CRT、LCD、OLED、LED：顯示器科技的演化與比較

陳錦地

中央研究院化學研究所研究員

前言

本文依 CRT、LCD、OLED、LED 的順序做顯示器科技演進的介紹，基本上這是實用顯示器在市場出現的時序。文章就各顯示器技術簡要操作原理與發展的歷程做敘述，各顯示器彼此的優缺點有深入的比較說明。

CRT

陰極射線管（cathode ray tube, CRT）是映像管電視機的重要構件，可以追溯到 19 世紀末英國物理學家湯姆森（J. J. Thomson）發現電子所使用的實驗工具，湯姆森在 1906 年獲頒物理諾貝爾獎。映像管電視的原理是透過高電壓電子從陰極發射出來撞擊螢幕內側塗佈的螢光粉，螢光粉受到電子激化發光來顯示影像。映象管內配置有偏轉線圈，由偏轉線圈所產生的電場或磁場控制從電子槍發射出來的電子束方向，以從上到下、從左到右的順序快速掃描整個螢幕，利用人眼的視覺暫留原理，形成連續不斷的動態影像。一開始映像管電視機是黑白的，螢幕內側塗佈的是一種發白光的混合螢光粉，後來在 1950 年代美國無線電公司（Radio Corporation of America, RCA）研發出三槍三束映像管，偏轉線圈精準控制電子撞擊螢幕上的紅色、綠色、藍色螢光點（畫素），映像管電視機進入到彩色的時代（圖 1）。

圖 1
彩色映像管電視機

註：照片取自高雄港都風尚系列 - 跨百光年 - 足跡。https://news.owlting.com/articles/4065。

從電子槍到螢幕屏要有足夠的距離讓偏轉線圈控制電子束方向，映像管電視機的厚度往往高達 4、50 公分，較大的 20~30 吋電視機有近 1 公尺長的映像管也不稀奇。映像管電視機不僅厚而且很重，因為映像管需真空封裝在厚壁的玻璃管中。笨重龐大的映像管顯示器很難放在電腦桌或書桌上給大於 18~20 吋螢幕的桌上型電腦使用，更不用講給要求輕薄的行動裝置如筆記型電腦、個人數位助理（personal digital assistant, PDA）、平板電腦、及手機。

LCD

除此之外，RCA 在 1970 年代發明了世界上第一個液晶顯示器（liquid crystal display, LCD），但其使用的技術並非現代液晶顯示器所使用的扭轉向列場效應（twisted nematic field effect）方式，在 1973 年日本消費性電子大廠 Sharp 公司把這個效應運用於製作電子計算機的數位顯示器上（圖 2）。那時的液晶顯示器只有明暗的顯示（即黑白畫面），也只能顯示靜態的畫面例如數字，但是這種液晶顯示器很輕薄，包括前後玻璃板厚度不超過 0.5 公分，因為沒有背光模組很省電、驅動電壓也低，乾電池或水銀電池的電壓就能驅動。繼電子計算機，數位手錶也出現在市場上（圖 2），1980 與 1990 年代的掌上型遊戲機、傳呼機（BB call）、無線電話機或早期的手機，都採用這種液晶顯示器。

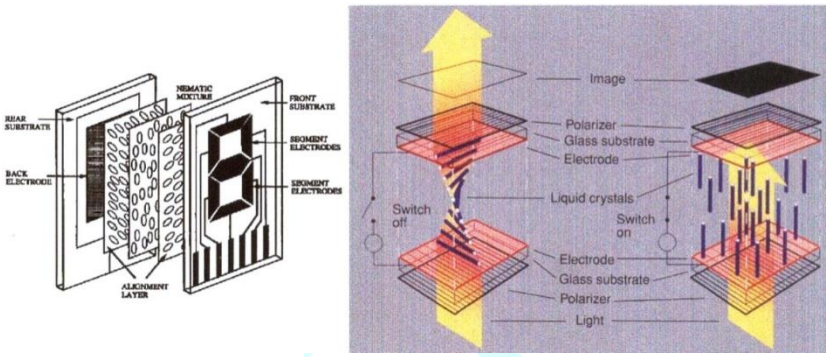
圖 2
使用液晶顯示螢幕的電子計算機（左圖）與數位手錶（右圖）

註：圖為作者拍攝。

液晶顯示器用到的液晶是特殊的液體，構成液體的分子在某個溫度範圍內會有規律的排列方向，這現象在 19 世紀末被奧地利化學家在觀察膽固醇（安息香膽固醇）時發現，但膽固醇分子出現規律排列的液體溫度超過 25 ºC 室溫太多，無法用在室溫下操作的液晶顯示器，室溫液晶是後來材料化學家重新設計液晶分子結構並混合多種液晶

物質而得。液晶顯示器的操作關鍵在施加的電壓，液晶分子在電場下可被轉動而改變排列的方向，排列方向可被改變的液晶分子可控制光線的穿透與否，顯示器的明區與暗區端視該區是否有施加電壓，這是扭轉向列場效應原理的應用（圖 3）。觀看這樣的液晶顯示器光線是來自於外部，為反射式液晶顯示器。

圖 3
液晶顯示器的扭轉向列場效應



註：圖案修改自 Wikepedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Twisted_nematic_field_effect。

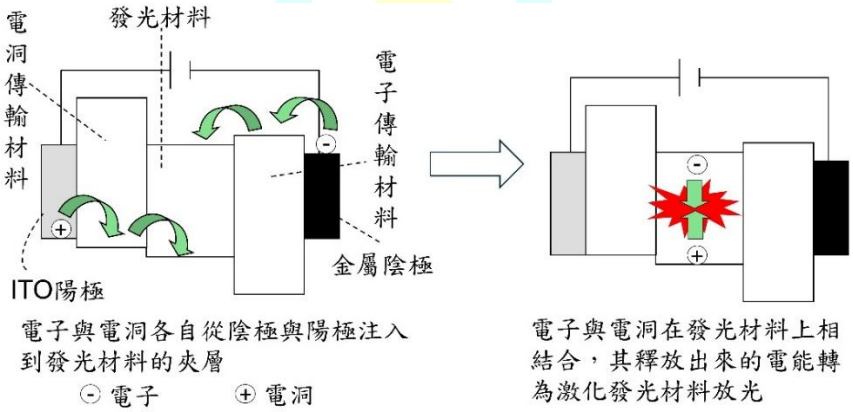
現代彩色電視機的液晶顯示器螢幕是在 1980 年代由日本 Sony 和 Sharp 兩家消費性電子公司開發出來的，顯示器被稱為薄膜電晶體液晶顯示器（thin-film-transistor liquid crystal display, TFT-LCD）。TFT-LCD 內部多了背光光源（細小的日光燈管或白光二極體小燈泡）、彩色濾光片（從白光分出色彩）、薄膜電晶體（個別控制數百萬個畫素電壓的施加）。無論是反射式或 TFT-LCD 液晶顯示器都是一種薄型平面顯示器，採用 TFT-LCD 的電視機厚度包括機殼僅 5、6 公分。雖然 TFT-LCD 顯示器從 1980 年代開始出現，但市場上取代映像管螢幕的電視機或電腦要到 21 世紀初，原因是 TFT-LCD 電視機結構較複雜，早年生產成本要比映像管來得高、螢幕尺寸也做不大。隨著製作技術的精進，面板廠從早期的 4、5 代開始至今最大的 10.5 代廠，面板越用越大，從頂多 14~18 吋顯示器螢幕給桌上型電腦用，到現在 50~80 幾吋電視機液晶螢幕都不是問題，關鍵在面板廠用的面板越大，生產線從一次製作流程中切割出來的顯示器面板數量就越多（大量生產），生產成本就越低。現在 14~18 吋的液晶顯示器早就比當年同尺寸的映像管顯示器便宜許多了，便宜又適用的 TFT-LCD 顯示器在市場上出現，映像管顯示器就被淘汰了。

OLED

有機發光二極體（organic light-emitting diode, OLED） 顯示器影像顯示方法和 TFT-LCD 顯示器完全不同，OLED 顯示器使用二極體的架構用到發光材料（有機螢光或磷光材料）電激發光（electroluminescence）的現象。負電荷（電子）與正電

荷（電洞）各自從陰極與陽極經過價荷傳輸層注入到發光材料夾層，電子與電洞在發光材料上相結合釋放出來的電能轉為激化發光材料來放光（圖 4）。有機材料的電激發光在 1960 年代初被詳細報導過（Pope et al., 1963），當時製作的發光二極體是用發藍光有機化合物蒽（anthracene） 的晶體（10~20 微米/micrometer 大小），點亮二極體的電壓（驅動電壓）太高（~400 V/伏）且只有持續幾小時的壽命。直到 1980 年代美國伊士曼柯達（Eastman Kodak）公司以鄧青雲（C. W. Tang）為首的研究團隊(Tang et al., 1987)，改變了製作 OLED 的方法，改用熱真空蒸鍍（thermal-vacuum deposition）的方式製作不到 100 奈米（nanometer）厚度的有機薄膜材料，搭配也是很薄的氧化銦錫（indium tin oxide, ITO）導電透明電極，同時二極體內多加了一層電洞傳輸有機薄膜 （<100 奈米）材料，此 OLED 的驅動電壓僅 1~2 V，OLED 顯示器才有實用的契機。

圖 4
二極體電激發光的機制



註：圖為作者繪製。

跟 TFT-LCD 顯示器相比，OLED 顯示器有許多優點。首先，OLED 顯示器少了 TFT-LCD 顯示器的背光模組，也沒有彩色濾光片，兩片極化鏡只需用一片，這都減少了顯示器的厚度與重量，更有利於行動裝置的使用。再來，TFT-LCD 顯示器最耗電的是背光模組光源，OLED 是材料自發光型顯示器不用背光光源，所以較省電，尤其是 OLED 顯示器可以設定為黑色背景，黑色背景區域完全用不到電流，而 TFT-LCD 顯示器使用時其背光光源是全時全域開啟點亮，即使是設定為黑色背景也省不到電，因為那只是把液晶分子轉到低（非零）透光率的排列方向。TFT-LCD 顯示器因為無法達到 100%的極黑，深邃的對比效果較差，顯示的色彩沒有 OLED 顯示器的飽和艷麗。此外，用早期的 TFT-LCD 顯示器看快速的影像（如棒球投手投出去的球、網球揮拍網球的飛行），會看到不連續的畫面，這不會發生在 OLED 顯示器上，因為電激發光的速度比液晶分子轉動的速度快 1,000 倍。速度快刷新率高，電競遊戲無不使用 OLED 顯

示器來提供流暢的遊戲畫面。

OLED 顯示器跟 TFT-LCD 顯示器一樣，需要製作薄膜電晶體來操控顯示器數百萬個畫素，但 OLED 是以電流而 TFT-LCD 是以電壓來操控，薄膜電晶體使用功能不同造成 OLED 顯示器電晶體的製作良率比較差，加上 OLED 顯示器的一個畫素需要較多顆的電晶體來有穩定電流的控制，這是 OLED 顯示器的製作成本較高的一大原因。隨著 OLED 顯示器的封裝技術與封裝材料的發展改進，如今壽命問題主要受限於有機發光材料先天上較無機發光材料來得差，壽命久的有機發光材料其電激發光的效率往往都較低而較耗電，基於壽命的考量不得不採用較耗電的發光材料。

由於更輕更薄的關係，目前市面上最輕巧手機（重量在 190 公克以下、機身厚度沒有超過 0.9 公分） 是來自七個不同廠牌，就只有一家用的不是 OLED 顯示器螢幕。行動裝置需要彩色顯示器的，越來越多採用 OLED 顯示器螢幕，例如三星（Samsung）全系列 Galaxy 手機、谷歌（Google）全系列 Pixel 手機（圖 5），蘋果（Apple）手機從 2017 年 iPhone 10 開始有 OLED 顯示器螢幕的選項，而其平板電腦 iPAD Pro 從 2024 年開始採用，最近更宣佈 iPAD mini、MacBook Pro、iPAD Air、MacBook Air 要陸續導入 OLED 顯示器螢幕，其他筆電廠牌有出 OLED 顯示器螢幕選項的有 ASUS(華碩)、Acer(宏碁)、與 Lenovo(聯想)。電視機方面，有採用 OLED 螢幕的電視機品牌目前主要有 Sony、Samsung、Panasonic、Philips 和樂金（LG）（圖 5）。

圖 5

用 OLED 顯示器做螢幕的 Google Pixel 6.1 吋手機（左圖）、55 與 65 吋 LG 平面電視機（右圖）

註：圖為作者拍攝。

現在各大手機品牌幾乎都有可彎曲或摺疊的手機，清一色是由 OLED 而非 TFT-LCD 顯示器做的，因為 TFT-LCD 顯示器液晶材料是被剛硬難以彎曲的玻璃基板夾在中間以維持均勻一致的厚度，施加電壓轉動液晶分子才能整齊劃一。OLED 顯示器沒有這種厚度均一的限制，加上 OLED 顯示器可以製作在塑膠材質的基板上來彎曲甚至

摺疊，這可謂是 OLED 顯示器的獨門優勢。

LED

發光二極體（light-emitting diode, LED）現在是指那些用無機發光材料做的二極體。無機材料電激發光最早的應用是在 1960 年代儀器設備或跑馬燈看板發紅光的小燈泡，不是顯示器方面的應用。現代顯示器做全彩影像的顯示必須要有紅、綠、藍三個基本顏色一起搭配，而穩定持久的藍光 LED 在 1990 年代末之前都欠缺，做不成顯示彩色影像的顯示器，但藍光LED到齊後原本紅色單一色調顯示數字或文字的LED電子看板進入到多色顯示的時代（圖 6）。

圖 6
多色顯示的 LED 電子看板

無機材料 LED 具有多層結構的磊晶架構，被夾在中間的發光材料層跟上下層的價荷傳輸材料在晶格排列上要相契合，高亮度的 LED 發光才能穩定持久，藍色的無機電激發光材料是最難找到跟上下層材料晶格相契合的，所以最晚被開發成功。成功開發出藍光 LED 的是以中村休二（Shuji Nakamura）為首的三位日本人，他們三位後來都獲頒 2014 年物理諾貝爾獎。

藍光 LED 開發出來只解決了製作 LED 全彩平面顯示器的諸多問題之一。做在 LED 三層架構中的無機材料是一顆顆的磊晶顆粒，即使是微（micro） LED 的晶粒，其厚度~10 微米遠大於 OLED 中有機薄膜的厚度（< 0.1 微米），所以理論上 LED 做成薄型的平面顯示器在厚薄的優勢是不如 TFT-LCD，更不用講 OLED，尤其是用在輕薄的行動裝置上。更大的問題是，無機材料在原生晶圓基板上長出的一顆顆磊晶粒要經過「轉板」的操作程序轉移到 LED 顯示器的驅動基板上，這對近距離觀看、高解析度、數百萬顆微磊晶的行動裝置，製作良率往往偏低，造成 micro LED 平面顯示器生產成本高於 TFT-LCD 或 OLED，雖然最近市場上開始出現 micro LED 的電視機，但其售價都非常昂貴。

製作超大型（尺寸在 2、30 公尺以上）、遠距離（幾十公尺外）觀看的 LED 顯示器，不會有上述的問題（厚度要薄，解析度要高、微晶粒「轉板」的良率要夠）。LED 螢幕是由許多相同的矩形單元（被稱為模塊）組合而成，組成超大 LED 螢幕中模塊的磊晶不用製作成那麼微小、晶粒排列不需那麼緊密、放在每一模塊中 LED 磊晶的數量少很多，製作這樣子的 LED 模塊其「轉板」良率夠高而能有商業利基。另外 TFT-LCD 或 OLED 顯示器要做成超過 120 吋（~3 公尺）大螢幕，在成本考量下不行，因為最新 10.5 代面板廠一整塊玻璃基板差不多就是三公尺左右，無法以量產方式來壓低成本。

超大型 LED 顯示器螢幕經常出現在運動場所如田徑場或籃球場（圖 7），LED 具有高亮度的優點，放在戶外大廈外牆上數層樓高的螢幕，遠距離觀看既使是白晝下仍然明亮清楚（圖 7）。事實上 1980、1990 年代就有超大型 LED 顯示器螢幕，但是色彩顯示不完全因為缺少藍光 LED，那時的技術也做不出小顆粒的磊晶，LED 顯示器螢幕不僅解析度差，LED 燈泡之間的縫隙也頗為明顯，影響觀賞體驗。

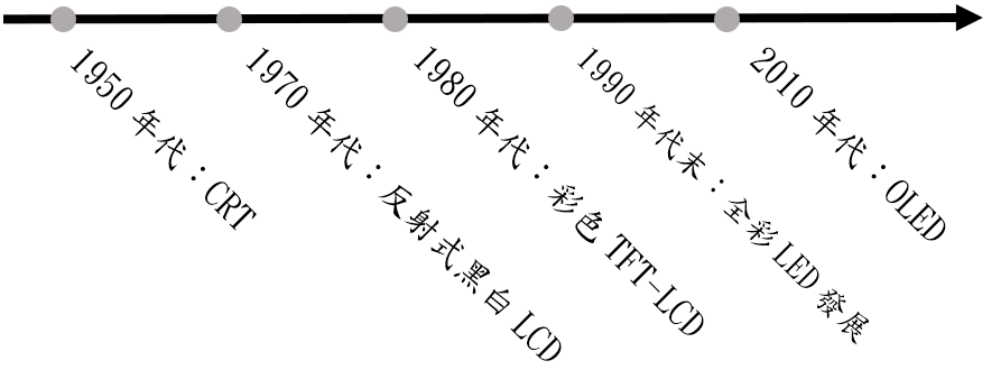
圖 7
超大 LED 顯示器螢幕：美國 NBA 籃球場（左二圖）、大樓外牆（右二圖）

結語

回顧顯示器科技百年來的演變（圖 8），首先登場的是 CRT，主要用在電視機的螢幕，但厚重龐大並不適合用在大尺寸的電視機，太佔空間也很不便給桌上型電腦的螢幕用。液晶平面顯示器適時的發明解決了這問題，反射式黑白 LCD 開創了數位顯示

器裝置的新紀元，彩色 TFT-LCD 顯示器成為後來要求輕薄的行動裝置之不二選項。OLED 是接下來出現的顯示器，由於更輕更薄更快速的優點，行動裝置的 TFT-LCD 顯示器大有被 OLED 顯示器取代之勢。LED 基本上是發光的燈泡在 1960 年代就有，在顯示器方面的應用並沒什麼發展，直到 1990 年代末藍光 LED 開發成功，全彩 LED 平面顯示器才開始有所進展，但由於製作良率的問題，中小尺寸行動裝置顯示器沒有商業利基，反而是超大尺寸的 LED 顯示器螢幕，製作上因為沒有良率的問題而大受歡迎，加上彩色顯示器 TFT-LCD 或 OLED 目前都做不到超大尺寸的螢幕，LED 是目前這方面唯一可行的顯示器技術。

圖 8
顯示器科技演進歷史簡圖



參考文獻

Pope, M., Kallmann, H. P., & Magnante, P. (1963). Electroluminescence in Organic Crystals. *The Journal of Chemical Physics, 38*(8), 2042-20434.

Tang, C. W., VanSlyke, S. A., (1987). Organic Electroluminescent Diodes. *Applied Physics Letter, 51*(12), 913-915.