

液態製程OLED材料發展

Recent Progress in Solution Processable OLED Materials

趙登志

工研院材化所(MCL/ITRI) 研究員

由於有機發光二極體 (organic light-emitting devices : OLEDs)在平面顯示器與固態照明應用上具有極大潛力，過去十年來引起廣泛的研究。依據材料特性，OLED可分為真空蒸鍍製程之小分子OLED (SMOLED)和液態製程之高分子OLED(或稱PLED)。儘管SMOLED具有高效率的優點，但材料使用率低、且需要昂貴的蒸鍍設備，因此在低成本、大面積化的應用上，無法採用液態製程遂成為SMOLED的致命傷。近年來，許多研究嘗試將原有蒸鍍材料進行改質，使其能以液態製程製作元件。本文將介紹液態製程SMOLED之最新材料發展。

In the past decade, organic light-emitting devices (OLEDs) have been the subject of intense research because of their potential for flat panel display and solid state lighting applications. OLED technology can be classified into two categories, namely, small molecule OLEDs (SMOLEDs), which are fabricated by vacuum deposition and polymer OLEDs (PLEDs), by solution processes. While small molecules OLEDs with very high efficiencies have been demonstrated, solution processable devices are more desirable for large size flat panel display and solid state lighting applications because they are compatible with low cost, large area roll-to-roll manufacturing process. In this article, we present the recent progress made in solution processable SMOLEDs. Specifically, the printable materials development of SMOLEDs is discussed.

關鍵字/Key Words

有機發光二極體(organic light-emitting devices : OLEDs)、液態製程(solution process)、旋轉塗佈(spin coating)、主體材料(host)、發光材料(emitter)

一、前言

現今的蒸鍍OLED材料大多是多苯環、雜環結構，這些材料的熱穩定性佳，適合真空熱蒸鍍製程，但溶解度及成膜性差，無法採用液態製程(如spin-coating、screen printing或ink-jet printing)，因此發展出將小分子發光材料摻雜混至寡聚物或高分子(如oligofluorene或PVK)的方法，幫助小分子溶解。然而，以此法製作之元件和蒸鍍元件相比，效率相對較低，因此必須從根本上將材料加以改質，增加溶解度。最常見的作法為在蒸鍍材料的分子結構的側邊引入長碳鏈取代基，然而引入長碳鏈取代基意味著分子的剛性(rigidity)將會變差，使分子的熱穩定性隨之變差。因此如何在增強溶解度的同時又不犧牲熱穩定性，對有機合成化學研究者在分子設計上是一大考驗。

二、發光材料

有機發光二極體係利用電子與電洞再結合所產生的激子(exciton)而發光。根據理論推測，當電子與電洞再結合時所引起的單重激發態(singlet state)激子與三重激發態(triplet state)激子的比例為1:3。由單重激發態激子發出的光稱為螢光，由三重激發態激子發出的光稱為磷光。故螢光材料的內部量子效率極限為25%，外部量子效率則為5%，而磷光因具有3/4的三重態激子優勢，使磷光元件效率通常較螢光元件效率高，也因此磷光材料得到較多關愛的眼神。本文將目前液態製程OLED元件所用之發光材料二分為螢光與磷光材料，磷光材料則再細分為RGB三原色材料。

(一)螢光材料

2005年Chen等人⁽¹⁾將螢光材料Blue C摻混至高分子PVK中，以旋轉塗佈法(spin-coating)製作發光層，隨後以蒸鍍方式製作電洞阻擋層與金屬電極，得到一藍光元件，最大效率為2.2cd/A、EQE1.6%@18 mA/cm²，是當時效率最高的液態製程藍光SMOLED元件。

2008年Huang等人^(2a)將長碳鏈引入具有高量子效率的芴基團(fluorene)之中，再與三聚茛(truxene)結合，形成一具有21個長碳鏈取代基的星狀分子(C3)，不但溶解度極佳，可溶於甲苯、四氫呋喃、三氯甲烷等有機溶劑，材料本身之量子效率高達80%，利用旋轉塗佈法將此材料製作成單層元件，ITO/PEDOT/C3/Ba/Al，起始電壓僅3.3V，效率1.48cd/A、EQE2.06%@1,000cd/m²。同年Kido等人^(2b)發表以芴基團為基礎的Y形分子(1~4)，強調自天空藍、藍綠、黃到深紅色光，皆可藉由改變中心取代基加以調控。同樣以旋轉塗佈法製作成元件，ITO/PEDOT/1~4/BAIq/LiF/Al，在亮度1,000cd/m²時，效率0.5~2.6cd/A，外部量子效率(EQE)~1%左右。

2009年Roncali等人⁽³⁾發表一純紅色螢光材料(1b)，強調製程簡單，除金屬陰極以蒸鍍製備之外，其它膜層皆以旋轉塗佈方式製作，元件最大效率為2.1cd/A，CIE(0.65, 0.35)，為現今液態製程OLED元件中效率最高、光色最純之紅色螢光元件。

2009年Pei等人發表^(4a)一高效率藍色螢光樹枝狀材料(G0)，效率5.3cd/A、EQE6.6%@550cd/m²，CIE(0.155, 0.086)。Lee等人^(4b)隨即發表一更高效率的藍光元件：ITO/PEDOT/TBADN+DPAVBi/TPBI/LiF/Al，

以TBADN摻混DPAVBi為發光層，效率提升至8.9cd/A，榮登藍色螢光元件王座，材料結構整理於圖一。

(二)磷光材料

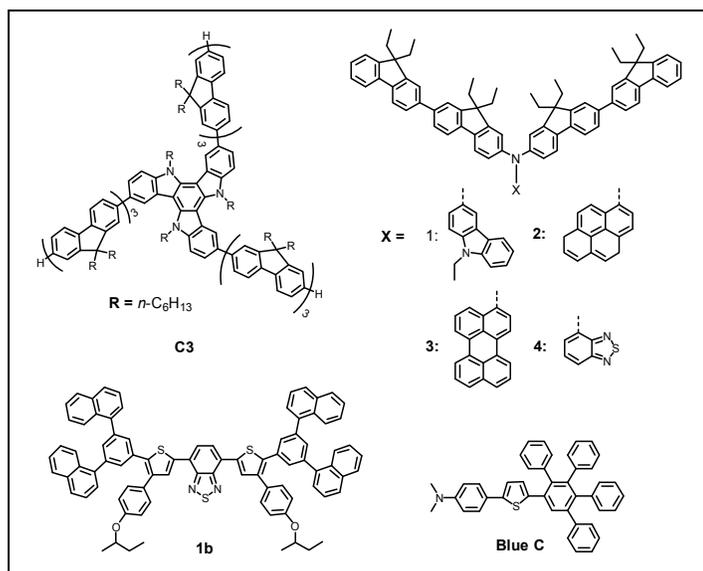
磷光材料多為含重金屬原子的錯合物，利用重原子(heavy atom)效應，強烈地自旋軌域耦合作用(spin-orbital coupling)造成單重激發態與三重激發態的能階互相混合，使三重態能量可以磷光形式放光。雖然電子電洞再結合時有75%會形成三重激發態，但由於三重態的生命期過長(~80 μ s)，易造成三重態與三重態間的湮息效應(triplet-triplet annihilation)，尤其在高電流密度下更明顯，使元件效率大幅下降。2002年Canon研發團隊⁽⁵⁾提出高效率磷光材料的設計概念：(1)材料的激發態形式必須是金屬-配位基電荷轉移(metal-to-ligand charge transfer；MLCT)形式，而不是 $^3\pi-\pi$ 形式；(2)配位基的HOMO/LUMO電子雲密度差異不要太大；(3)結構堅固、避免因分子轉動而損失能量。

1. 紅光材料

2002年Heeger等人⁽⁶⁾將一紅光材料改質成具有長碳鏈的結構Ir(HFP)₃，將其摻混至PVK-PBD主體材料中，以旋轉塗佈方式製備發光層，元件結構為ITO/PEDOT/PVK-PBD:Ir(HFP)₃/Ca/Ag，效率7.2cd/A、1.3 lm/W、EQE5%@17V。雖然操作電壓很高，但說明了將材料改質後摻混至高分子，再以液態製程製膜的方法是可行的，同時開啟了高分子/摻雜物混合系統

(polymer/dopant blend system)的研究熱潮。2007年Yang Yang⁽⁷⁾將Ir(piq)₃改質，開發出Ir(4F5Mpiq)₃和Ir(C8piq)₃，將此材料摻雜至polyfluorene(PF)高分子中製成元件，ITO/PEDOT/PF:Ir(4F5Mpiq)₃或Ir(C8piq)₃/Cs₂CO₃/Al，在亮度1,000cd/m²時，效率高達16.9cd/A、17.6 lm/W和11.2cd/A、11.2 lm/W，效率比Ir(piq)₃的蒸鍍元件效率高。

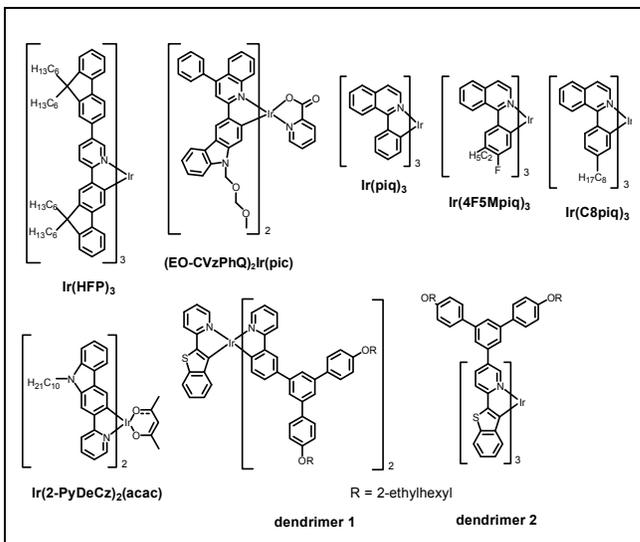
2004年Burn團隊⁽⁸⁾發表樹枝狀化合物(dendrimer)，引入具分枝的長碳鏈取代基(2-ethylhexyloxyl)確保材料的溶解度，搭配小分子CBP為主體材料製作元件，最佳效率為5.7%、4.5 lm/W@80cd/m²。2008年Ma等人⁽⁹⁾同時開發出具有良好溶解度的小分子主體材料CzOXD與紅色發光材料Ir(2-PyDeCz)₂(acac)，分子結構特點同樣是具有八個碳以上的長碳鏈取代基，最佳元件效率為4.6cd/A、0.7 lm/W@14.8mA/cm²。2009年韓國Lee團隊⁽¹⁰⁾以(EO-CVz-PhQ)₂Ir(pic)摻混至m-MDATA/TPBI混合主體中製作元件，最大效率為8.89cd/A、3.41 lm/W、EQE 5.53% (圖二)。



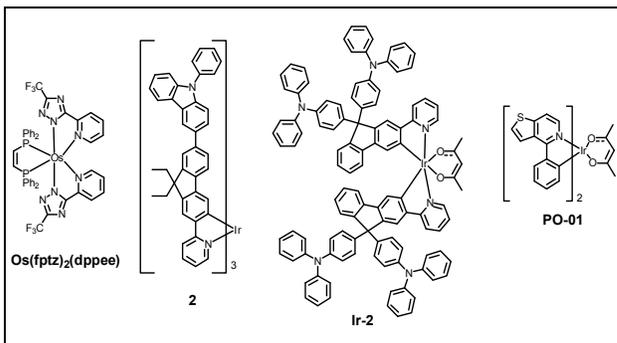
▲圖一 液態製程之螢光材料

2. 橘光材料

常見的磷光材料多為銦金屬錯合物 (iridium complex)，2008年台大周必泰教授、清大季昫教授和交大許慶豐教授合作發表⁽¹¹⁾一銦金屬錯合物 (osmium complex)， $\text{Os}(\text{fptz})_2(\text{dppee})$ ，溶液態的量子效率高達90%，且激發態的生命期短(563ns)，可避免三重態淬息效應，提高能量轉移效率。將此材料搭配PVK-PBD混合的主體材料，元件效率最高可達48.9cd/A、16.8 lm/W、EQE 13.3%，是目前液態製程中效率最高的橘光元件。



▲圖二 紅色磷光材料



▲圖三 橘色磷光材料

2007年 Wong 等人^(12a) 結合咪唑 (carbazole) 與芴基團，開發出一銦金屬錯合物，三重態生命期僅90ns。將此材料摻雜至小分子主體材料CBP製成元件，最高效率為29.8cd/A、13.4 lm/W、EQE9.6%。2008年Wong等人^(12b)再發表樹枝狀化合物Ir-2，材料的特點是在分子外圍引入可幫助電洞傳導之三芳香胺基團，同時利用此基團造成的立體障礙效應避免分子結晶。將Ir-2搭配CBP，元件效率最大為21.4cd/A、2.9 lm/W、EQE7%。2009年工研院材化所將其專利材料(PO-01)^(13a,b)進行改質，結合交大孟心飛教授所開發之刮刀製程技術(blade coating)，製作出最大效率為35cd/A、14.6 lm/W、EQE11%的元件，在橘光元件中僅次於上述清大季昫教授的銦金屬錯合物 ($\text{Os}(\text{fptz})_2(\text{dppee})$)，是銦金屬錯合物中效率最高之橘光材料，材料結構整理於圖三。

3. 綠光材料

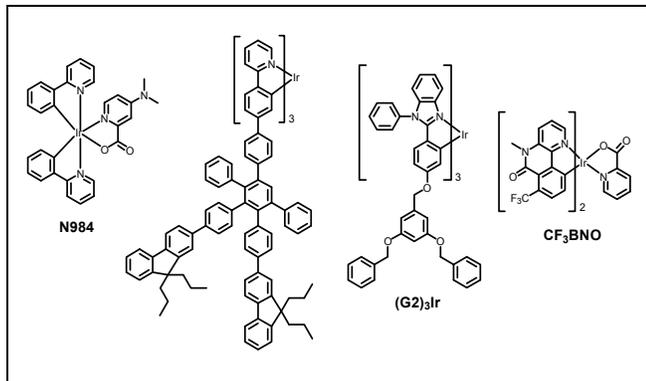
最早發現的綠光磷光材料之一是 $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ ⁽¹⁴⁾，其優點為量子效率高且磷光生命期 $<1\mu\text{s}$ ，已成為綠光磷光元件的標準材料。目前文獻發表的綠光蒸鍍OLED中，以Kido團隊發表⁽¹⁵⁾的 $107\text{ lm/W}@1,000\text{cd/m}^2$ 為最高效率，用的材料正是 $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ 。Novaled於網頁⁽¹⁶⁾中公布的綠光p-i-n結構元件更是突破 $120\text{ lm/W}@1,000\text{cd/m}^2$ ，是目前的世界紀錄。

2007年Bolink等人⁽¹⁷⁾將Ir(ppy)₃其中一個配位基改成吡啶基團，開發出N984材料，將其摻混至高分子PVK-PBD混合之主體材料中，以旋轉塗佈法製備發光層，所得元件之效率為13.5 lm/W@1,000cd/m²。

2007年Burn團隊⁽¹⁸⁾將其開發之樹枝狀化合物外圍引入帶有長碳鏈之苄基團，既可增強溶解度又可提高量子效率。將此材料摻混至小分子主體材料CBP中，直接塗佈在ITO上，不需電洞注入層及電洞傳導層，隨後蒸鍍電子傳導層與金屬陰極，所得元件之效率高達49.8cd/A、EQE13%@4.3V。2008年中研院林建村教授發表⁽¹⁹⁾另一類型的樹枝狀化合物，材料結構中所引入的助溶性基團非一般常見之長碳鏈取代基，而是苄基取代基(benzyl)，其元件效率高達61.5cd/A、32.2lm/W、EQE17.6%@15.5V。目前液態製程OLED中，效率最高的綠光元件為2009年清大周卓輝教授所發表⁽²⁰⁾的CF₃BNO材料，元件效率89.1cd/A、69.8 lm/W@100cd/m² (圖四)。

4. 藍光材料

Kottas團隊⁽²¹⁾於2007年將藍色磷光材料FIrpic的第三個配位基改成triazole取代基，搭配TCTA主體材料，製作出最大效率為13.5cd/A、EQE7.4%的藍光元件，CIE(0.17, 0.27)，元件結構為ITO/MTDATA/TCTA:4e/TPBI/LiF/Al。2008年Lo與Burn發表⁽²²⁾藍光樹枝狀材料⁽³⁾，將長碳鏈引入至苯環間位(meta)，既不影響分子共軛，又能增強溶解度。不需搭配主體材料，元件效率為17cd/A、14 lm/W、EQE7.9%@100cd/m²，CIE(0.18, 0.35)，材料分子結構如圖五所示。



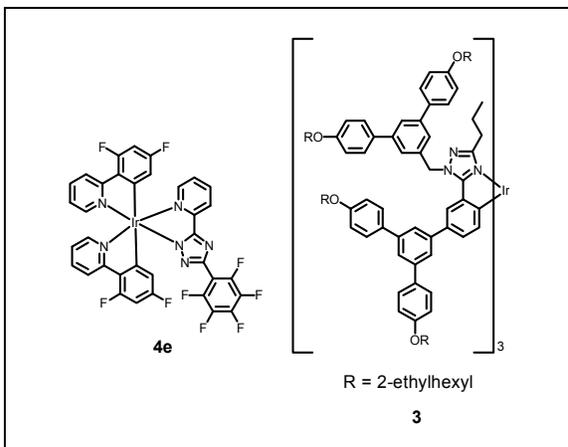
▲圖四 綠色磷光材料

三、主體材料

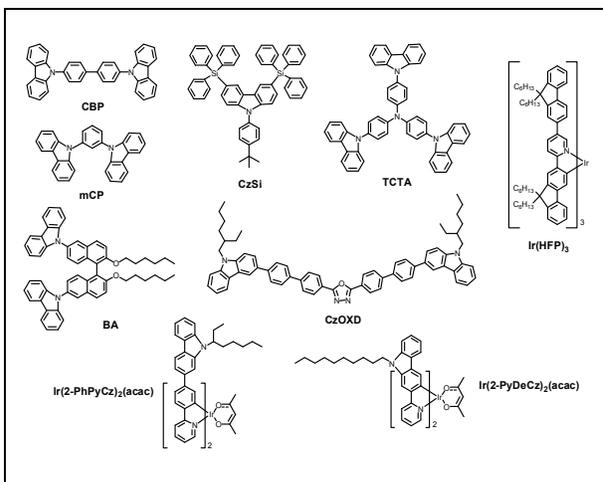
目前OLED元件中的發光層幾乎都使用主客發光體系，即主發光體材料中摻雜客發光體材料，由能量較大的主體材料傳遞能量給客發光體材料來發光，所以元件的光色可藉由選擇不同的客發光體來加以調控，並提升元件效率。

(一) 吡啶(carbazole)衍生物

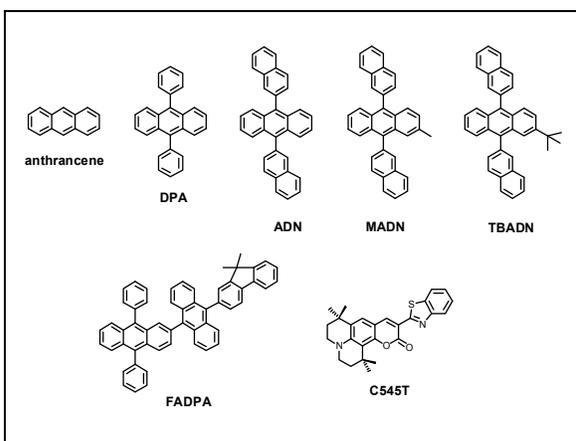
由於吡啶基團具有電洞傳輸特性，最常被用作為主體材料，蒸鍍OLED中常見的有：CBP、TCTA、mCP、CzSi等。2006年Heeger和Bazan發表⁽²³⁾了第一個帶有兩個長碳鏈的可溶性小分子主體材料BA，搭配紅光材料Ir(HFP)₃，以旋轉塗佈法製備薄膜，效率為2.47cd/A@18mA/cm²，亮度達到1,000cd/m²時需22V。2008年中國科學院Ma等人⁽⁹⁾結合具電洞傳輸性的吡啶與具電子傳輸性的噁唑(oxadiazole)基團，開發出雙極性(bipolar)而且可溶的CzOXD材料，搭配紅光材料Ir(2-PyDeCz)₂(acac)，同樣以旋轉塗佈法製備薄膜，隨後以蒸鍍方式製作電洞阻擋層與



▲圖五 藍色磷光材料



▲圖六 含咪唑基團的主體材料



▲圖七 含蒽基團之主體材料

金屬陰極，所得紅光元件之效率達 $4.6\text{cd/A}@14\text{mA/cm}^2$ 。CzOXD 搭配黃光材料 $\text{Ir}(2\text{-PhPyCz})_2(\text{acac})$ 之元件效率高達 $20.0\text{cd/A}@7.8\text{mA/cm}^2$ ，是目前液態製程 OLED 元件中，效率最高的黃光元件 (圖六)。

(二)二芳香基蒽(diarylanthracene)衍生物

蒽 (anthracene) 可說是 OLED 元件的始祖，早在 1963 年 Pope 等人⁽²⁴⁾ 就是以蒽單晶通入 400V 的操作電壓，而觀察到發光現象，為 OLED 研究揭開序幕。蒸鍍 OLED 中常見的蒽衍生物主體材料有：DPA、ADN、MADN 及 TBADN 等。2008 年 Kwon 等人⁽²⁵⁾ 發表不需長碳鏈的蒽衍生物 (FADPA) 具有良好溶解度，搭配常見的綠色螢光發光材料 C545T，同樣以旋轉塗佈法製備發光層，其元件效率為 $7.8\text{cd/A}@1,000\text{cd/m}^2$ ，元件結構 ITO/PEDOT:PSS/TCTA/FADPA:C545T/TPBI/LiF/Al (圖七)。

(三)三芳香基胺(triarylamine)衍生物

三芳香胺化合物大多應用在影印 (xerography) 技術中的光導體，其電洞傳輸率很高，約有 $10^{-3}\text{cm}^2/\text{Vs}$ ，因此也可用在 OLED 元件中作為電洞傳輸層，或作為具有電洞傳輸性的主體材料，常見的有：TCTA、m-MTDATA。

2008 年 Kakimoto 等人^(26a,b) 結合具有電洞傳輸性的三芳香胺和具電子傳輸性的咪唑 (imidazole) 基團開發出 TBBI 與 Me-TBBI 材料，不僅具有良好的溶解度，而且具有高熱穩定性 (T_g 分別為 148 和 144°C)。將此材料搭配常用之綠光材料 $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ ，以旋轉塗

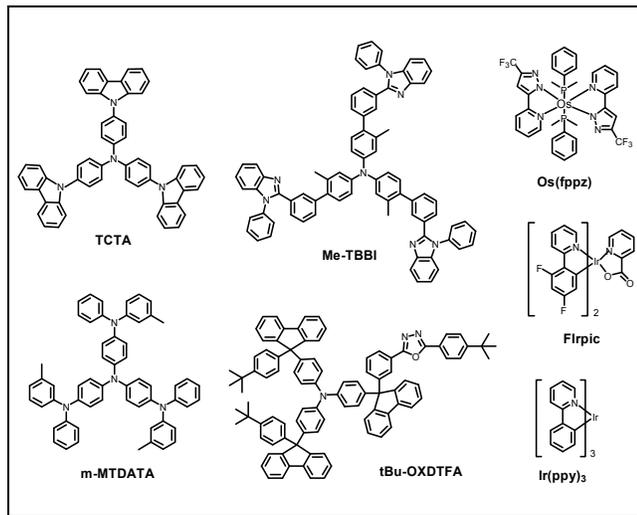
佈法製備發光層，其元件效率為 26.8cd/A、4.4 lm/W@200cd/m²。由於元件並未加入電子傳輸層，使得操作電壓偏高，須加至13.1V。

2008年交大許慶豐教授⁽²⁷⁾以同樣的概念結合多電子的三芳香胺基團與缺電子的噁唑基團，開發出tBu-OXDTEA材料。其將可提升溶解度的第三丁基基團(tert-Butyl group)加在側邊取代基的末端，既不影響分子共軛，又能增加分子溶解度。由於tBu-OXDTEA的三重態相當高(E_T>2.9eV)，將此材料搭配常見的藍光材料Firpic和清大季昀教授開發的紅光材料Os(fppz)，以液態製程製作小分子白光 OLED，元件結構為 ITO/PEDOT/tBu-OXDTEA:Firpic:Os(fppz)/TPBI/ LiF/Al，效率高達 22.3cd/A、5.0 lm/W@953cd/m²，CIE (0.37、0.39)。值得注意的是當亮度10,000cd/m²時，該元件仍有17.6cd/A的高效率表現，材料結構如圖八所示。

四、國內外廠商發展現況

(一)UDC

2008年UDC於SID發表⁽²⁸⁾可印式磷光OLED元件(P2OLED)，元件結構為ITO/HIL/HTL/EML/BL/ETL/LiF/Al，發光層(EML)是由小分子主體材料與客體材料所組成，HIL、HTL與EML採液態製程，BL和ETL則是以真空蒸鍍方式製作，其RGB三色元件效能如表一。



▲圖八 含三芳香胺基團之主體材料

▼表一 UDC可溶性發光材料發展現況

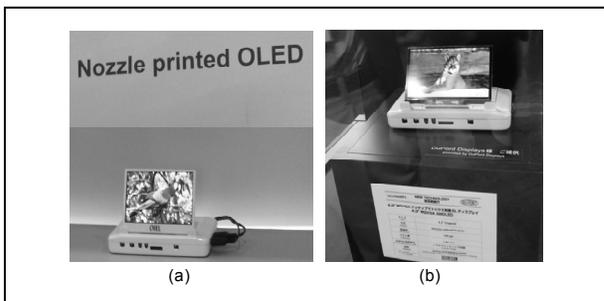
Device	效率(cd/A)	壽命(hour)	CIE(x, y)
Red ^a	9	53,000	(0.66, 0.33)
Green ^b	35	52,000	(0.33, 0.63)
Light Blue ^a	18	3,000	(0.19, 0.40)
Blue ^a	6	1,000	(0.15, 0.23)

The graph shows the normalized electroluminescence (EL) intensity as a function of wavelength (nm) for three different devices. The x-axis ranges from 400 to 800 nm, and the y-axis ranges from 0.0 to 1.0. The Red device (0.66, 0.33) shows a peak at approximately 620 nm. The Green device (0.33, 0.63) shows a peak at approximately 520 nm. The Light blue device (0.19, 0.40) shows a peak at approximately 460 nm.

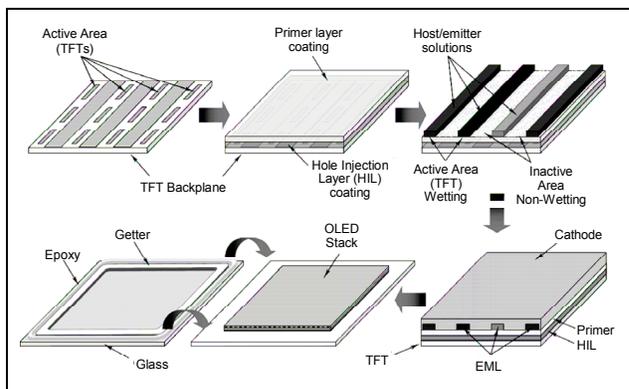
a : @500cd/m², b : @1000cd/m²。

(二)奇晶光電、大日本網屏和Dupont

2008年奇晶光電於日本橫濱光電展(FPD)中展出4.3吋Solution製程小分子AMOLED(圖九a)，此面板係採用DuPont的小分子材料，結合大日本網屏(Screen)開發之nozzle printing設備，再加上奇晶光



▲圖九 (a)奇晶光電；(b)大日本網屏展示之面板



▲圖十 DuPont元件製程

▼表二 DuPont可溶性發光材料發展現況

Dupont material	效率 ^a (cd/A)	壽命 ^b (hour)	CIE(x, y)
Red	13	62,000	(0.68, 0.32)
Green	25	1,000,000	(0.26, 0.65)
Blue	6.0	38,000	(0.14, 0.12)
Deep Blue	3.9	7,000	(0.14, 0.08)

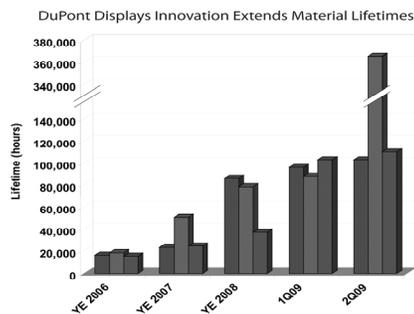
a : @1,000 cd/m² , b : 亮度自1,000cd/m²降至500cd/m²所需時間。

電本身的TFT背板而成，而大日本網屏公司於會場中也展示了一片完全相同的面板(圖九b)。

DuPont 近年來致力於液態製程 SMOLED 材料開發，強調其 nozzle printing製程可節省材料及降低大面積製程成本，G4投資成本約為蒸鍍製程之2/5~1/3。以G4基板製作2.2吋QVGA，tact time不到90秒，plate to plate膜厚均勻性為7%，元件製程如圖十所示。2009年 DuPont宣佈其G3 solution製程 SMOLED元件壽命已達到目標，甚至超過蒸鍍元件水準，其中綠光元件壽命更超過百萬小時，使OLED在低成本顯示器及一般照明應用上邁進了一大步(表二)。

(三)Add-Vision

美國Add-Vision公司⁽³⁰⁾致力於開發全印式可撓電子元件(fully-printed flexible electronics)，應用在消費性電子產品、smart card及電子看板(圖十一)，主要發光層材料有摻混的高分子發光聚合物(doped light-emitting polymer)，雖然不是採用小分子材料，但由此不難看出液態製程 OLED元件未來商品化的潛力。

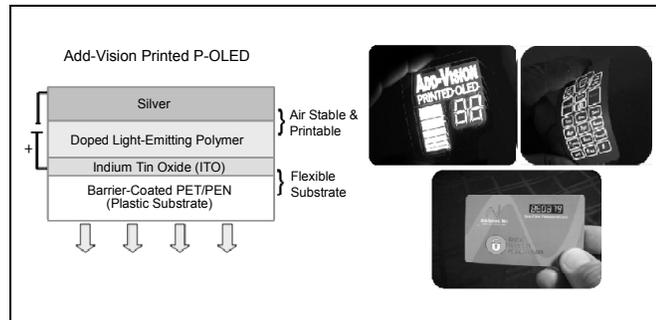


五、結語

目前OLED應用於顯示器或照明光源，成本太高是阻礙其商品化及普及化的關鍵因素，液態製程OLED的材料可以有效運用，設備投資成本也比傳統蒸鍍的高真空設備低很多，且容易大規模製造，因此成本將比現有OLED製程低許多，對未來OLED普及化有很大的影響。除此之外，低成本OLED製程可應用於新產品的開發，如拋棄式的電子產品或低階電子產品應用等，替OLED找到新應用，對OLED產業將產生巨大影響。

參考文獻

- Huang, C.; Zhen, C. G.; Su, S. P.; Loh, K. P.; Chen, H. *Org. Lett.* 2005, 7, 391.
- (a) Lai, W. Y.; He, Q. Y.; Zhu, R.; Chen, Q. Q.; Huang, W. *Adv. Func. Mater.* 2008, 18, 265. (b) Pu, Y. J.; Higashidate, M.; Nakayama, K.; Kido, J. *J. Mater. Chem.*, 2008, 18, 4183.
- Huang, J.; Liu, Q.; Zou, J. H.; Zhu, X. H.; Li, A. Y.; Li, J. W.; Wu, S.; Peng, J. B.; Cao, Y.; Xia, R. D.; Bradley, D. D. C.; Roncali, J. *Adv. Func. Mater.* 2009, 19, 1.
- (a) Wang, L.; Jiang, Y.; Luo, J.; Zhou, Y.; Zhou, J.; Wang, J.; Pei, J.; Cao, Y. *Adv. Mater.* 2009, ASAP. (b) Lee, T. W.; Noh, T.; Shin, H. W.; Kwon, O.; Park, J. J.; Choi, B. K.; Kim, M. S.; Shin, D. W.; Kim, Y. R. *Adv. Func. Mater.* 2009, 19, 1625.
- Okada, S.; Iwawaki, H.; Furugori, M.; Kamatani, J.; Igawa, S.; Moriyama, T.; Miura, S.; Tsuboyama, A.; Takiguchi, T.; Mizutani, H. *Proceedings of SID'02*, p.1360, June 19-24, 2002, Boston, USA.
- Gong, X.; Ostrowski, J. C.; Bazan, G. C.; Moses, D.; Heeger, A. J. *Appl. Phys. Lett.* 81, 3711 (2002).
- Huang, J. S.; Watanabe, T.; Ueno, K.; Yang, Y. *Adv. Mater.* 2007, 19, 739.
- Anthopoulos, T. D.; Frampton, M. J.; Nandas, E. B.; Burn, P. L.; Samuel, I. D. W. *Adv. Mater.* 2004, 16, 557.
- Tao, Y. T.; Wang, Q.; Yang, C. L.; Zhang, K.; Wang, Q.; Zou, T. T.; Qin, J. G.; Ma, D. G. *J. Mater. Chem.*, 2008, 18, 4091.
- Lee, S. J.; Park, J. S.; Song, M. K.; Shin, I. A.; Kim, Y. I.; Lee, J. W.; Kang, J. W.; Gal, Y. S.; Kang, S. W.; Lee, J. Y.; Jung, S. H.; Kim, H. S.; Chae, M. Y.; Jin, S. H. *Adv. Func. Mater.* 2009, 19, 1.



▲圖十一 Add-Vision Printed OLED

- Cheng, Y. M.; Lee, G. H.; Chou, P. T.; Chen, L. S.; Chi, Y.; Yang, C. H.; Song, Y. H.; Chang, S. Y.; Shih, P. I.; Shu, C. F. *Adv. Func. Mater.* 2008, 18, 183.
- (a) Ho, C. L.; Wong, W. Y.; Zhou, G. J.; Yao, B.; Xie, Z. Y.; Wang, L. X. *Adv. Func. Mater.* 2007, 17, 2925. (b) Zhou, G. J.; Wong, W. Y.; Yao, B.; Xie, Z. Y.; Wang, L. X. *J. Mater. Chem.*, 2008, 18, 1799.
- (a) 中華民國專利, I242999. (b) 美國專利, US 7,445,857.
- Baldo, M. A.; Lamansky, S.; Burrows, P. E.; Thompson, M. E.; Forrest, S. R. *Appl. Phys. Lett.* 75, 4 (1999).
- Tanaka, D.; Sasabe, H.; Li, Y. J.; Su, S. J.; Takeda, T.; Kido, J. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, L10 (2007).
- <http://www.novaled.com/oledcompetence/overview.html>
- Baranoff, E.; Suárez, S.; Bugnon, P.; Barolo, C.; Buscaino, R.; Scopelliti, R.; Zuppiroli, L.; Graetzel, M.; Nazeeruddin, M. K. *Inorg. Chem.* 47, 2008, 6575.
- Bera, R. N.; Cumpstey, N.; Burn, P. L.; Samuel, I. D. W. *Adv. Func. Mater.*, 2007, 17, 1149.
- Huang, W. S.; Lin, J. T.; Lin, H. C. *Organic Electronics* 9 (2008) 557.
- Jou, J. H.; Hsu, M. F.; Wang, W. B.; Chin, C. L.; Chung, Y. C.; Chen, C. T.; Shyue, J. J.; Shen, S. M.; Wu, M. H.; Chang, W. C.; Liu, C. P.; Chen, S. Z.; Chen, H. Y. *Chem. Mater.* 2009, 21, 2565.
- Orselli, E.; Kottas, G. S.; Konradsson, A. E.; Coppo, P.; Fröhlich, R.; Cola, L. D.; Dijken, A. V.; Büchel, M.; Börner, H. *Inorg. Chem.*, 2007, 46, 11082.
- Lo, S. C.; Bera, R. N.; Harding, R. E.; Burn, P. L.; Samuel, I. D. W. *Adv. Func. Mater.* 2008, 18, 3080.
- Gong, X.; Benmansour, H.; Bazan, G. C.; Heeger, A. J. *J. Phys. Chem. B* 2006, 110, 7344.
- Pope, M.; Kalimann, H.P.; Mangante, P. *J. Chem. Phys.*, 1963, 38, 2042.
- Kim, D. H.; Choi, D. H.; Park, J. J.; Lee, S. T.; Kwon, J. H. *Chemistry Letters* 37, (2008) 1150.
- (a) Ge, Z.; Hayakawa, T.; Ando, S.; Ueda, M.; Akiike, T.; Miyamoto, H.; Kajita, T.; Kakimoto, M. *Chem. Mater.* 2008, 20, 2532. (b) Ge, Z.; Hayakawa, T.; Ando, S.; Ueda, M.; Akiike, T.; Miyamoto, H.; Kajita, T.; Kakimoto, M. *Adv. Func. Mater.* 2008, 18, 584.
- Chien, C. H.; Kung, L. R.; Wu, C. H.; Shu, C. F.; Chang, S. Y.; Chi, Y. *J. Mater. Chem.*, 2008, 18, 3461.
- Xia, S.; Cheon, K. O.; Brooks, J. J.; Rothman, M.; Ngo, T.; Hett, P.; Kwong, R. C.; Inbasekaran, M.; Brown, J. J. *SID 08 DIGEST*, 295.
- http://www2.dupont.com/Displays/en_US/products_services/oled/amoled/
- http://www.add-vision.com/display_technology.php
- 曾美榕, “從FPD 2008看OLED技術發展”, 材料世界網[材料最前線]專欄, 2008/11/26.