

一、序論：

1.1 前言：

近幾十年來薄膜電晶體大都以無機材料為主，特別是在主動式平面顯示器（Active Matrix Flat Panel Display，AMFPDs）上，目前大都使用Polycrystalline-Si(Poly-Si)或Amorphous-Si(a-Si)來製作薄膜電晶體。自從1977年Macdiarmid等人發現以碘蒸氣摻雜聚乙炔（Polyacetylene）可使其導電度大幅提昇，自此開始了導電高分子的研究。有機導電分子及高分子材料從此迅速的研究開發，有機材料在光電及電子元件的應用潛力極廣。包括了有機薄膜電晶體（Organic Thin Film Transistors，OTFTs）、有機電激發光元件（Organic/Polymer Light Emitting Diode，OLED/PLED）、有機太陽能電池（Organic Solar Cells）、無限射頻辨識系統（Radio Frequency Identification，RFID）及光感應器（photosensor）等。

利用有機材料來製作電子元件的優點有(1)溶液製程（Solution Process）可直接使用旋轉塗佈（Spin coating）、噴墨（Ink-jet Printing）等簡單製程製作，(2)易大面積製作，(3)成本低廉，(4)低溫製程，(5)可製作於可撓性基板上，(6)重量輕、體積小、耐衝擊等優點。而在其缺點方面(1)載子的遷移率偏低，(2)製程穩定度差，(3)熱穩定性不佳，(4)元件壽命短；且在有機薄膜電晶體上，操作與起始電壓（Threshold Voltage）太高、 I_{on} / I_{off} 比值偏低、操作在累積模式（Accumulation Mode）而不是反轉模式（Inversion Mode）。所以如何去提昇載子移動率、元件穩定度等，是非常重要的，如此才能使有機元件的應用性更廣泛。[1]

1.2、OTFT 半導體及相關元件特性：

1.2.1 有機薄膜電晶體之結構：

一般傳統的場效應電晶體是以無機半導體為基底，如：Si，其構造最常使用的為金屬-絕緣層-半導體場效電晶體，如果絕緣層的部分我們選用氧化

層 (Oxide)，就是我們常聽見的金氧半場效電晶體 (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors, MOSFETs)，我們常簡稱為MOS，圖2.1就是一個MOSFET的剖面圖。

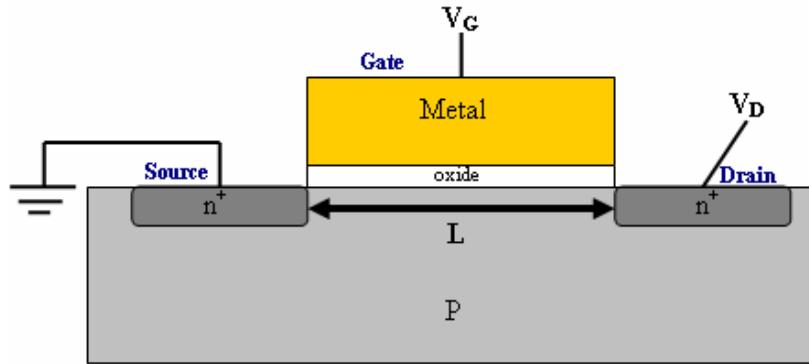


圖 2.1 傳統的MOSFET電晶體剖面圖。

根據所選用不同型態的半導體(通常有p型與n型兩種)，我們會在閘極外加一個電壓，其目的是要使半導體之主動層形成反轉區，形成反轉區後利用電壓來控制通道的大小，當電壓到達某一個值後通道形成且開始導通，此電壓稱為起始電壓 (Threshold Voltage)，而電晶體此時處於線性區 (Linear Region)，如果我們將電壓繼續加大，電流值會趨於飽和狀態，就是所謂的臨界電壓與飽和電流 (Saturation Current)，此時電晶體操作在飽和區 (Saturation Region)，圖 2.2 即是一個傳統p-MOS的電流電壓圖。

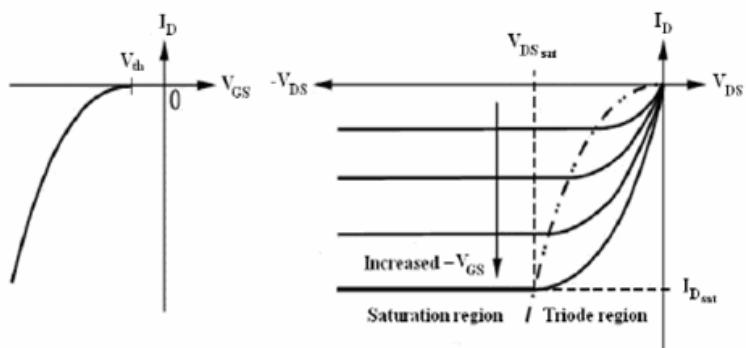


圖 2.2 傳統 P-MOS的電流電壓，左圖為 I_D - V_{GS} ，右圖為在不同的 V_{GS} 下的 I_D - V_{DS} 圖。

而p-MOS在線性區的電流公式如下：

$$I_D = \frac{WC_i}{L} \mu \left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D \quad (2.1)$$

L：通道長度 (channel length)

W：通道寬度 (channel width)

C_i：閘極介電層每單位面積電容 (capacitance per unit area of the insulating layer)

V_T：臨界電壓 (threshold voltage)

μ：場效載子遷移率 (field-effect mobility)

而當滿足 V_G-V_T=V_D 時，電晶體會進入飽和區，我們將 V_G-V_T=V_D 帶入式子 (2.1)，可以得到在飽和區的電流公式如下：

$$I_D = \frac{WC_i}{2L} \mu (V_G - V_T)^2 \quad (2.2)$$

在飽和區中的場效載子遷移率可以利用 $|I_D|^{1/2}$ 對閘極電為 V_G 做圖，從圖中的斜率值可求得電晶體在飽和區中的 μ 值，從截距可求得 V_T。

接著介紹薄膜電晶體 (Thin Film Transistors)，薄膜電晶體其特性跟傳統場效應電晶體很像，電流模型也相似。由於薄膜電晶體主要是用來驅動平面顯示器，所以通常是以薄膜的形式製作於玻璃基板之上。如果我們的主動層選用傳統的半導體材料，這就是一般的無機薄膜電晶體。

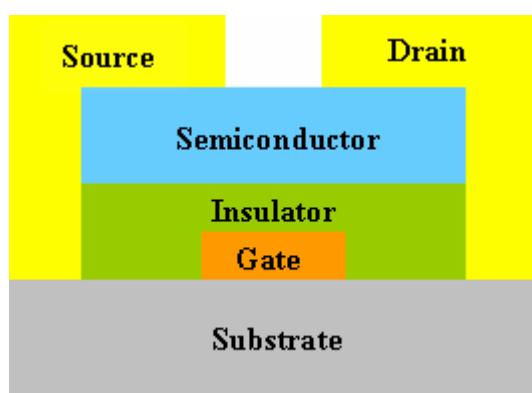


圖 2.3 無機薄膜電晶體的剖面圖，半導體材料使用最多的為 poly-Si 和 a-Si : H。

通常TFTs使用的材料為低溫製作之Low-temperature poly-Si和a-Si : H，其主要應用於主動式矩陣液晶平面顯示器的開關電路，由圖 2.3 中的構造我們可以看出與傳統MOSFET構造不同點有：（1）基底方面我們可以選用不同的材料，像是玻璃、塑膠等等的材料，（2）源極和汲極是直接以歐姆接觸方式與主動層連接。而就真正的製程步驟來討論，傳統FET的基底需要摻雜3A族或5A族材料，以增加其導電性，如果摻雜方式選用熱擴散(Thermal Diffusion) ， 其製程溫度會高達900°C，而選用離子佈值 (Ion Implantation) 的技術，則製作成本會相對的提高，還有更需要多道光罩 (Mask) 以黃光微影 (Photolithography) 方式來定義我們的圖案 (Pattern) ；相對而言TFT則只需要少數幾道光罩，製作步驟簡單許多，且製作溫度可控制在300°C以下，因為低溫製程，使得基底可以有更多種選擇，譬如是富有彈性但卻不耐熱的塑膠基板。比較兩者起來，TFT有著許多的優點，不過也有其缺點，像是其載子移動率不高，就傳統FET常用的基底材料Si來說，本質Si的 μ_n 通常高達 $1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ， μ_p 也有 $480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，經過適當的摻雜可達更高，而TFT所使用的主動層Poly-Si與a-Si : H載子移動率，前者可達 $200-300 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，後者只可達約 $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 左右，這也限制TFT在元件上的應用，所以目前TFT多用來當作平面顯示器的開關電路。

在1970 年代有學者提出使用有機材料來取代傳統無機半導體材料的概念，如果我們將TFT 的半導體主動層，以有機材料來取代，我們稱之為有機薄膜電晶體(Organic Thin Film Transistors，OTFTs)。第一個有機薄膜電晶體則在1983年由F. Ebisawa等人將polyacetylene半導體高分子層直接成長在polysiloxane絕緣層上（如圖 2.4），而形成第一個有機電晶體，不過其載子遷移率只有 $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [2]。

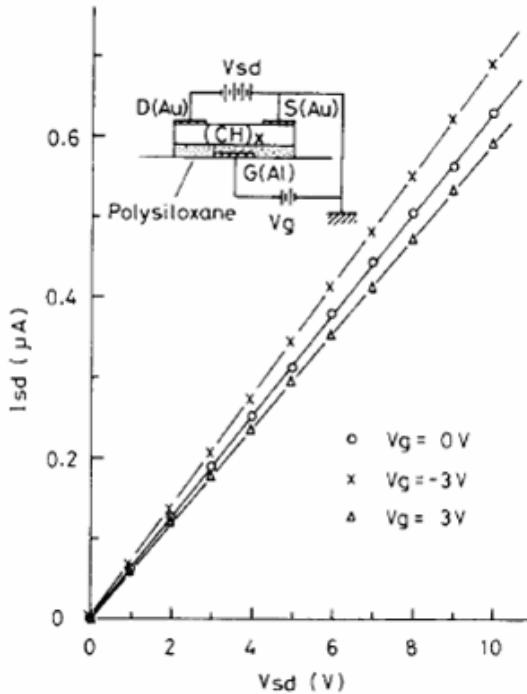


圖 2.4 1983年第一顆有機薄膜電晶體。[2]

到了1990年F. Garnier等人利用sexithiophene等共軛寡分子做主動層，其載子遷移率可達 $10^{-1}\text{cm}^2/\text{Vs}$ [3]，這個mobility已經可與 a-Si:H相比擬，到了2005年SID研討會M. P. Hong等人合成新的絕緣層S4 (polysilicon-acrylate with titanium complex)，主動層用pentacene，電極使用金的top-contact OTFT，其載子遷移率已經可高達 $7\text{cm}^2/\text{Vs}$ （這是目前文獻上最高的），如圖2.5。

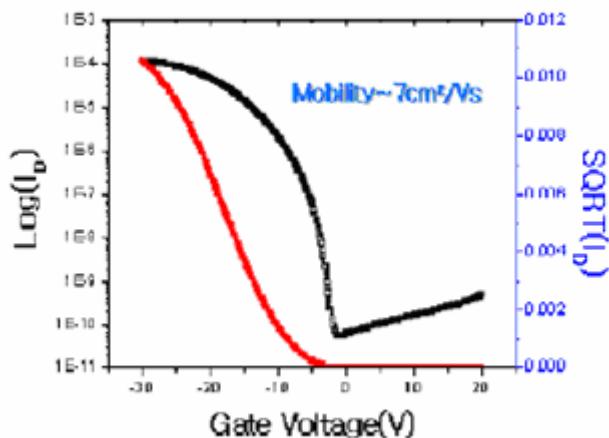


圖 2.5 目前最高Mobility OTFT。

從各種材料的合成，尋找具有更高載子遷移率的材料，更佳絕緣特性的絕緣層，到改善電晶體結構和不同的製程方式等，逐漸將有機薄膜電晶體的效能提升，其中絕緣層合成要朝高阻值、高穩定性（減少水氣和氧氣的影響）、小的漏電流、小的表面粗糙度、載子捕捉缺陷少等方向發展。而使用有機材料的優點，除了上面提到的低溫製程、製作步驟簡單、成本低廉外，有機材料比無機半導體材料更易於製作在大面積可撓式基板上。當然有機材料也有相當嚴重的缺點，第一：其載子移動率通常不到 $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，比起使用 a-Si:H 作為主動層的薄膜電晶體更低，第二：操作與起始電壓偏高，會造成功率消耗過大，第三： I_{on}/I_{off} 比值不高，會影響的訊號傳遞的正確性，第四：操作在累增模式而不是反轉模式，這會使得 OTFTs 與其他元件的整合困難度增高，以上四個為 OTFTs 比較需要改進的缺點。

依照沈積有機材料的先後，可以分為兩個構造：頂電極（Top Contact）與底電極（Bottom Contact）（圖 2.6）。

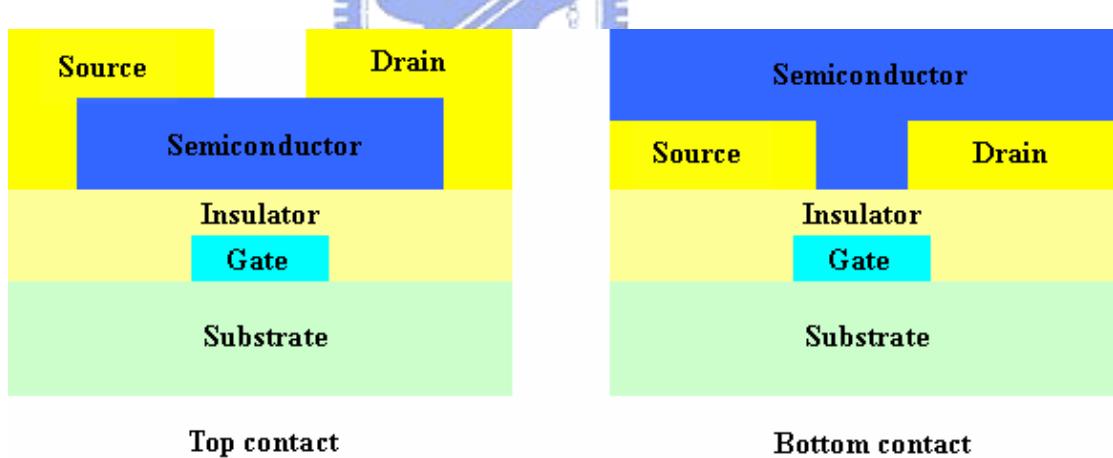


圖 2.6 有機薄膜電晶體結構圖，先鍍有機材料後鍍電極，稱為 Top Contact，相反則稱為 Bottom Contact。

如果我們在製作元件時先成長電極然後才將有機層沈積在電極上，我們稱此種構造為 bottom contact，而 bottom contact 與 top contact 有何差異性呢？一般來說 top contact 因為已經先長了有機材料，所以很難使用微影方式

來定義圖案，因此大多是利用 shadow mask來定義我們的通道長度，不過使用 shadow的方式很難達到小線寬（極限為40 μm ），所以如果我們希望元件尺寸做小的話，則需要使用 bottom contact，因為 bottom contact的有機層是最後才成長的，所以我們可以利用微影方式定義我們電極的圖案，再將有機層沈積上去。不過一般來說 top contact的元件特性會比 bottom contact好，因為 bottom contact在靠近電極附近的 pentacene其沉積的介面不好，因而影響pentacene的成長，所以接面電阻會較大，因而影響元件特性。

近年來有人研究[4]出利用接觸轉印 (contact printing) 的方式來製作出小通道長度的top contact OTFTs，他們先在poly (dimethyl siloxane) (PDMS) 上面製作出圖形(上面的圖形的線寬可小至10 μm 以下)，接著沈積fluorinated ethylene propylene (FEP) 在PDMS的模型上作為PDMS和金屬間的緩衝層，接著再沈積所要鍍的金屬於FEP上面，之後再將整個PDMS的模型壓印在元件上面，接著在經由加熱，就可有效將PDMS模型和金屬電極分離完成我們的元件，如圖2.7所示，利用此種方法可以製作出小通道長度的top contact元件，既保有top contact較好的元件特性，又能達到小線寬的目的。

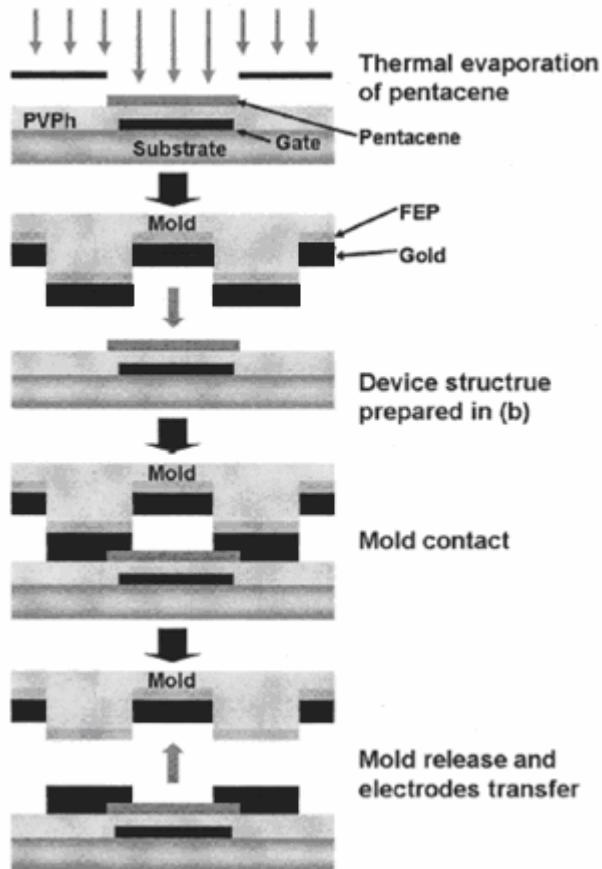


圖 2.7 用 rigiflex lithography 來形成電極。[4]

1.2.2. 有機半導體材料簡介：

一般來說，較常應用於有機半導體的材料可分為：高分子（polymer）和小分子兩大類，如圖 2.7。

1.2.2.1 高分子（polymer）：

最早將有機材料應用於薄膜電晶體的製程，是利用旋塗方式來製作高分子半導體層，例如polythiophene[5-9]、polyacetylene[10、11]等。而為了增加高分子的溶解度，可以在高分子主鏈上加入取代基，例如：poly(3-alkyl thiophene)；亦可先將前驅物(precursor)旋塗在基板上，而後進行再聚合的方式，例如polythienylenevinylene[12]。

1.2.2.2 小分子：

在小分子的研究中，過去以thiophene 最受到大家的重視 [13-19]，也研究的最多，從3T(terthiophene)到8T(octithiophene)，而其中以4T(quaterthiophene)與6T(sexithiophene)及它們末端 α ， β -二己基衍生物的表現最好。但由於這類型分子的溶解度並不佳，因此在製程上多採用真空蒸鍍。

近年來，應用於有機薄膜電晶體(Organic Thin Film Transistor， OTFT)的小分子新材料陸續被發表，如最受歡迎的pentacene[20-24]、碳60(C₆₀)[25、26]、苯二甲藍金屬錯合物(ScPc₂、LuPc₂、TmPc₂、NiPc、ZnPc 等)[27-29]以及TCNQ(tetracyanoquinodimethane)[30、31]等。



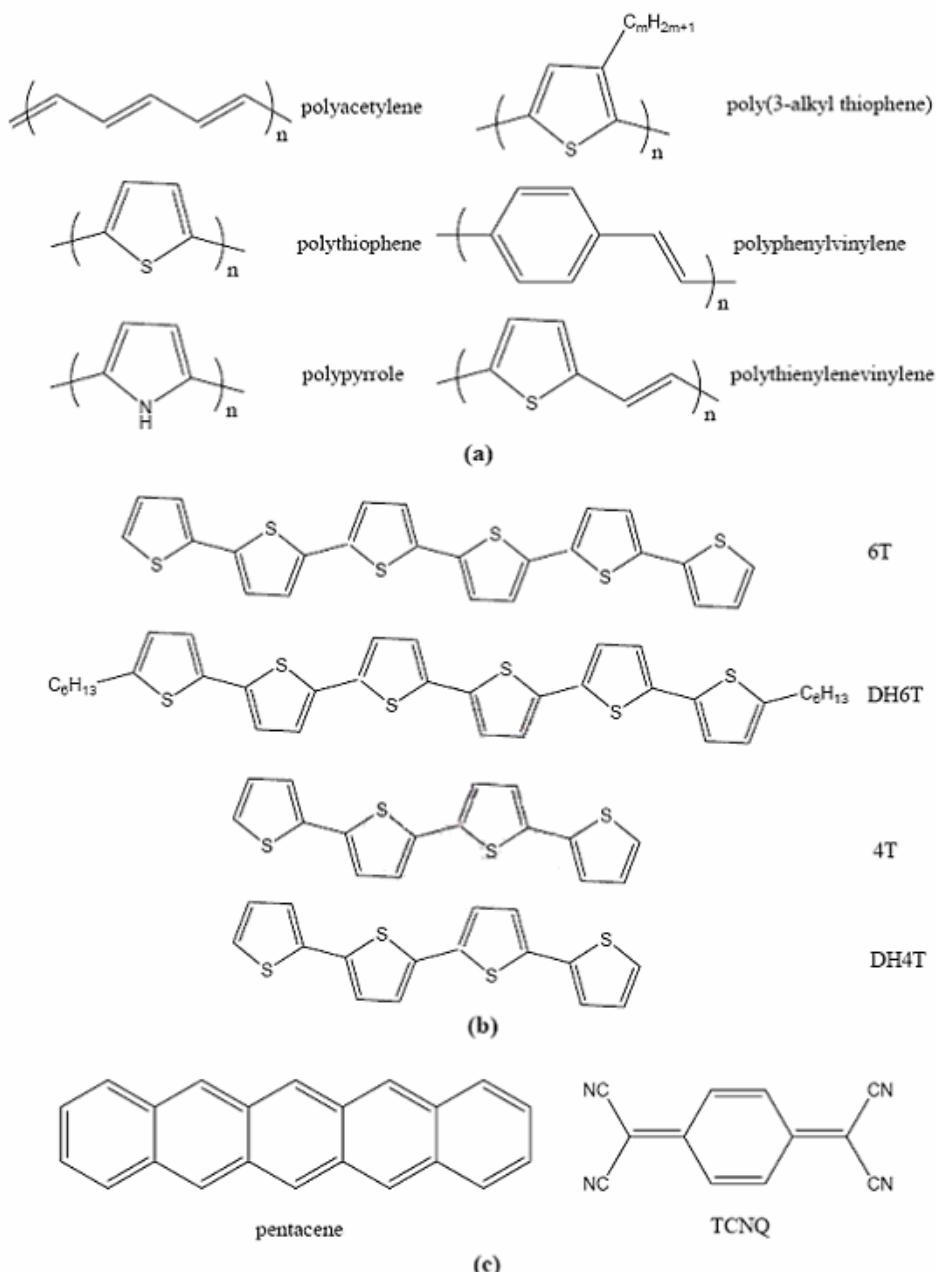


圖 2.8 有機半導體材料 (a) 高分子 (b) thiophene (c) 小分子。[13-24,30,31]

2.2.3 Pentacene 材料之簡介：

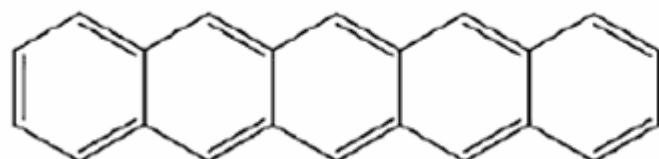


圖 2.9 Pentacene 的化學結構圖，有五個苯環所組成，所以又稱五環素。

Pentacene為小分子有機材料，其分子結構如圖 2.9 所示。pentacene基本上是一種p型有機材料，化學式為 $C_{22}H_{14}$ ，密度 1.2g/cm^3 ，分子量為278.35，熔點大約在 300°C 左右[32]，外觀為深藍色的粉末，必須保存在封閉乾燥陰暗的空間下。

對於 pentacene材料而言，其 x-ray圖譜如圖2.10有 $(001)'$ 、 $(002)'$ 、 $(003)'$ 等三個繞射峰，分別位於 5.83° 、 11.7° 、 17.6° 的主要繞射峰，這是屬於 thin film phase的結晶相；相對於 $(001)'$ 、 $(002)'$ 、 $(003)'$ 右邊又有 (001) 、 (002) 、 (003) 的peak，這是屬於single crystal phase，Thin film phase為 pentacene傾向垂直於基板表面排列，而 single crystal phase相較之下則較為傾斜。

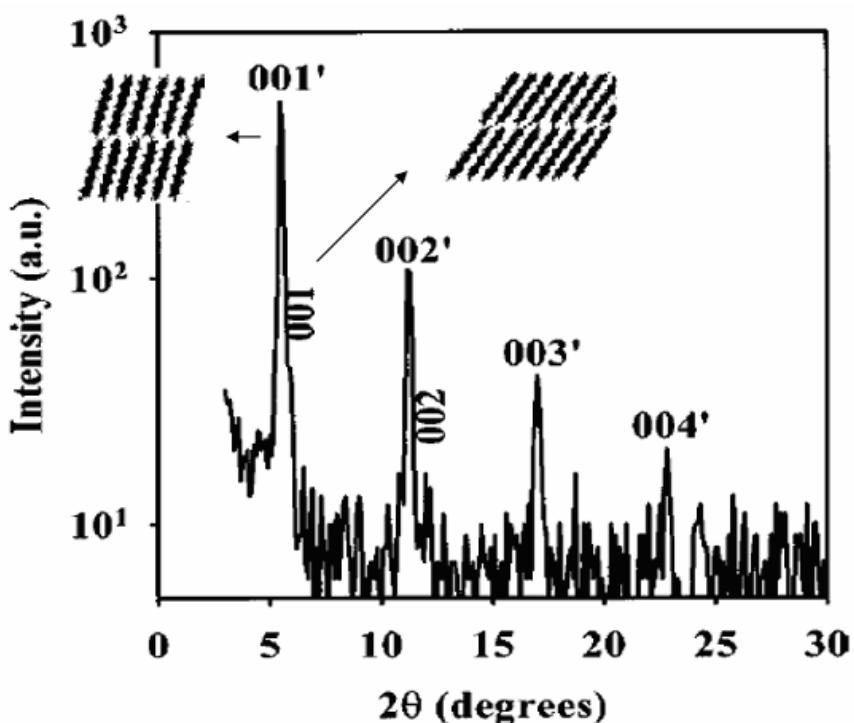


圖 2.10 pentacene之 X-ray相關 peak。

1.2.3 有機材料的導電機制：

在有機材料中分子與分子間的作用力是以微弱的凡德瓦力（Van Der Walls Forces）束縛在一起，這與一般無機半導體中分子間的共價鍵是不同

的，所以有機材料的導電機制與半導體材料有很大的差別。

以有機材料的傳導機制而言，我們先了解有機材料中電子的分布有局部狀態（Localized States）和非局部狀態（Delocalized States）的分別。局部狀態的定義是指電子只隸屬於某一特定的原子，反之則為非局部狀態。以 π 鍵為例， π 鍵是原子之間分享電子的一種鍵結，如果我們可以從原子和原子之間的 π 鍵找出額外之電子，而並不是跟鍵結有直接關係的電子，我們就可以稱此電子處於非局部狀態，所以一樣是 π 鍵也是會有局部化和非局化兩類，圖 2.11 顯示在苯環分子中局部之 π 鍵電子及非局部之 π 鍵電子分佈的情形。

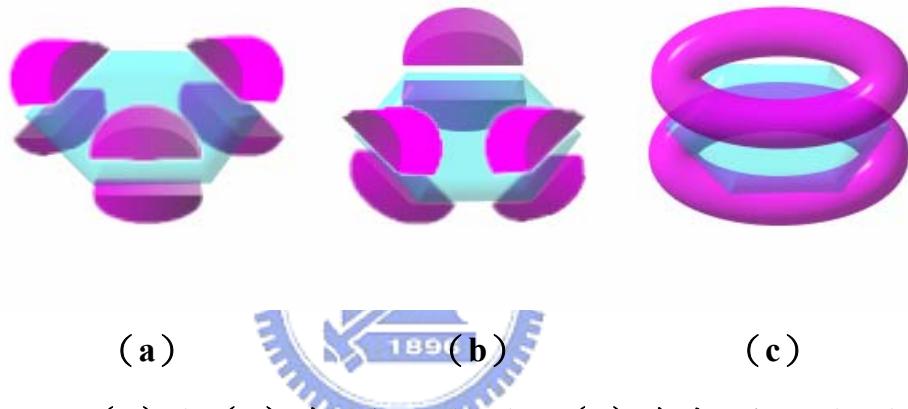


圖 2.11 (a) 和 (b) 為局部化的 π 鍵，(c) 為非局部化的 π 鍵。[33]

而一般之半導體材料都屬於非局部化的狀態，所以電子電洞可以隨意的移動，電子移動率相對受限比較小，所以移動率相當的不錯，而有機材料的電子電洞是處於局部狀態，所以電子電洞傳導受到之限制相對的也比較大，所以有機材料電子移動率一般而言並不會太高。

另外，分子軌域的能階亦是我們要瞭解有機材料的重要性質，在這邊我們簡單介紹LUMO--最低分子未佔據軌域（Lowest Unoccupied Molecular Orbital），以及HOMO- 最高分子佔據軌域（Highest Occupied Molecular Orbital），LUMO 類似於導帶（Conduction Band），HOMO 類似於價帶（Valence Band）。LUMO 跟HOMO 的能量差就是所謂的LUMO-HOMO間

隙，及這個能量就是我們在分子中要激發一個載子的最小能量。

載子在有機材料中的傳導目前沒有一個確實的機制，比較常被採用的有二種：Hopping Model[34-39] 與 MTR (Multiple Trapping and Release) Model[35]。有機材料裡面載子的狀態是屬於前面有提及的局部狀態，因此載子本身無法任意的移動，但是又沒有確切證據證明載子的傳導方式，而 Hopping Model 與 MTR Model 分別著眼在載子的傳導模式，延伸出來的二個 Model。

1.2.3.1 Hopping :

在有機材料中，分子跟分子間是靠著微弱的凡德瓦力連接在一起，在共軛有機材料中電子是處於非局部狀態，Hopping model 將材料中的載子視為是以跳躍(Hopping)的方式在傳遞（見圖 2.12），這也是限制載子移動率的主要原因，而聲子會幫助載子的Hopping，所以載子移動率會隨著溫度而增加，就是因為聲子的關係。

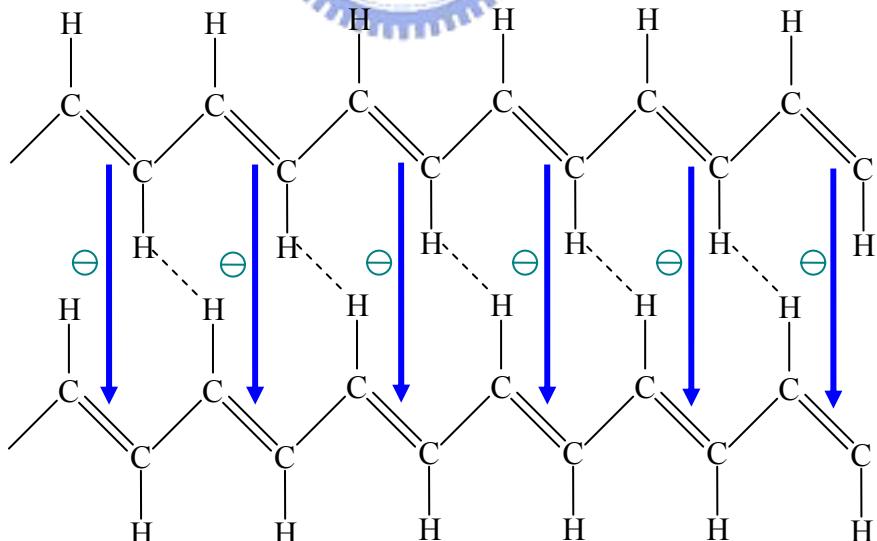


圖 2.12 Charge Hopping

1.2.3.2 Multiple Trapping and Release (MTR) :

在MTR model裡面，學者相信會有一條窄小的非局部之能帶，而此能帶的產生是跟高密度的局部能階有相關連，其功用就像是缺陷（Traps）。當它們傳送經過非局部能階時，電荷載子會跟局部能階互相影響藉由捕捉和熱釋放的方式。通常我們會有以下的假設：第一，當載子傳達到一個缺陷時會有機率接近為1的機會被捕捉住，第二，捕捉住的載子釋放是由一個熱活化的過程（Thermally Activated Process）所控制。而所造成的漂移率（Drift Mobility， μ_D ）會跟非局部能階的載子移動率（ μ_0 ）有關，可以表示成下面的方程式：

$$\mu_D = \mu_0 \alpha \exp\left(-\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.3)$$

E_T 為缺陷能階，如果發生在單一個缺陷能階， E_T 缺陷能階和非局部化能帶的邊緣距離有關，而 α 是在非局化邊緣有效之狀態密度和缺陷濃度的比率。MTR model目前最常被使用來計算在a-Si裡面的電荷傳導。



1.2.4 有機薄膜電晶體的載子移動率：

由於有機材料中載子是處於局部化的狀態，電子與電洞不能夠隨意移動，藉由Hooping 或是MTR model 我們可以大概知道，在有機材料中電子與電洞的傳導，需要獲得足夠的能量，雖然獲得足夠的能量但是未必就能夠成功傳導，所以有機薄膜電晶體的載子移動率並不高，這也會限制了其應用。

近幾年由於許多學者盡力的研究，累積出來的經驗與製作技術不斷的改進，有機材料的載子移動率已經有相當大的改進（見圖2.13），

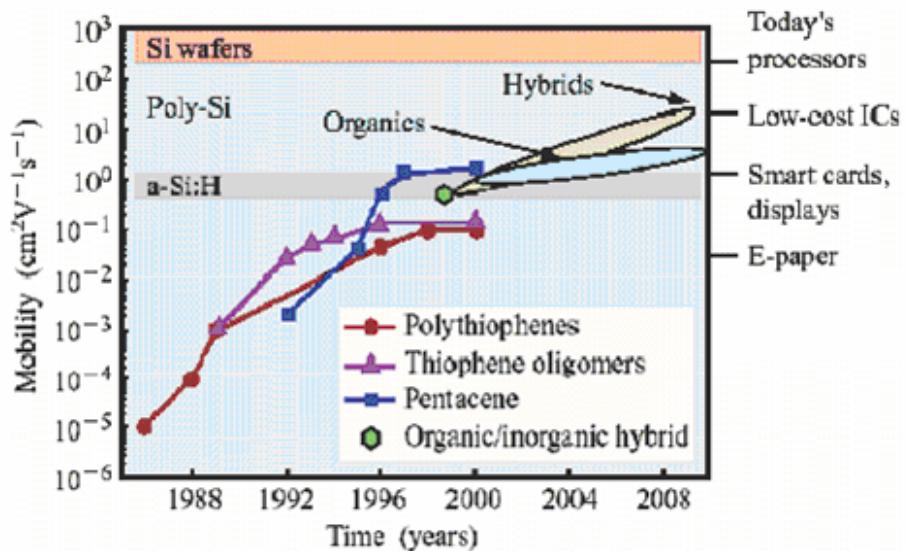


圖 2.13 有機材料與Si材料的載子遷移率比較圖。[40]

由圖2.13 中可以清楚看到有機材料的載子移動率在過去幾年內有長足之進步，我們可以觀察pentacene 這個材料，它所做出來的元件載子移動率已經可以跟a-Si : H 相提並論，將來隨著技術的進步，學者預測在2008 年後，其載子移動率可以超越a-Si : H 與Poly-Si 同一等級，這也會提高OTFTs 的應用性。

1.2.5 有機薄膜電晶體的操作模式：

一般傳統的場效應電晶體操作是在反轉增強模式（Inversion Enhancement Mode），而有機薄膜電晶體則通常操作於累積增強模式（Accumulation Enhancement Mode），在accumulation mode中有最大的電流稱之為”on state”，在depletion mode中有最小的電流稱之為”off state”，而最大電流和最小電流比我們稱之on / off ratio。（如圖2.14）

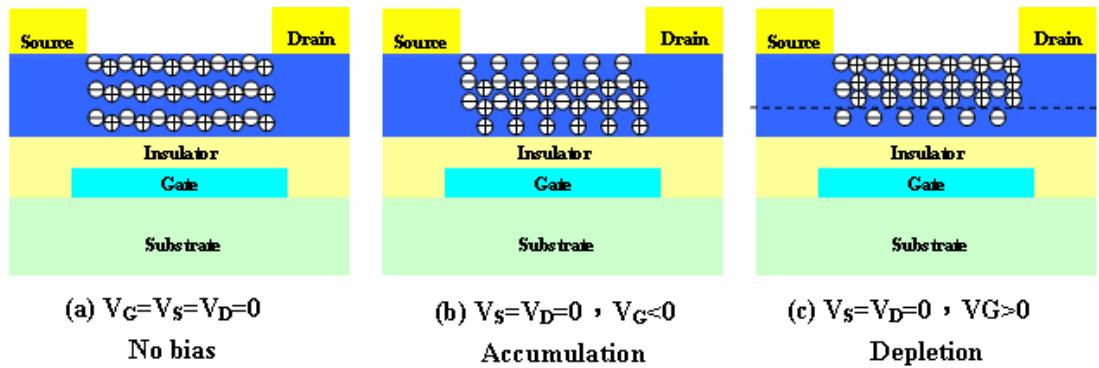


圖 2.14 P-type OTFT 操作模式示意圖。

以有機材料來取代傳統的半導體主動層，其基本原理並沒有太大的差異，本實驗所採用的pentacene為p型材料，所以我們在閘極會外加一個負的偏壓，吸引有機材料中的正電荷，當累積到足夠的電荷後會形成通道，此一電壓就是所謂的起始電壓（Threshold Voltage），比較不同的是由於有機材料中的載子是處於局部化狀態，載子並不可隨意移動，需要獲得足夠的能量，載子才能夠藉由Hopping或是MTR model 所提到的方式傳導，也因此起使電壓跟一般半導體比較起來會偏高，載子移動率也比較偏低。而有機薄膜電晶體在元件中的應用，是作為有機光激發二極體的開關電路，所以載子移動率並不需要像一般半導體，應用在運算單元時所需要的高速，因此只要能夠有效提升有機薄膜電晶體的載子移動率，與現在用來當作薄膜電晶體的主動層材料a-Si:H 相當，那麼有機薄膜電晶體將會比一般的半導體薄膜電晶體有競爭力。

1.2.6 接面電阻：

對元件來說，載子於通路中的電阻有兩大來源，即金屬與半導體的接面電阻（contact resistance）與半導體內的通道電阻（channel resistance），其中接面電阻方面，理想情況下，我們希望金屬與有機體可以形成歐姆接觸（Ohmic Contact），因為歐姆接觸的載子所需克服的能障較小。我們先看一下金屬與半導體接面能帶的關係如下所示：

金屬-半導體接面 Φ_S 與 Φ_M 接觸形式：

金屬-n 型半導體 $\Phi_S < \Phi_M$	蕭基 (Schottky)
金屬-n 型半導體 $\Phi_S > \Phi_M$	歐姆
金屬-p 型半導體 $\Phi_S < \Phi_M$	歐姆
金屬-p 型半導體 $\Phi_S > \Phi_M$	蕭基

其中 Φ_S ：半導體的功函數， Φ_M ：金屬的功函數

近年來有越來越多的文獻指出，OTFT的特性受到源極/汲極金屬與有機半導體的接面影響甚巨，這是由於金屬/有機半導體接面大多為蕭基接面，因而有較大的接面電阻[41,42]。且近年來已有研究顯示，OTFT的接面電阻和半導體的通道電阻已經有相同的數量級[41]，因此對於短通道 (short channel) 元件（通道長度 $L < 10\mu m$ ）來說，接面電阻更是有可能大於通道電阻，如圖2.15所示，因此當OTFT元件越做越小時，金屬/有機半導體的接面特性將會大大的影響元件特性，因此接面電阻的研究是很重要的。

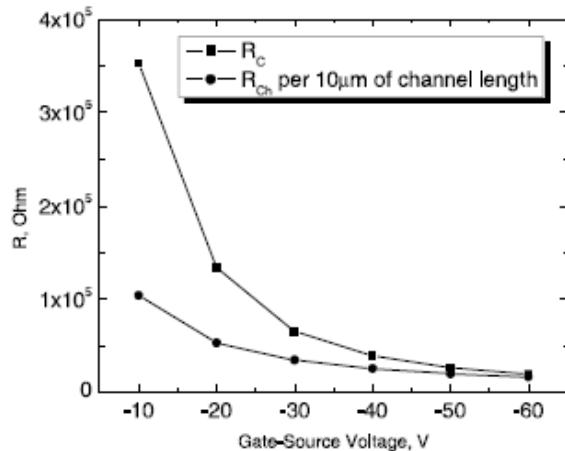


圖 2.15 以pentacene為半導體材料的OTFT，其接面電阻 (R_c) 與通道電阻 (R_{ch}) 與閘極電位的關係。[41]

一般來說接面電阻決定於金屬的功函數和有機半導體HOMO的能階差，如果能階差越大則接面電阻越大，大部分有機半導體的傳輸是屬於p-type的，如果選擇高功函數的金屬則會有較小的能階差，因而有較佳的元件特

性，以pentacene為例大部分會選擇金等高功函數的金屬。圖 2.16 即是金與pentacene接面的能帶圖[43]。

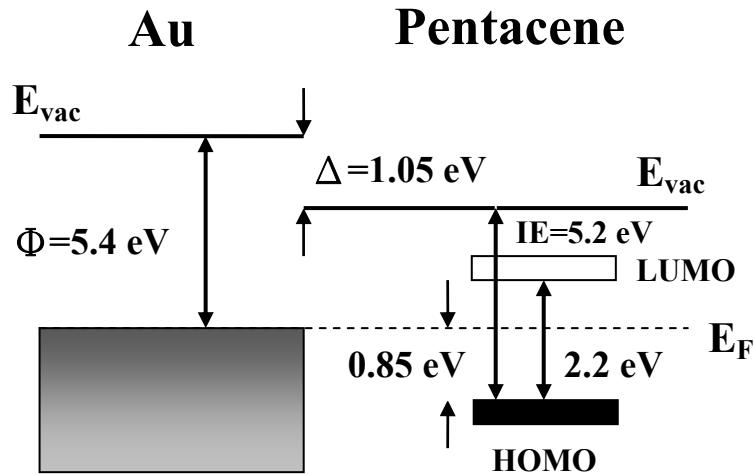


圖 2.16 金與 pentacene的接面能帶圖。（pentacene on Au）[43]

由圖2.16中我們可以知道，pentacene的HOMO距離真空的能量（ E_{vac} ）為5.2eV 也就是它的功函數，LUMO距離 E_{vac} 為3eV，而金的功函數為5.4eV， $\Phi_s(5.2\text{eV}) < \Phi_m(5.4\text{eV})$ ，對照上面的表格我們可以清楚知道，Au-Pentacene的接面會是歐姆接觸，而這也是我們希望的接觸模式。

理論上載子由金注入到pentacene應該不會有什麼能位障，不過由於金屬和有機半導體層介面會有interface-dipole，因而造成金的真空能階上升，pentacene的真空能階下降，其interface-dipole造成1.05eV的能階差，再扣掉原先金功函數高於pentacene的HOMO的0.2eV，因此載子注入到pentacene會有0.85eV的位能障（pentacene on Au），不過如果我們選用有機高分子如PEDT/PSS當電極，則因為有機高分子比起金屬有比較少的自由電子，因此interface-dipole的效應會比較低[43]，由圖2.17可看到由interface-dipole所造成的能階差只有0.1eV，比起金電極的1.05eV小了約一個數量級，所以載子從PEDT/PSS注入到pentacene的位能障只有0.25eV，所以理論上載子從PEDT/PSS注入到pentacene的接面電阻會比金小，縱使PEDT/PSS的功函數比金還低，因此載子注入的位能障除了看金屬的功函數和pentacene的HOMO的

能階差外，還要考慮interface-dipole的效應。

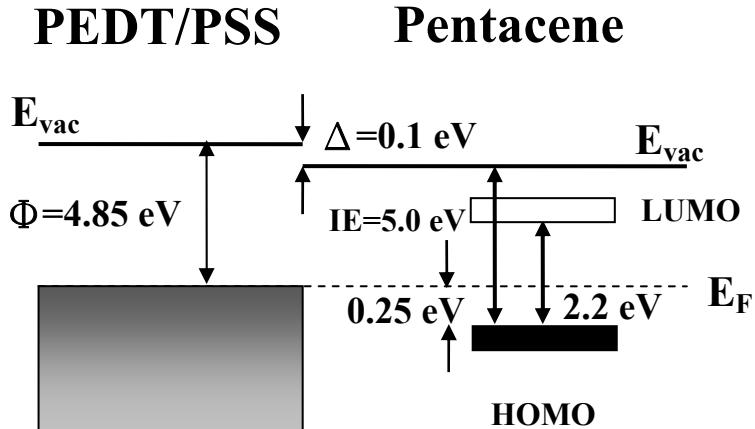


圖 2.17 PEDT/PSS與pentacene的接面能帶圖。（pentacene on PEDT/PSS）

[43]

一般要減少接面電阻的方法大多都是在金屬和有機半導體層之間多加一層物質，這層物質的功用就是為了降低interface-dipole的產生，這個觀念源自於有機發光二極體（Organic light-emitting diodes, OLEDs）電子注入層或電洞注入層，如LiF就已經被證實可以有效增加電子注入的效率[44]，而CuPC為電洞注入層材料可以有效增加電洞注入的效率，如果將電子或電洞注入層材料拿來應用於OTFTs則將可降低接面電阻。除了使用有機分子來降低接面電阻外，最近還有人使用氧化金屬[45]做修飾金屬層亦可以達到降低接面電阻的目的。

1.2.7 元件透明度：

一般討論元件透明度是從絕緣層、主動層和電極三方面的吸收去看，因為這三層疊加決定了元件透明度。所謂透明是針對人眼而言，因此我們主要探討在可見光波段400nm-700nm，而波長400nm-700nm所對應的能量為3.1eV-1.8eV，因此當我們的材料的能隙（energy gap）大於3.1eV的話，則在可見光波段就不吸收。在探討元件透明度的文獻中，無機TFT方面已經有人

可以做到穿透度達80%[46-48]以上，一般無機TFT在絕緣層方面多選用 Al_2O_3 和ATO(superlattice of Al_2O_3 and TiO_2)[46-48]，主動層多為 ZnO [46,47]和ZTO (amorphous semiconductor zinc tin oxide) [48]，其中 ZnO 的能隙為3.3eV大於波長400nm所需能隙3.1eV，其穿透率在可見光波段可達80%以上；而電極方面則大多數是使用ITO以及 NiOx ，其中ITO的穿透率可達85%以上而 NiOx 的能隙為3.8eV其穿透率約為70%。雖然在無機TFT方面其穿透率可達80%以上，不過OTFT有其特有的優點，如成本低、製作大面積容易等，因此透明OTFT亦有其發展性，而一般在討論OTFT透明度的文獻中，目前只看到有韓國Yonsei大學Seongil Im教授團隊有在做這方面研究[49-51]，他們因製作出的 NiOx 電極穿透度不佳，所以其整體元件穿透度大概只有40%，如果製作出更佳穿透度的 NiOx 電極或使用穿透度更好的ITO則整體穿透度將有機會達到70%。

一般來說使用ITO電極的OTFT元件，因為其接面電阻較大，因而限制了元件的特性，所以如何能應用ITO電極並有一個好的元件特性，將是本實驗研究的目標。



1.2.8 各項重要參數：

要將一個有機薄膜電晶體廣泛的應用到市場上，所需要的是大的載子遷移率 (mobility)，低的起始電壓 (threshold voltage)，以及大的 I_{on} / I_{off} 比。

1.2.8.1 輽子遷移率 (mobility)：

在外加電場的影響下，電子或電洞在導體或半導體中傳輸的能力 (速度)，即是載子遷移率(mobility)。一般有機薄膜電晶體可以用標準的p型場效電晶體公式來描述，理論上取得mobility值的方式有兩種：

(1)在低汲極電壓 V_D 時(線性區)，汲極電流 I_D 是隨著 V_D 呈線性的增加，其電流值可用式2.4 來表示：

$$I_D = \frac{WC_i}{L} \mu \left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D \quad (2.4)$$

若將上式 I_D 對 V_G 微分，便可得到轉導值 g_m (transconductance)，即式

$$g_m = \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right)_{V_D=const.} = \frac{WC_i}{L} \mu V_D \quad (2.5)$$

經由量測加一低汲極電壓的 I_D - V_G 實驗數據圖，取其斜率，其斜率即為上式之轉導值，而後再將各項實驗數據值和已知參數值代入，即可計算出場效載子遷移率大小。

(2) 取得在不同 V_G 值下所量測到 I_D - V_D 圖的線性區斜率(即為 $\left(\frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right)_{V_G=const.}$) 以

這些斜率值對 V_G 作圖，再求得此圖的斜率，(即為 $\left(\frac{\partial \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right)_{V_G=const.}}{\partial V_G} \right)_{V_D=const.}$)，得

到的數值等於 $(WCi/L)\mu$ ，再將各項實驗數據值和將已知參數值代入，即可計算出場效載子遷移率大小。

(3) 當 V_D 大於 V_T 時，在聚積層的汲極端會產生夾止的現象(飽和區)，此時電流趨於飽和，可以式2.6 表示：

$$I_D = \frac{WC_i}{2L} \mu (V_G - V_T)^2 \quad (2.6)$$

所以取 $|I_D|^{\frac{1}{2}}$ 對 V_G 圖的斜率(即為 $\sqrt{\frac{WC_i}{2L} \mu}$)，將各項實驗數據值和已知參數值代入，即可得到場效載子遷移率值。

1.2.8.2 Threshold voltage (V_T) :

起始電壓直接關係到元件操作時所需的電源供應最低要求，一般認為這是和主動層與介電層介面間的缺陷電荷密度有關，載子在傳輸時容易被缺陷所捕獲，此時需要一個較大的電壓(V_G)來將其釋放(或填滿)，所以說有較大

的缺陷電荷密度，就必須有較大的起始電壓[52]。

理論上有幾種得到臨界電壓的方式：

(1) 當電晶體操作於線性區時，對 I_D - V_G 圖形作微分，便可得到 g_m 圖形，在 I_D - V_G 圖中，在 g_m 最大值時的 V_G 作切線，找出 $y=0$ 相交，便可推出交點 $V_G=V_T+V_D/2$ 。

$$I_D = \frac{WC_i}{L} \mu \left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D$$

$$g_m = \left(\frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right)_{V_D=const.} = \frac{WC_i}{L} \mu V_D$$

(2)當電晶體操作在飽和區(saturation region)時，電流公式為式2.6，對其開根號，即成為式2.7，此時可發現 $I_D^{1/2}$ 跟 V_G 交點即是臨界電壓。

$$\sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{WC_i}{2L} \mu (V_G - V_T)} \quad (2.7)$$



1.2.8.3 I_{on}/I_{off} 比：

在accumulation mode中，有高濃度的載子累積在元件通道，造成有較小的通道電阻，因而有最大的電流稱之為”on state”；而在depletion mode中，通道附近的載子被排開形成空乏區，造成有較大的通道電阻，因而有最小的電流稱之為”off state”，而最大電流和最小電流比我們稱之為on / off ratio。

1.2.8.4 次臨界擺幅 (Subthreshold swing (s.s.)) :

次臨界擺幅的意義為，元件在形成通道時，元件打開 (turn on) 的速度，我們希望元件的打開的速度越快越好，也就是說我們加一點點偏壓就大大的提高輸出電流，我們可由下面式子得到：

$$s.s. = \left(\frac{\partial(\log I_D)}{\partial V_G} \right)_{V_D=const.} \quad (2.8) \text{ , 當 } V_G > V_T \text{ (P-type)}$$

1.2.8.5 接面電阻 (contact resistance) :

對整體元件來說，載子於通路中的電阻有兩大來源，及金屬與半導體接面電阻 (contact resistance) 和半導體的通路電阻 (channel resistance) ，而 TFT的特性受到源/汲極金屬與有機半導體的接面影響甚巨，這是由於金屬/有機半導體接面多半為蕭基接面 (Schottky contact) ，而有較大的接面電阻 [41、42]，我們藉由轉換線方法 (Transfer line method) :

$$R_{on} = \left(\frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} \right)_{V_{DS} \rightarrow 0}^{V_G = \text{const.}} = R_{ch} + R_C = \frac{L}{W\mu_i C_i (V_G - V_T)} + R_C \quad (2.9)$$

μ_i : 本質 (intrinsic) 輽子遷移率

V_T : 臨界電壓

R_C : 接面電阻

R_{ON} : 元件的電阻

R_{ch} : 通道電阻

由式子可以看到，取通道長度為0的時候，即可萃取出接面電阻 R_C 如圖2.17。

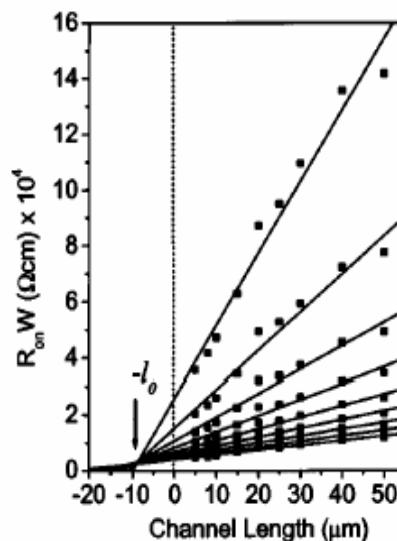


圖 2.18 Transfer line method。