

有機光電半導體： 一種柔軟多變的新選擇

文·圖／吳忠幟

自從1947年貝爾實驗室發明第一顆電晶體以來，半世紀多來半導體技術、應用及產業蓬勃發展；一般較為大家所熟知的半導體材質主要是無機的半導體材料，例如矽晶與三五族化合物半導體，但事實上在半導體開始蓬勃發展的1950年代也同時有一些科學家研究以有機分子材料組成的有機半導體（表1，圖1），從1950年代到1960年代陸續有科學家報導各種有機半導體的物理特性、電氣傳導特性、各種光電現象如光導（photoconductivity）及電致發光（electroluminescence）等之研究結果與理論，在當時這些相關的研究結果雖然尚未能促成一套具有足夠規模的技術或產業，但是也奠定了後來（幾十年後）及今天有機光電半導體及元件技術及應用的學理基礎。

1970年代美國全錄公司（Xerox）發明影印機，其中引入一項核心的有機光電半導體元件—有機光導體（organic photoconductor，簡稱OPC），作為將光學影像信號轉換為電信號乃至於最後之碳粉影像的關鍵媒介，是第一個大量導入商業應用之有機光電半導體元件。有機光導體及至今日仍然是各種影印機及雷射印表機的核心關鍵組件，大家如果拆開常用的雷射印表機碳粉匣，其中圓桶狀之裝置即為有機光導體所構成之有機感光鼓。可以說沒有有機光導體就沒有今天的雷射印表機、影印機等電子寫真/印刷技術（electrophotography/electronic printing）的便利。

1970年代另外一件有機光電半導體發展的

表1：有機光電半導體及元件發展大事紀

| | |
|--------|--|
| 1947 | 貝爾實驗室發明電晶體 |
| 1950年代 | - Works on crystal organic semiconductors - Photoconductivity in dyes, porphyrins etc. |
| 1960年代 | Electroluminescence from organic crystal (anthracene) |
| 1970年代 | - Organic photoconductors (OPC) - Conducting polymer |
| 1986 | Donor-acceptor heterojunction organic solar cells from Kodak |
| 1986 | First polymer (PT) transistor from Mitsubishi |
| 1987 | Efficient multilayer organic LEDs from Kodak |
| 1990 | Conjugated polymer LEDs from Cambridge |
| 1990s | - Dye-sensitized solar cells (1991) - Polymer bulk-heterojunction solar cells (1995) - Organic transistors with oligomers (since 1990) |
| 2000 | Heeger, MacDiarmid, Shirakawa因導電高分子獲諾貝爾獎 |

重要里程碑是導電高分子（conducting polymer）的發明，美國的物理學家Heeger教授、化學家MacDiarmid教授、日本的化學家Shirakawa教授共同發現針對具有半體特性的共軛高分子（conjugated polymer）作電化學攪雜，可以大幅提高其導電性使之成為導體。這三位科學家因為這項重要的發現獲得2000年的諾貝爾化學獎。

1980年代至1990年代初期，由於幾項具有啟發性研究結果的揭露與報導，有機光電半導體及

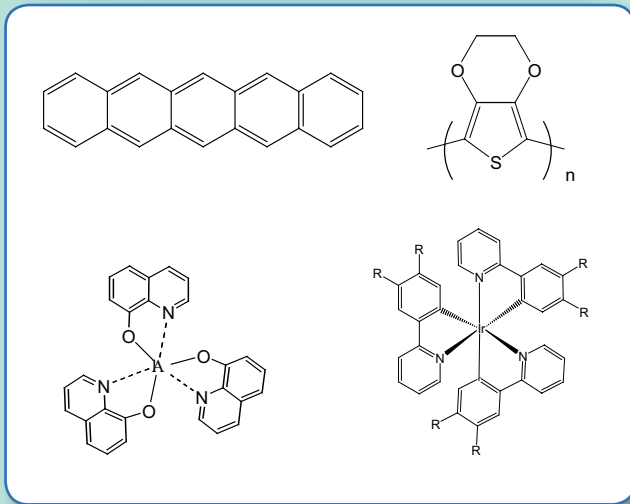


圖1：一些有機光電半導體分子的例子。

元件技術及應用的研發可說是獲致了全面性的復興。1987年美國柯達公司的鄧青雲博士和VanSlyke利用真空蒸鍍的方法，以有機小分子發光及電荷傳輸材料形成多層有機發光二極體（heterostructure organic LED—OLED），大幅降低有機發光元件電壓、提高效率，確立了OLED元件的實用性。1990年，劍橋的研究群報導以共軛高分子為發光材料之高分子發光二極體（polymer LED—PLED），由於高分子材料的便利製程，很快引發了PLED的研究熱潮。自此以後，各種光色的OLED技術持續進展，使OLED成為一項重要的顯示器技術。近年由於白光OLED效率不斷提升，大家也開始倡議白光OLED於照明之應用。

1986年美國柯達公司的鄧青雲博士（C.W. Tang）發表施體—受體異質結構（donor-acceptor heterojunction）的有機太陽能電池（organic solar cells/photovoltaics, OSC/OPV）概念，透過光激發方式，在施體分子（donor）與受體分子（acceptor）間造成光致電荷轉移（photo-induced electron transfer），產生自由電子和電洞，透過外部電極

加以收集光電流而達發電效果。此種概念到了90年代初期繼續延伸應用在後續的染料敏化太陽能電池（dye-sensitized solar cells, DSSC）、高分子奈米結構太陽能電池（bulk nano-heterojunction polymer solar cells），奠定今天各種奈米有機太陽能電池技術的基礎。

1986年日本的Mitsubishi公司首度報導了使用共軛高分子為半導體的有機薄膜電晶體（organic thin-film transistor, OTFT），其後也陸續有科學家報導利用小分子及寡聚物（oligomer）為半導體之高性能有機薄膜電晶體。自此半導體技術中重要的電晶體元件也能夠以有機半導體來實現，有機光電半導體元件家族可說是全員到齊了。

1990年以後有機光電半導體、有機電子和光電子元件研究與應用快速進展；一般而言，有機電子及光電子材料及元件由於具有良好的機械韌性和低溫製程，使其可以很容易地製作在任何輕、薄甚至可撓的基板上（如塑膠基板），有重量輕、可撓曲捲折、製程便利、可作大面積用途等特點，激起了人們製作輕便及可撓式顯示器、積體電路、光電系統，以及可印刷式電子/光電用品的夢想，預期將產生許多與傳統無機半導體區隔之應用。

筆者在1990年代初於美國攻讀博士學位期間，適逢當時歐美各國有機光電半導體及元件相關研究方興未艾，因緣際會得以參與有機光電半導體及元件之研究，進行博士論文之研究；作為一個新興的研究課題與研究領域，當時有機光電半導體及元件之研究可說是俯拾皆是題材、皆是課題，研究者多充滿著熱情與興奮感。筆者在1997-1998之際畢業返國從事研究教學工作，很幸運地又剛好趕上近年來臺灣科技研發與產業幾項相關且重要的潮流，對於有機光電半導體及元件研究的熱誠因而得以延續。

一方面，在1997-1998之際正是臺灣平面顯示器產業（TFT-LCD）起飛的年代，臺灣的顯示器公司如雨後春筍般相繼成立，除了TFT-LCD獲得極大的關注外，當時OLED也被相當多公司及研發單位視為是繼TFT-LCD之後重要的次世代顯示器技術，有相當大的期待，全盛時期臺灣至少有超過10家以上之公司投入OLED顯示器之研發與事業化，雖然後來一些公司因體會OLED技術仍需投入相當資源研發、暫時無法達到TFT-LCD之經濟規模而退出，但在當時對於OLED/有機光電半導體及元件研究者而言，可說是提供了相當大之研究發展空間以及奧援。

另一方面，從1990年代中期起，臺灣的研究學者感受到世界上有關有機光電半導體及元件的研究脈動，開始積極有計畫地投入有機光電半導體及元件相關研究，不過當時臺灣從事有機光電半導體的研究學者多半是在化學、材料及物理領域，在電機/光電領域的研究學者仍少見，以筆者電機/光電領域的專長背景相對於國內其他相關研究學者剛好互補，因此能在有機光電半導體及元件的研究上與許多卓越的研究者有相當大的合作空間；透過這樣的合作，筆者充份地體會到跨領域研究的樂趣與威力。

此外，近年來隨著電子技術與人類生活之進步，全球的研究都在尋求更為輕薄短小、符合人因工程、便利攜帶、柔軟安全、可自由捲曲，適合行動的多功能電子技術與產品；因此軟性電子技術預期將為產業結構和人類生活帶來革命性的變化，近年來無論是學術界或工業界都益發積極投入相關研發，而國內也在行政院召開的2005年及2006年“產業科技策略會議（SRB）”中宣示將軟性電子列為發展重

點。這些也賦予有機光電半導體及元件的研究者相當強的研究動機。

在這些背景之下，筆者於1998年很幸運地能獲得母校光電所及電機系任教的機會，當時國內的電機、光電及電子相關系所，半導體之教學研究主要還是無機半導體，對於有機半導體或是沒聽過、或是半信半疑，幾乎沒有具備有機光電半導體及元件專長及背景的師資，換言之，本系所師長非常具有膽識，在當時願意給我這樣的機會嘗試。

回到臺大任教後，我們在臺大建立了電資學院第一個有機光電半導體及元件的實驗室，建構了有機光電材料與元件研究所需之製程與光電量測設施（如圖2）。這些設施的建立，允許我們對有機材料、薄膜及元件特性作深度而廣泛的探討，並得與其他校內外及國內外化學、材料之同仁進行跨領域合作研究。在這些基礎之下，筆者近年來致力於有機光電半導體、元件、顯示、照明、軟性電子技術相關之研究與教學，在電資學院持續開授有機光電半導體與元件的課程；在研究方向則包括深入瞭解有機光電半導體及元件之



圖2：有機光電半導體及元件實驗室一隅。



圖3：紅藍綠及白光有機發光元件。



圖4：軟性電子元件與電路。

基礎物理，以及創新的技術與應用方向，包括：

(1) 顯示、照明技術之研究（如圖3、圖4）：致力於高效率、高畫質之有機發光元件與顯示、照明技術，薄膜電晶體，以及元件/顯示光學等之研究；

(2) 有機光電半導體元件之研究：致力於有機半導體與光電元件之物理與技術，包括發光/雷射元件，有機（發光）薄膜電晶體，感光元件，感測元件等；

(3) 有機光電半導體與材料之基礎

物理之研究：包括有機半導體中之載子傳輸、電荷轉移與光物理/光學特性與機制、時間解析光譜術、有機半導體之物相/相變（如非晶、液晶、等向性、非等向性、分子排列）、形態、分子形態以及分子結構與物性、光電特性關係等之研究。

筆者回到臺大任教這些年來，隨著國內OLED顯示產業、軟性電子/顯示產業、能源/太陽能產業等之開展，有機光電半導體及元件等應用日趨廣泛，並逐漸為大家認知及接受，有越來越多人才投入相關的研究。以臺大電資學院來說，目前有好幾位教授從事有機光電半導體及元件相關的研究，而在理學院、工學院系所也都有從事相關研究的教授，相信大家的合作互動會越來越多，可激發出越來越多的火花。而筆者最高興的莫過於，對電資學院的學生來說，有機光電半導體與元件已不盡然是一個陌生而且遲疑的選擇。（本專題策畫／電機系林茂昭教授&胡振國主任）



吳忠職小檔案

1990臺大電機工程學系畢業，1997獲美國普林斯頓大學電機工程博士學位；1997-1998任職於工業技術研究院電子所；1998年起受聘臺灣大學電機工程學系、光電工程研究所、暨電子工程研究所，擔任助理教授，2002年升任副教授，2006年升任教授；2007年起兼任電機系副系主任。研究興趣與專長主要為有機光電半導體與元件、透明/氧化物半導體與元件、顯示/照明技術、軟性與透明電子、奈米科技等。曾開授有機光電半導體與元件、顯示技術、半導體元件物理、奈米電子等相關課程。