

有機電子元件(Organic Electronic Devices)

吳幼麟

國立暨南國際大學電機工程學系 副教授

ylwu@ncnu.edu.tw

一、前言

你可以想像我們隨身攜帶著一個可以摺捲的顯示銀幕到處走，需要的時候只要把它展開，接上甚至不用接上電源便可以收看所要的畫面嗎？這並不是科幻小說的情節，透過有機電子元件的製作與發展，這是在不久的未來極有可能發生的。

我們都知道現今的電子元件(積體電路、電晶體、二極體、太陽電池等)，絕大部份都是用非有機的矽為材料來製作的。即便是現在非常熱門的液晶顯示器，除了液晶本身，它所需要的驅動電路之薄膜電晶體仍是以矽為主要的製作材料。而不論是積體電路或是液晶顯示的驅動電路的製作過程，都需要相當程度的高溫，所以它們所使用的矽基板或是玻璃基板都必需是可以耐高溫的，這也使得這些基板是硬而不能彎折的。可是若能將電子元件中的主動層改以有機半導體材料來取代，電子元件的基板便可改用可撓曲的塑膠基板，這是因為有機材料的沉積是在接近室溫下來進行的。其實，這就是所謂的「軟性電子(flexible electronics)」。所以，低溫製作、重量輕、可沉積在塑膠基板上等優點，便成了有機電子元件發展的原動力。

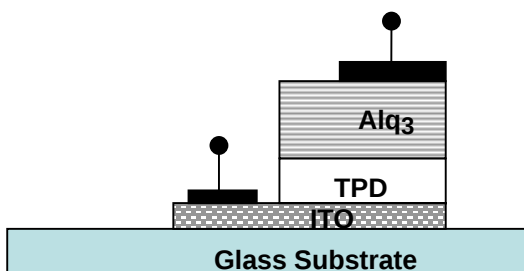
有機半導體(organic semiconductors)早在 20 世紀初便吸引了研究學者的注意，由於大部份的有機半導體在可見光下均展現了光傳導(photoconductive)的特性，因此，有機半導體最初被工業界用在影印(xerography)方面的應用。到了 1963 年，Pope 等人發現在 anthracene 單晶上加約 400 伏特的偏壓時會產生電激發光(electroluminescence)的現象，於是吸引了學者對有機半導體發光特性的研究。可惜的是，由於有機半導體通常呈現不穩定的特性使得要在有機半導體上形成可靠的金屬接觸(metal contact)是非常困難的。加上有機半導體對水氣、氧及紫外線是非常敏感，尤其是當電流通過有機半導體材料時，其電氣特性會迅速的衰退。再者，有機半導體的低載子移動率(carrier mobility)使得其無法使用在高頻率(> 10 MHz)的場合。

由於上述這些特性，使得有機半導體之主動電子元件(有機發光二極體、有機太陽能電池及有機薄膜電晶體)一直無法順利發展，直到 1987 年美國科達公司的鄧青雲博士等人利用類似 PN 接面的雙層有機結構製作出第一個高效率有機發光二極體前述有關有機半導體的缺點大部份都被克服了。鄧博士所使用的有機材料的個別分子單元包含了以共價鍵結合的約 30~40 個原子，以這樣的有機材料所構成的有機發光二極體 (Organic Light-Emitting Diode, OLED) 被稱作小分子 OLED(small-molecule OLED)。在 1990 年英國劍橋大學的研究人員利用有機高分子材料 poly para-(phenylene vinylene)(PPV)製作出類似的電激發光的元件。此種有機發光二極體被稱作高分子 LED (Polymer Light-Emitting Diode, PLED)。自此，不但觸發了研究學者對 OLED/PLED 之密集的研究，也引起業界對 OLED/PLED 平面顯示器的興趣。如 Phillips, Pioneer, Sony, Kodac, Sanyo, Cambridge Display Technology 及 Samsung 等知名廠商也都在過去數年當中先後推出單色或多色全彩之 OLED/PLED 之顯示面板 OLED 顯示器之所以如此獲得青睞，主要是它具有輕、薄、廣視角、高對比、低耗電及可全彩化的特性。特別是，OLED/PLED 可以在塑膠基板上製作使得 OLED 顯示器可撓曲化。在所有有機的電子元件中，發光二極體當屬發展最快速的，從早期單彩被動矩陣式顯示面板到高分子全彩主動式顯示面板都已被製作出來，可以看出有機發光二極體的發展已臻成熟。但是，在其它有機主動元件如有機太陽能電池、

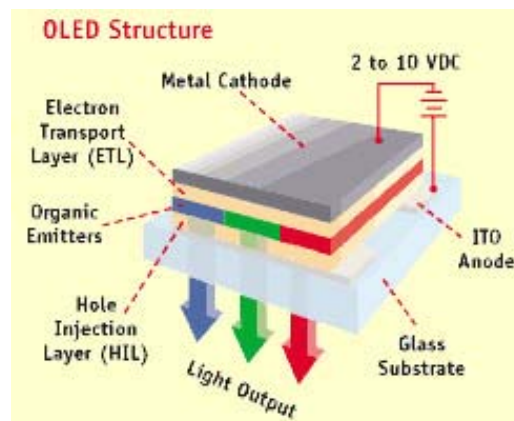
有機薄膜電晶體及有機雷射元件方面，則還有很大進步的空間。在本文中，我們將簡單介紹三種有機電子元件：有機發光二極體、有機薄膜電晶體(Organic Thin-Film Transistor, OTFT)及有機薄膜太陽能電池(Organic Solar Cell)。

二、有機發光二極體 (OLED)

如圖一所示為一簡單的 OLED 元件，其基本結構與非有機的 PN 接面發光二極體 LED 極為相似，它包含了陽極(通常以透明材料氧化銦錫 ITO 為之)、電洞傳輸層(hole transport layer, 簡稱 HTL，圖中以 N,N'-bis-(m-tolyl)-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine(簡稱 TPD)材料為之，電子傳輸層(electron transport layer, 簡稱 ETL，圖中以 tris(8-hydroxyquinolino)aluminum(簡稱 Alq₃)材料為之)及陰極的金屬電極所組成。我們可以看出在 OLED 中的 HTL 之功用即類似 LED 中之 P 型半導體，而 ETL 即類似 LED 中之 N 型半導體。透過外加電壓使 HTL 中的電洞及 ETL 中的電子移動至介面附近產生復合，而釋放出光來。有些 OLED 會在電極與載子傳輸層間額外加入載子注入層(電子注入層, electron injection layer, EIL 或電洞注入層 hole injection layer, HIL)以增加載子的注入效率。透過在有機材料中額外加入的染色材料(dye)，可以使 OLED 發出紅、綠、藍的三原色光，將此三原色光組成一個畫素(pixel)。當我們透過交錯的之陽極與陰極電極將許多畫素組合成一畫面，並以矩陣的方式選取所要的畫素施加電流使其發光進而達到全彩顯示的目的(如圖二所示)。



圖一 有機發光二極體之結構

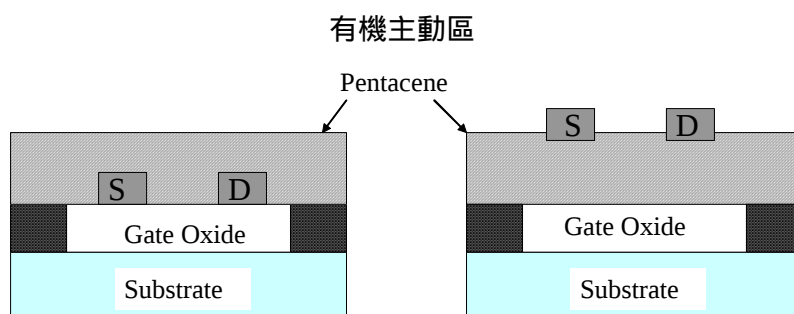


圖二 彩色 OLED 畫素結構

三、有機薄膜電晶體 (OTFT)

近十年來，將有機半導體應用在薄膜電晶體的製作上亦被廣泛的加以研究。傳統之無機半導體(通常以 Si 為主要材料)是以金屬-氧化物-半導體場效應電晶體(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, 簡稱 MOSFET)為主要結構，在有機薄膜電晶體中亦是以相同之 MOSFET 結構為主，唯一不同的地方是以有機半導體材料取代 MOSFET 主動區(Active Area, 即通道區)之無機半導體材料。由於有機材料是以旋塗(spin coating)或是蒸鍍的方式來沉積的，所以整個電晶體是以薄膜的方式存在的。一般而言 OTFT 之結構可分成底電極(bottom contact)與頂電極(top contact)兩種結構，如圖三所示。發展有機薄膜電晶體最主要的目標便是希望能將 OTFT 與 OLED 結合形成所謂全有機主動矩陣式顯示器(All organic active

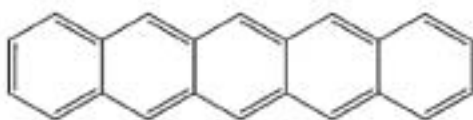
matrix display)，也就是將 OTFT 拿來當作選則畫素的開關，使得整個顯示



圖三 (a) 底電極 OTFT

圖三 (b) 頂電極 OTFT

面板均是由有機元件所做成。許多有機材料都曾經被拿來當作 OTFT 的主動層，但受到主動區有機材料中低的電子或電洞移動率所限制，因此 OTFT 的研發尚在嬰兒期，其特性仍有許多可以改善的空間。有機材料之所以有著低的載子移動率，是因為有機薄膜中的傳導是電子在有機分子間跳躍(hopping)的速率來決定的。依據目前文獻中的記載，電子移動率最高的有機材料是 pentacene，它的結構基本上是由五個苯環所連結而成，如圖四所示。以 pentacene 製作的有機薄膜電晶體的之電子移動率已經超過傳統的非晶矽(a-Si:H)薄膜電晶體了，但仍低於多晶矽薄膜電晶體。所以如何提升 OTFT 中載子的移動率，是目前學界所努力的一個主要的方向。

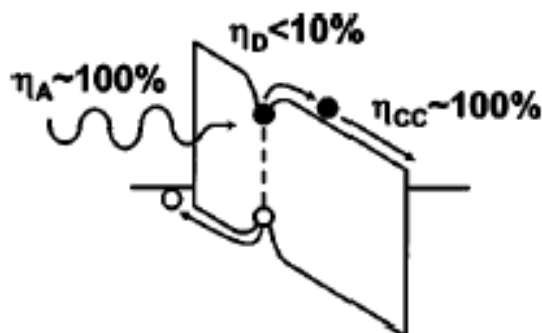


圖四 Pentacene 的化學結構圖

四、有機薄膜太陽能電池

與 OLED 及 OTFT 相較起來，有機太陽能電池的研究就比較少。主要是因為有機太陽能電池的效率太低了，目前文獻中記載之最高效率只有 3% 左右，遠低於矽太陽能電池的 24%。基本上，有機太陽能電池也是類似 PN 接面的結構，有一 donor 層與一 acceptor 層。與一般半導體不同的是在有機半導體中光子(photons)的吸收並非產生可自由移動的載子，而是產生束縛的電子-電動對(稱作激子 excitons)。這些 excitons 帶有能量但淨電荷為零，當它們擴散到分解區(dissociation site, 通常位於有機半導體與金屬之界面或是位於兩個電子親合力及游離電位差值很大的材料之間)時，束縛的電子-電動對便會分離，分離後的電洞便往元件的陽極移動，電子則往陰極移動，形成提供外部電路所需的電荷，因此將光能轉換成熱能，如圖五所示。圖中下凹之能帶代表了激子的束縛能(binding energy)。在有機材料中緊密束縛的激子必須仰賴內建電場才能形成電子電洞的分離，但是在一般有機元件中因內建電場(內建電場是因為材料中

出現載子濃度不均勻而產生的)所造成的激子分解效率(dissociation efficiency)是很低的 $\eta_D < 10\%$ ，一旦激子被分離成自由的電子及電洞，其在相對電極被收集的效率則是非常的高 $\eta_{CC} \sim 100\%$ 。因此，要提高有機太陽能電池的效率主要在於提高有機材料中的中的分解效率 η_D 。有機太陽能電池不論是在材料的開發或是效率的提高方面，都還有很長一段路要走。



圖五 有機太陽能電池的原理

五、 結論

由前面的敘述，我們大致可以瞭解 OLED、 OTFT 及有機薄膜太陽能電池等有機電子元件的原理。雖然，它們與所對應的非有機電子元件都有著類似的構造，但有機電子元件個別所使用的有機材料卻大大不同，這造成了要把它們整合在同一塊基板上的困難。但是有機材料的低溫製程、重量輕、製作簡單以及可製作在塑膠基板上的特性，已引起科學家們的廣泛興趣，正不斷朝向全有機積體電路(all organic IC)的方向努力。試想若能同時將 OLED、 OTFT 及有機薄膜太陽能電池都作在同一塊塑膠基板上時，那麼自供電(self-powered)的可摺捲之可攜式顯示銀幕就有可能實現了！