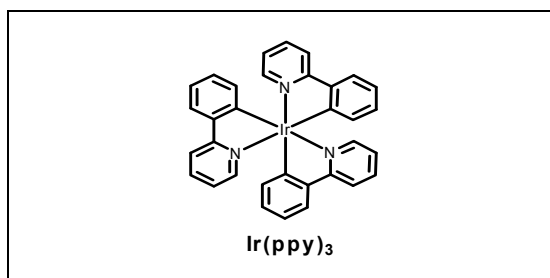
除了日本之外，歐洲的研究機構IAPP(Institute for Applied Photophysics)同樣也以FIrpic為藍色磷光材料，再搭配綠色及紅色磷光材料而形成白光OLED元件，同時考量玻璃基板折射率及光取出層型態，元件效率高達124 lm/W⁽⁷⁾，且為目前的世界紀錄。

(二)綠色磷光材料

綠色磷光材料無疑是目前最成熟且最穩定的材料，Ir(ppy)₃就是最早發現的磷光材料之一(圖四)，並且合成方式也比其它磷光材料簡單許多，昇華純化材料也相對容易，其最大放射波長為510nm， $CIE_{x,y}$ 色度座標為(0.27, 0.63)，雖然還有其它綠色磷光材料的研究開發，但仍然比不上Ir(ppy)₃屢屢創下最高效率



▲圖三 藍色磷光材料



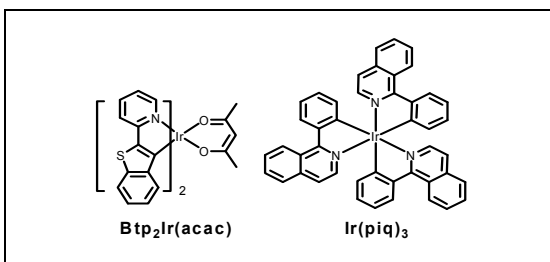
▲圖四 綠色磷光材料

的紀錄。Kido教授於2007年所發表的文獻中顯示⁽⁸⁾，在1,000nits下， Ir(ppy)_3 所構成的綠色磷光元件已有107 lm/W(@1,000nits)的高效率，並且操作電壓僅僅只有2.9eV，如此優秀的數據表現是其它綠色磷光材料難望其項背的原因。

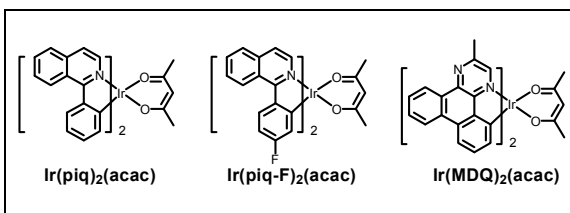
2009年Novaled研究團隊同樣利用 Ir(ppy)_3 為綠色磷光材料，並採用p-i-n元件結構所製作的綠色磷光元件，其同樣已達到120 lm/W的高效率表現⁽⁹⁾，顯示 Ir(ppy)_3 仍有破紀錄的空間。

(三)紅色磷光材料

以銥為中心的紅色磷光材料相當多樣化，配位基的設計也比藍色磷光材料簡單許多。2001年由Forrest教授所開發紅色磷光材料 $\text{Btp}_2\text{Ir(acac)}$ ⁽¹⁰⁾(圖五)，摻雜在主發光體材料CBP中，元件外部量子效率約為7.0%，放射波長為616nm， $\text{CIE}_{x,y}$ 色度座標為(0.68, 0.32)，



▲圖五 紅色磷光材料

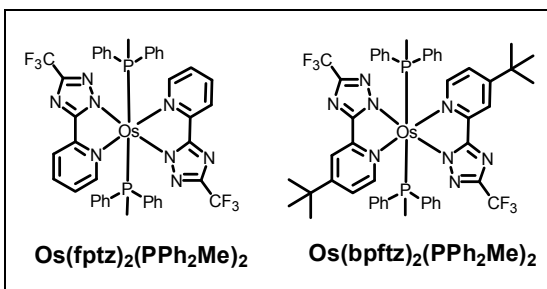


▲圖六 衍生紅色磷光材料

在當年是相當優秀的材料之一。2002年由Canon所開發的 Ir(ppy)_3 ⁽¹¹⁾，同樣摻雜在主發光體材料CBP中，元件外部量子效率提升至10.3%， $\text{CIE}_{x,y}$ 色度座標為(0.68, 0.32)。接著文獻開始發表一連串性質相當優秀的紅色磷光材料(圖六)，僅列舉幾個如下，其中包含清華大學劉瑞雄教授與鄭建鴻教授研究團隊所分別開發的磷光材料⁽¹²⁾。

清華大學季昀教授的研究團隊則著重在Os金屬所形成的錯合物，2008年發表開發出紅色磷光材料 $\text{Os(fptz)}_2(\text{PPh}_2\text{Me})_2$ (圖七)，製作成有機電激發光元件時，在亮度1,000nits下有高達22.2 lm/W的發光效率，同時 $\text{CIE}_{x,y}$ 色度座標為(0.64, 0.36)。2009年則發表另一個紅光材料結構 $\text{Os(bpftz)}_2(\text{PPh}_2\text{Me})_2$ (圖七)，與藍色磷光材料 FIrpic 搭配時，白光元件效率為28 lm/W，外部量子效率為17%⁽¹³⁾。

另外，工研院材化所(MCL/ITRI)開發出屬於橘色磷光系列的材料PO-01⁽¹⁴⁾(圖八)，其放射波長為565nm，製作成有機電激發光元件，亮度為1,000nits時，發光效率高達34 lm/W，與藍色磷光材料 FIrpic 製作成白光元件則在1,000nits時，未加入outcoupling技術發光效率可以達到33 lm/W。



▲圖七 含Os金屬紅色磷光材料

(四)主發光體材料

高效率的磷光元件均是由主、客發光體系所組成，因此除了高效率磷光材料的開發之外，主發光體材料的發展也受到相當的重視，唯有主、客發光體的相輔相成，才能讓元件效率整體表現出來。

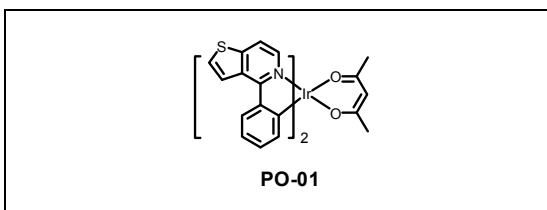
一般而言，主發光體材料的能階必須比摻雜的客發光體大，能量也才有機會從主發光體傳遞至客發光體中，使客發光體激發之後進而放光，不過由於三重態激子生命期較長，因此選擇適合的主發光體材料，才能避免三重態激子淬熄而損失能量，並且降低效率。

目前最常用的主發光體材料大部分都具有Carbazole的片段(圖九)，同樣因為屬於三芳胺系統，這類型材料大都具備電洞傳輸的性質(優於電子傳輸)，例如常使用在綠色及紅色磷光元件的CBP，但是由於三重態能階差只有2.56eV，因此無法被藍色磷光材料所用(一般>3.0eV)，所以將分子內的共軛系統縮短之後所發展的材料mCP，三重態能階即增加到2.9eV，所製作的藍色磷光元件就比CBP為主發光體的要高出許多。隨後發展出來星狀結構TCTA也是相當不錯的主發光體材料，其HOMO與LUMO能階分別為5.9與2.7eV，不僅能階符合藍色磷光材料之外，特別是TCTA同時具備電洞與電子傳輸的性質，有助於電洞與電子進行再結合。

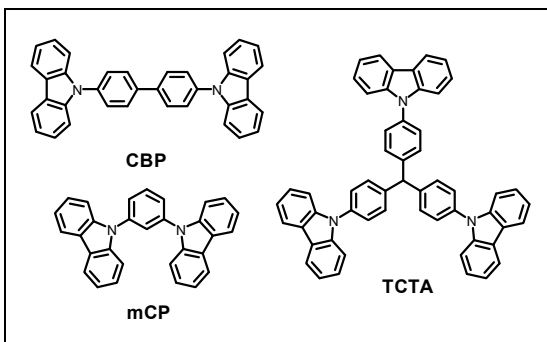
由於mCP的分子量小且熱穩定性不佳，所以中研院陳錦地教授團隊開發出新型的主發光層材料SimCP⁽⁵⁾(圖十)，利用Si原子來增加分子量，並且減少分子內共軛程度，使三重態能階為2.9eV，以符合藍色磷光材料的三重態能

階，進而避免能量損失，應用在藍色磷光元件效率時具有11.9 lm/W的表現，接著在2009年發表改良版的SimCP2主發光體材料，除了進一步增加分子量之外， T_g 由101°C(SimCP)提升到148°C(SimCP2)，分子的熱穩定性大幅提升，若是同樣摻雜FIrpic磷光材料，效率可以達到24.2 lm/W(@100nits)⁽¹⁵⁾。

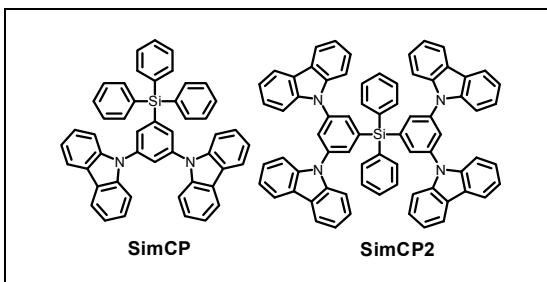
另外，由台灣大學汪根欉教授研究團隊所開發的新型主發光層材料CzSi(圖十一)，此材料的三重態能階達到3.02eV(HOMO=6.0eV，



▲圖八 工研院材化所開發之橘色磷光材料



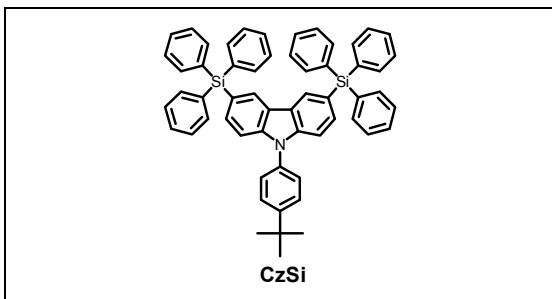
▲圖九 早期開發之主發光體材料



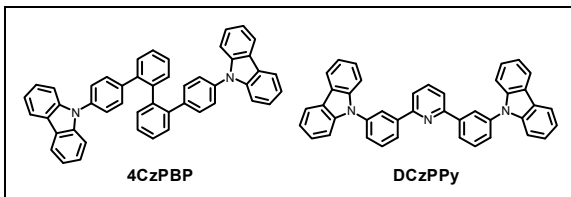
▲圖十 中研院陳錦地教授團隊開發之新型含Si主發光體材料

LUMO=2.5eV)，摻雜FIrpic的元件效率為26.7 lm/W，外部量子效率為16%⁽¹⁶⁾。

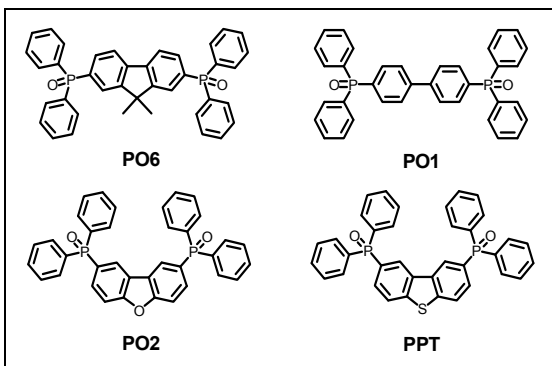
近年來，Kido教授也以Carbazole為片段發展新型的主發光體材料，如4CzPBP⁽¹⁷⁾與DCzPPy⁽⁶⁾(圖十二)，其中4CzPBP在摻雜FIrpic所製作的藍色磷光元件，在100nits下，效率高達39 lm/W，外部量子效率為21%。若是FIrpic摻雜在DCzPPy中時，效率更高達55 lm/W(@100 nits, 46 lm/W@1,000nits)。



▲圖十一 台大汪根權教授團隊開發之新型含Si主發光體材料



▲圖十二 Kido教授以Carbazole為片段發展之新型主發光體材料



▲圖十三 新型含P主發光體材料

由於目前大部分所開發含有Carbazole的主發光體材料皆具有電洞傳輸的特性，因此屬於電子傳輸特性的主發光體材料比較少見。下列材料則是由Burrows教授所開發具有電子傳輸性質的主發光體材料(圖十三)，在中心架構兩側分別接上具有電子傳輸性質的phosphine oxide取代基，由於共軛程度僅只有中心架構的部分，所以該系列材料在三重態能階幾乎都可符合藍色磷光材料的規格，例如：FIrpic摻雜在主發光體材料PO2，效率可以達到25.9 lm/W⁽¹⁸⁾。工研院李孟庭研究員設計雙主發光層的概念中，以PPT作為雙主發光層中具有電子傳輸功用的主發光層，在1,000nits下效率達到21 lm/W⁽¹⁹⁾。

四、電荷傳輸材料

除了發光層材料之外，負責傳輸電子與電洞的材料也是相當重要的角色，唯有選擇適當材料製作元件(能階匹配與傳輸效率)，才可能有較佳的元件效率表現。

(一)電洞注入材料

根據文獻報導指出，目前最常用來作為陰極材料的ITO(氧化銦錫)玻璃，在表面經過O₂ plasma或是UV-Ozone處理後，其HOMO能階約為4.8eV⁽²⁰⁾，由於與一般常用的電洞傳輸材料大約有0.5eV的能階差，不利於電洞的傳遞，因此往往會加入一層電洞注入材料，以利於增加界面間電荷的注入。而最常作為促進電洞注入的材料就是高分子材料PEDOT(圖十四)，正因為使用旋轉塗佈的方式將材料均勻塗佈在ITO玻璃表面上，不但有增加電洞

注入的功能外，也有助於ITO玻璃的平整化。

韓國LG化學公司發表結構中具有拉電子片段的分子(HAT-CN)⁽²¹⁾(圖十四)，也可作為電洞注入材料。Kido教授則使用電洞注入材料TPDPES：TBPAH⁽¹⁷⁾，並且發表超過100 lm/W的綠色磷光元件。

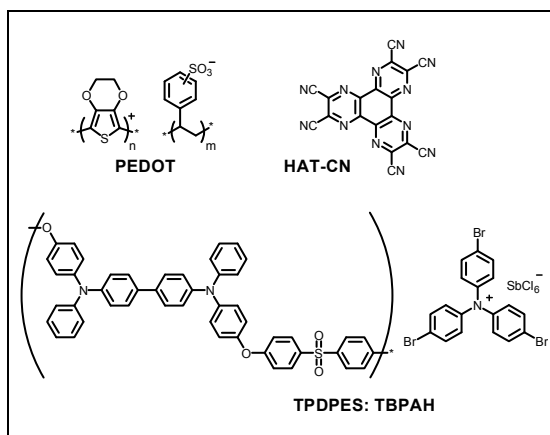
(二)電洞傳輸材料

三芳香胺類衍生物(triarylamine)最早被使用在影印技術上，這些分子多半都具有相當高的電洞移動率(hole mobility, μ_h)。目前最常使用的電洞傳輸材料當推分子內具有聯苯結構的三芳香胺類衍生物NPB($\mu_h=5.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$) (圖十五)，但由於玻璃轉換溫度只有98°C，導致分子熱穩定性不足，所以增加分子量及分子的剛性結構皆可以改進分子的熱穩定性。FFD材料(圖十五)具備高熱穩定性，並且不至於影響電洞移動率($\mu_h=4.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)。材料TAPC也有相當高的電洞移動率($\mu_h=1.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{Vs}$)，常應用白光OLED元件的電洞傳輸層。

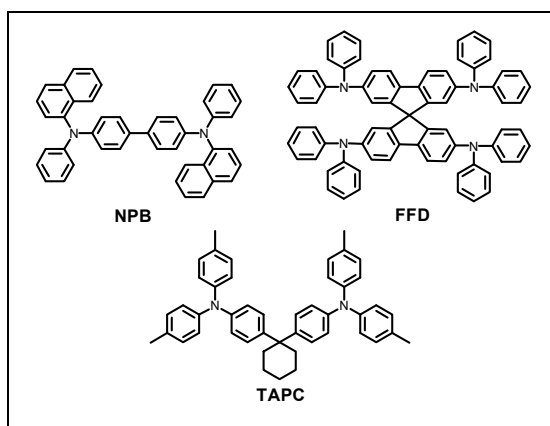
新型的電洞傳輸材料DTASi⁽¹⁷⁾(圖十六)，則是以Si原子為中心，將兩個三芳香胺取代基隔開，減少分子內共軛程度，導致HOMO與LUMO能階差高達3.4eV，又HOMO能階為5.6eV，若是搭配高能階差的主發光體材料(例如與CzSi搭配時，其HOMO能階差僅有0.4eV)，將有助於電洞的傳遞，因此也常應用在高效率的元件當中。

另一個新型的電洞傳輸材料3DTAPBP⁽⁶⁾(圖十六)則是利用分子結構中的biphenyl必須扭轉角度才能抵抗立體障礙，分子扭轉之後的

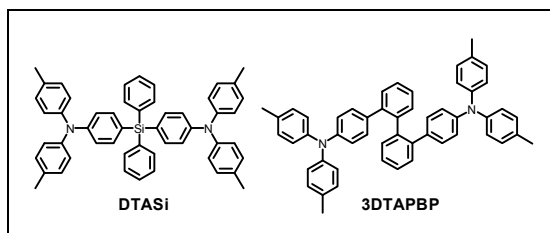
結構不利於分子內的共軛程度，因此其HOMO與LUMO能階差為3.6eV，值得注意的是LUMO能階為2.13eV，與一般所使用的主發光體材料大概會有0.3~0.4eV的能階差，若與FIrpic的LUMO則有1.3eV差距存在，如此一來



▲圖十四 一般電洞注入材料



▲圖十五 一般電洞傳輸材料

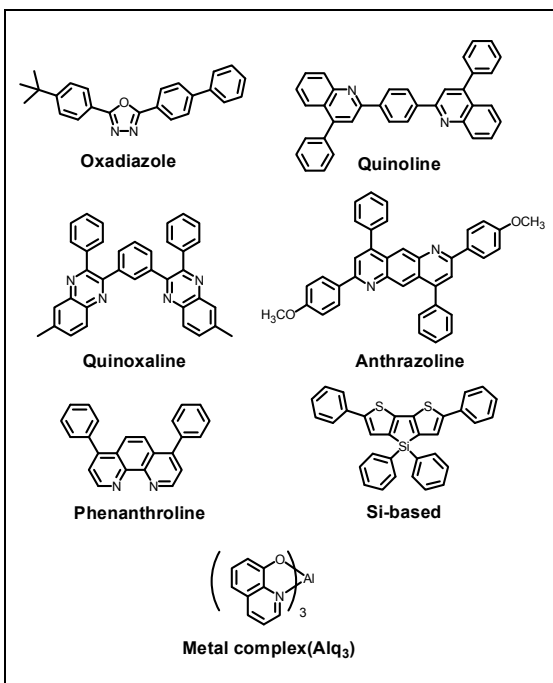


▲圖十六 新型電洞傳輸材料

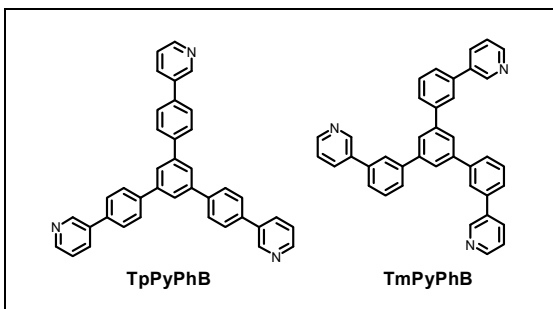
更可以確保電子侷限在發光層當中，避免能量損失，電洞移動率為 $\mu_h=6.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{Vs}$ ，也是相當不錯的數據表現。

(三)電子注入材料

電子注入材料與電洞注入材料的功能相似，主要用來提升陽極與材料層間的電子注入效率，因此工作原理也與電洞注入材料相同。可以用來作為電子注入材料的分子種類繁多，



▲圖十七 一般電子傳輸材料



▲圖十八 Kido教授於2006年開發之新型電子傳輸材料

但是經過歸類之後，常見的類型可分為鹼金屬氧化物與氟化物兩種，當這些材料以0.3~1.0nm的厚度蒸鍍在陽極表面時，能有效降低元件的驅動電壓與提升元件效率表現，但在使用上會有所限制。若是電子注入層的厚度超過上述數值時，將會有相反的效果。另外，Kido教授的研究報導中指出⁽²²⁾，若在電子傳輸材料中摻雜金屬，形成類似n型半導體的結構(如：Li摻雜在Alq₃中)，同樣也可以提升電子注入的效果。

(四)電子傳輸材料

早期所開發的電子傳輸材料相當多樣化，大致上以結構區分可分類為如下。

- (1)oxadiazole；(2)quinoline；
- (3)quinoxaline；(4)anthrazoline；
- (5)phenanthroline；(6)其它雜環結構；
- (7)metal complex等(圖十七)。

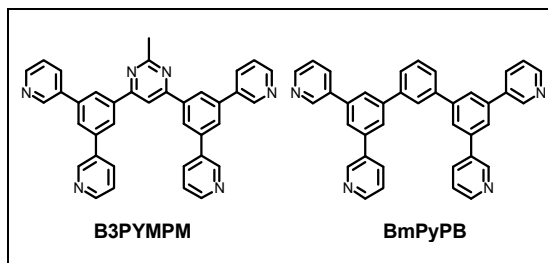
2006年Kido教授開發新型電子傳輸材料TmPyPhB及TpPyPhB⁽²³⁾(圖十八)，當使用TmPyPhB作為電子傳輸層時，元件起始電壓都會稍微增加，將不利於元件效率。利用TOF(time-of-flight)技術量測TmPyPhB及TpPyPhB的電子移動率(electron mobility)，分別為 $\mu_e=5.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{Vs}$ 及 $\mu_e=7 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{Vs}$ ，可見TpPyPhB比TmPyPhB有更佳的電子移動率，因此Kido教授採用TpPyPhB作為白光元件的電子傳輸層，元件在100nits下，其操作電壓只有3.25V，的確可有效降低元件的操作電壓，並且此元件的效率及EQE分別為44.7 lm/W及20.6%，若是利用light outcoupling技術，則EQE可達29.7%及power efficiency 62.8 lm/W，是2006年間最高的白光OLED元件效率。

接著Kido教授研究團隊於2007及2008年間連續發表兩個新的電子傳輸材料，B3PYMPM⁽¹⁷⁾與BmPyPB⁽⁶⁾(圖十九)。其中B3PYMPM的LUMO能階與Alq₃類似(3.2eV)，但是經由TOF技術量測結果得知，B3PYMPM的電子移動率是傳統電子傳輸材料Alq₃的10倍以上，因此有效提升綠色磷光元件的效率。

電子傳輸材料BmPyPB分子的HOMO與LUMO分別為6.7與2.6eV，若是與主發光體或FIrpic材料搭配，兩界面間的HOMO能階差為0.5~0.6eV左右，將有助於電洞侷限在發光層當中，而BmPyPB電子移動率為 $\mu_e=1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，這對一般的電子傳輸材料而言已是相當不錯的數據，因此應用在白色及藍色磷光元件中，會具有相當高效率的表現。以上這些材料大多含有pyridine環，若搭配LiF薄層，由於pyridine環的氮原子會與Li離子有配位的現象，將有助於電子的注入。

五、結論

從開發螢光有機材料起，OLED顯示器逐漸成型，接著磷光有機材料效率突飛猛進，使OLED不僅只有顯示器的研究範圍，與生活息息相關的照明燈源也有逐夢的空間。尤其這幾年來，材料效率與穩定度大幅提升，元件效率頻創紀錄，足以挑戰目前主流燈源--螢光燈，同時也有可能追上未來主流燈源--LED的地位。IAPP的124 lm/W白光OLED開發成功，更振奮了專注在OLED lighting的諸多研發人員，150 lm/W或是200 lm/W的目標，想必都不會再只是夢想！



▲圖十九 Kido教授於2007、2008年發表之新型電子傳輸材料

參考文獻

1. K. Fukuoaka, 18th FINETECH (2008).
2. J. Shi, C.W. Tang, Appl. Phys. Lett., 80, 3201 (2002).
3. M.T. Lee, Y. S. Wu, H. H. Chen, C. T. Tsai, C. H. Liao, C. H. Chen, Proceedings of SID'04, p.710 (2004).
4. R. J. Holmes, B. W. D'Andrade, S. R. Forrest, X. Ren, J. Li, M. E. Thompson, Appl. Phys. Lett., 83, 3818 (2003).
5. S. J. Yeh, W. C. Wu, C. T. Chen, Y. H. Song, Y. Chi, M. H. Ho, S. F. Hsu, C. H. Chen, Adv. Mater., 17, 285 (2005).
6. S. J. Su, E. Gonmori, H. Sasabe, J. Kido, Adv. Mater., 20, 1 (2008).
7. S. Reineke, F. Lindner, G. Schwartz, N. Seidler, K. Walzer, B. Lussem, K. Leo, Nature, 459, 234 (2009).
8. D. Tanaka, H. Sasabe, Y. J. Li, S. J. Su, T. Takeda, J. Kido, Jpn. J. Appl. Phys., 46, 10 (2007).
9. <http://www.novaled.com/index.php>
10. C. Adachi, M. A. Baldo, S. R. Forrest, S. Lamansky, P. E. Burrows, M. E. Thompson, R. C. Kwong, Appl. Phys. Lett., 78, 1622 (2001).
11. A. Tsuboyama, H. Iwawaki, M. Furugori, T. Mukaide, J. Kamatani, S. Igawa, T. Moriyama, S. Miura, T. Takiguchi, S. Okada, M. Hoshino, K. Ueno, J. Am. Chem. Soc., 125, 12971 (2003).
12. (a) Y. J. Su, H. L. Huang, C. L. Li, C. H. Chien, Y. T. Tao, P. T. Chou, S. Datta, R. S. Liu, Adv. Mater., 15, 884 (2003). (b) J. P. Duan, P. P. Sun, C. H. Cheng, Adv. Mater., 15, 224 (2003).
13. C. H. Chang, Y. H. Lin, C. C. Chen, C. K. Chang, C. C. Wu, L. S. Chen, W. W. Wu, Y. Chi, Organic Electronics, 10, 1235 (2009).
14. Patent No. US 20070237981 A1.
15. T. Tsuboi, S. W. Liu, M. F. Wu, C. T. Chen, Organic Electronics, 10, 1372 (2009).
16. M. H. Tsai, H. W. Lin, H. C. Su, T. H. Ke, C. C. Wu, F. C. Fang, Y. L. Liao, K. T. Wong, C. I. Wu, Adv. Mater., 18, 1216 (2006).
17. D. Tanaka, Y. Agata, T. Takeda, S. Watanabe, J. Kido, Jpn. J. Appl. Phys., 46, 117 (2007).
18. P. A. Vecchi, A. B. Padmaperuma, H. Qiao, L. S. Sapochak, P. E. Burrows, Org. Lett., 8, 4211 (2006).
19. M. T. Lee, J. S. Lin, M. T. Chu, M. R. Tseng, Appl. Phys. Lett., 94, 083502 (2009).
20. T. Ishida, H. Kobayashi, Y. Nakato, J. Appl. Phys. 73, 4344 (1993).
21. J. G. Jang, S. H. Son, WO2004054326 (2004).
22. J. Kido, T. Matsumoto, Appl. Phys. Lett., 73, 2866 (1998).
23. S. J. Su, D. Tanaka, Y. Agata, H. Shimizu, T. Takeda, J. Kido, MRS Fall Meeting (2006).