

第二章 文獻與理論回顧

2.1 聚亞醯胺介紹

2.1-1 聚亞醯胺簡介

1955 年美國杜邦(Du pont)公司的 Edward 與 Robinson 發展出了由脂肪族二胺與芳香族二甲酯融熔聚縮合而得的脂肪族聚亞醯胺，主要針對耐高溫基材之需求而研究。聚亞醯胺因其分子具有苯環和雜環結構而增加其耐熱性而備受重視。聚亞醯胺(PI)是一種藉由二段式合成的高分子材料，可藉由預先聚合成溶液狀的 PAA 來保存及加工，待需應用於元件時，再藉由加熱或化學觸媒的方式脫水，得到聚亞醯胺。而這種易保存及易加工的特性，讓聚亞醯胺在高科技產業中，有著重要的地位。[19]

1959 年由 Sroog、Endrey 以及 Abramo 等人，合成出芳香族聚亞醯胺，並克服脂肪族聚亞醯胺分子量不高的問題，並於 1961 年發展其商業化製程，並正式推出聚亞醯胺之商品，分別為 Kapton (薄膜)、Vespel (塑造)、及 Pyre-ML (電線絕緣體) [20]。經過持續不斷的研究開發後，聚亞醯胺可以依不同需求以適當單體，聚合成不同性質的聚亞醯胺，一般可供選擇的單體有脂肪族及芳香族單體，而芳香族結構因具有較對稱的結構、鍵結能量高之芳香環，故展現出優越的耐熱性、耐化學性、高機械強度及電氣特性，表 2-1 及表 2-2 為一般聚亞醯胺的特性及特點，因此廣泛的被應用在工程塑膠業、電子業、航空業

等方面[21] (如圖 2-1)。

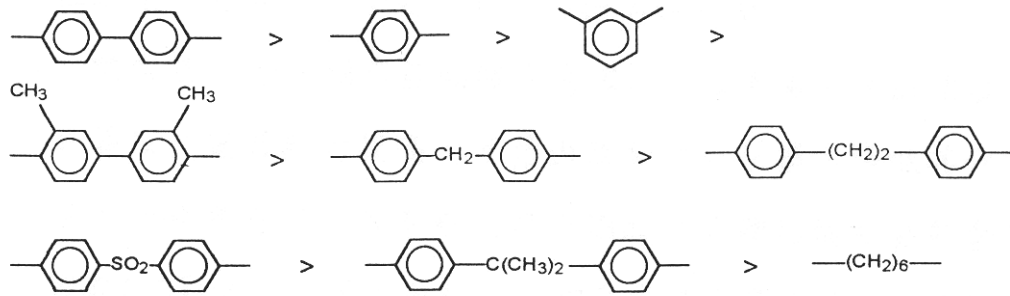
聚亞醯胺在結構上具有芳香性、雜環性，因而具有相當好的耐熱性，圖 2-2 為一般泛用塑膠的加熱變形及連續使用溫度[21]，從圖中可得知，聚亞醯胺在這兩項都居高分子的榜首。這一類高分子中，由於鏈的剛性強，所以沒有明顯的玻璃轉移溫度 (T_g)，通常在熔點或軟化點之前就裂解掉，若在分子鏈中導入非芳香族連接基，會使玻璃轉移溫度 (T_g) 及裂解溫度降低。[22]

2.1-2 聚亞醯胺的結構與特性

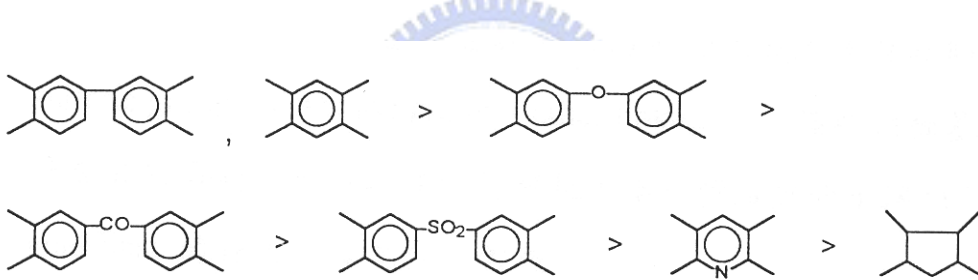
圖 2-3 是典型的聚亞醯胺結構，是杜邦公司應用在IC製程最多 Polyimide 基本結構，PI-2540，2545 系列產品即是本結構的代表。從結構來看，因為聚亞醯胺高分子鏈有芳香環 (aromatic rings)、強的鍵結能、對稱性佳、剛性夠強，正可對應出其熱、化、電、機的特性。由於在IC製程中，聚亞醯胺的應用介面很多，可能包括 Polyimide-SiO₂、Polyimide-Si₃N₄、Polyimide-Metal 等，且各介面有不同的特性，尤其是兩者的具有不同的熱膨脹係數 (coefficient of thermal expansion)，所以因應不同的介面，可能所要挑選的聚亞醯胺結構會有不同。商業化的聚亞醯胺有各種不同結構適用於不同的應用，使用者可以依據自己的應用，例如：厚度、加工方法來選則自己合適聚亞醯胺來使用。[21] 以下對聚亞醯胺的基本性質做一個簡介：[23]

1. 耐熱性：

一般而言，聚亞醯胺算是熱安定性非常高的高分子材料，其高溫下的熱安定性主要由其化學結構決定[24-25]，對於不同的二胺結構而言，其熱安定性依下列次序遞減：



對二酸酐結構而言，隨下列次序遞減：



2. 化學性：

普通聚亞醯胺不會溶解在一般溶劑中，對化學藥品有很強的抵抗性，完全聚亞醯胺化的聚亞醯胺只會被強鹼所侵蝕，如 KOH、NaOH、LiOH、聯胺...等，這種特性造成加工上的困擾。因此有些廠商發展出可溶性聚亞醯胺[26-27]，為了要達到此目的，其分子結構必須具備下列幾個特徵[28]:一是分子主鏈上有大的極性或非極性團;二是主鏈上含有柔軟或非對稱性結構的鍵結，以上特徵無非是希望能有柔曲鍵結，降低分子結構剛性，使聚亞醯胺較容易溶解。而在半導體製程上，

為了元件可靠度的考量，通常會選擇聯胺的有機鹼來當作聚亞醯胺的蝕刻液。

3. 吸水性[29]：

聚亞醯胺在常溫常壓下，有 1-4% 的吸水率，而且其擴散速率相當快。影響吸水率的原因包括分子結構，和亞醯胺化的過程，因此若使用對稱性較高的單體聚合，水分子較不易滲透；而亞醯胺化的過程如果太快，導致有氣泡、孔洞的產生，則會幫助水分子滲透進入其中；此外，如果有溶劑殘留，因為其高極性溶劑，易與水產生氫鍵，提高吸水率。

4. 玻璃轉移溫度[30]：

主要與分子間的鍵結強度有關，單體二胺具有柔軟的鏈段，所形成的聚亞醯胺 T_g 較低，如果聚亞醯胺主鏈上具有高極性的偶極基團者，則會有較高的 T_g ；而對位(Para)的二胺單體較間位 (Meta) 的二胺單體聚亞醯胺 T_g 為高。[31]

5. 介電常數：因聚亞醯胺容易吸水，當其處於高溫環境下，導致介電常數升高。

2.1-3 聚亞醯胺的製備

聚亞醯胺的製備通常由兩階段反應而成 (two steps reaction)。第一階段是合成聚亞醯胺的前驅物 (precursor) - 聚醯胺酸 (polyamic acid, PAA) 此反應是先將二胺溶於極性非質子性溶劑 (polar aprotic solvent) 中，再將二酸酐加入進行反應形成高分子量的聚醯胺酸。第二階段即是將聚醯胺酸再以熱醯胺化 (thermal imidization) 或是化學亞醯胺化 (chemical imidization)，脫水環化生成聚亞醯胺，如圖 2-4 所示。常用的極性非質子性溶劑如 NMP(N-methylpyrrolidone)、DMAc(N,N-dimethylacetamide)、DMF(N,N-dimethylformamide) 及 DMSO(dimethyl sulfoxide)。

而本實驗以熱亞醯胺化為主，熱亞醯胺化是直接利用加熱脫水方式使聚醯胺酸變成聚亞醯胺，其加熱方式大都採用梯度升溫方式，此方式是利用固定升溫速率達到設定溫度後，持溫一段時間在升溫，在持溫，以達到所設定之最高溫度。此方法可以使溶劑停留在系統中的時間增長，以達到提高亞醯胺化的目的[32]。

熱亞醯胺化的反應機制為：[33]將聚亞醯胺直接加熱脫水，其反應如圖 2-5 所示。由於 amine 之共軛鹼的親核性大於 amide，因此進行熱亞醯胺化時 (b) 路徑較可能發生。

而影響聚醯胺酸分子量的因素有：

(1) 單體的當量數比：

二胺與二酸酐官能基數比是影響聚醯胺酸的重要因素。若添加過量二胺，尤其是高鹼性二胺時，會使二胺上的amine group 與聚醯胺酸之酸基產生鹽類，此鹽類會阻止質子化的amine group和二酸酐反應，造成分子量下降，如圖 2-6 所示[34]。此外，若二胺鹼性過低將因親核性不足而無法與二酸酐反應，而理想的二胺 P_{ka} 值在 4.5~6 為佳。相反的，如果加入過量二酸酐時，則因二酸酐的強脫水性使得聚醯胺酸脫水成亞酸胺。而二酸酐本身則水解成為鄰二酸（ortho-dicarboxylic acid），無法再與聚亞醯胺反應，而限制了聚醯胺酸的分子量[35]。如圖 2-7 所示。



(2) 溶劑作用：

在聚合反應中極性溶劑扮演塑化劑的角色，其可增加鏈的柔軟性，使反應物種在環化過程中形成較有利的分子結構，加速閉環反應的速率，進而提高亞醯胺化(imidization)的速率;使用鹼性越高、極性越強的溶劑，形成聚亞醯胺酸的速率越快。常使用的非質子性溶劑如：NMP、DMSO、DMAC、DMF。

(3) 固含量之影響：

研究發現聚醯胺酸之黏度會隨時間增長而降低，此效應對低固體含量之聚醯胺酸溶液更明顯，如圖 2-8 所示[36]。因此聚亞醯胺的固含量越高，其受時間影響的因素就越小，所以固含量至少要大於 10%以

上才較穩定。

(4) 單體加入的順序[37]：

由於溶劑與二酸酐會先生成錯合物，使加入的二胺不易與二酸酐反應，而造成聚醯胺酸分子量降低，因此單體加入的順序是將二胺容於溶劑中，再將二酸酐分批加入。其目的是為使二胺能包圍住二酸酐，以免溶劑與二酸酐結合；因此二酸酐分批加入次數越多，分批加入量越少，反應越佳。

製備高分子量的聚亞醯胺除了受以上影響外，單體的高純度與合成過程中嚴防水氣進入，都有助於聚醯胺酸分子量的提高。

2.2 溶膠-凝膠法應用於複合材料的簡介

2.2-1 溶膠-凝膠法的原理

溶膠-凝膠法，基本上是一種液相的化學反應。其優點是簡單的製程、較低的製程溫度、成分控制精準、均勻、可以生成化學計量比薄膜。而且因反映在溶液中發生，對多種成分能夠均勻混和，所以能夠製備多組成的均於薄膜。但缺點是：昂貴的起始原料、體積會大量收縮、緻密性低和製程時間較長。

溶膠(sol)是指粒徑在1-100nm間的膠體粒子均勻散佈於溶液中形成的溶液，凝膠(gel)則為溶膠中的膠體粒子經過水解與縮和反應後，形成類似果凍的物質。溶凝膠法的製程係將金屬鹽或金屬醇

鹽類的起始物質先溶入醇類的有機溶劑後，進行加熱迴流，生成烷基鍵結的反應中間產物。隨後在進行水解縮合反應調整其流變性，最後塗佈在基材上形成薄膜或其他樣式的反應。而其主要程序包含五個：

[38]

1. 水解與聚縮合反應 (hydrolysis and polycondensation)：

將金屬烷氧化物等起始物與水混合產生水解，在催化劑的催化下進行縮合反應，其反應過程敘述如下：



縮合形成 M-O-M 鍵結之兩種反應：



2. 凝膠化 (gelation)：

在水解與縮聚合反應之後，需讓分子與分子間進行交鏈，形成三度空間的網狀結構。凝膠形成時間約從數小時至數天不等，而網狀結構的致密度會隨時間增加而增加。

3. 陳置(aging)：

凝膠形成之後，仍需一段時間陳置時間，此時縮聚合反應雖較為緩慢，但仍繼續進行，使反應趨於完全，而網狀結構更為緻密。

4. 乾燥 (drying)：

乾燥為清除殘餘溶劑，若此時孔洞大小分佈不均勻，會造成凝膠破裂

的情況發生。

5. 熱處理 (thermal treating) :

熱處理即是將形成的結構，藉由熱能的供給，使其產生相變化結晶。

2.2-2 溶膠-凝膠法製備複材料的形式[39]

溶膠法依製造程序的不同，主要可區分為含浸型混和材料 (Impregnated Hybrids)、有機嵌合型混合材料 (Entrapped Organics Hybrids)、化學鍵結型有機無機混成材料 (Chemically Bonded Organic-Inorganic Hybrids) 等三種形式。目前高分子複合材料的作法有：層間插入法 (Intercalation)、原位反應(In-Situ)法、分子複合材料形成法和超微粒分散法等。

1. 含浸型混合材料：

此類是將有機物分散到多孔性氧化物膠體中形成複合材料，而以層間插入法製造高分子奈米複合材料即為此類的特例之一。

2. 有機嵌合型混合材料：

此類是將有機物加到溶膠凝膠溶液中混和均勻，經凝膠化後有機會陷入多孔性氧化物中。其中，原位法分為原位充填形成法及原位聚合法兩種。而本實驗就是利用原位聚合法製作奈米無機複合材料，其原理為將聚合體與另一種單體溶於共同溶劑中聚合，或是貴金屬錯合物溶於單體中分散聚合後，加熱使奈米金屬析出為分散於

高分子基材中。

3. 化學鍵結型有機/無機混成材料：

此類混成材料是指有機物與溶膠-凝膠溶液之預聚物反應，經凝膠化後，使有機物以化學鍵結方式連結於無機氧化物上。最常見的例子為 TEOS 與 poly-dimethylsiloxane(PMDS)的反應，而分子複合材料形成法和超微粒子直接分散法皆可分屬此類。

2.2-3 溶膠-凝膠法反應變因[39]

影響溶膠-凝膠法的因素有很多，例如酸鹼度、中心金屬離子種類、聚合物濃度、水解使用 H_2O 的量等，以下常見的變因來做探討：

1. 酸鹼值：

一般來說，溶膠-凝膠法中，水解和縮合反應是同時進行的，因此伴隨著不同 PH 值的變化，水解和縮合反應也會產生差異。在酸性條件下水解速率大於縮合速率，容易形成高密的立體結構。在鹼性條件下，縮合速率大於水解速率，因此造成膠體粒子化，易形成相分離。

2. 中心金屬離子種類的影響：

其中心金屬離子種類不同，也會導致反應活性的不同，而中心離子的活性與其配位數、電子親和力及不飽和度有關，如 Al、Ti、Zr、Ta、Si 等金屬烷氧化物中，如 Si 因具有較低的電子親和力與零不飽和度，因此 Si 的烷氧化物具有較低的反應活性，如果中心金屬離子活性

較大時（例如：Al、Zr...等），導致水解縮合反應不易控制，在反應過程中容易產生相分離或沈澱，因此必須利用長碳鏈的金屬氧化物為起始劑或加入螯合劑來控制反應速率。

1955年 Bradley等人由實驗得知，Tetraethoxide(四乙氧基鈦)在有水的乙醇中，會快速反應成六配位的 $\text{TiO}(\text{OEt})_2$ (titanium oxide-ethoxide) [40]，而與1953年Minami等人在有水丁醇中的實驗相比[41]，有更高的反應速率，故可選擇，碳鏈長度比起始物長的溶劑來抑制反應性。

而本實驗利用螯合劑的添加，使反應能避免沉澱與相分離的情況。1988年 M.Guglielmi 的文獻中指出，glycols(二醇)、organic acid(有機酸)以及 β -diketone(β -二酮)為較佳之螯合劑[42]官能基。其中具有 β -diketone(β -二酮)官能基之螯合劑，可與 PAA 有較佳之互溶性，故本研究選擇 2,4-pentandione(乙烯丙酮)作為鈦金屬螯合劑。

3. 起始物及介質的影響：

在低烷基烷氧化物通常形成較大的高分子，而在低級醇中得到的水解物有較高的氧化物含量。

2.2-4 溶膠-凝膠法的優點與缺點

近年來，利用溶膠-凝膠法將有機高分子嵌入無機材料內，藉以製備複合材料的比例越來越多，而此項技術的優缺點如下：[39,43,44]

1. 大部分的前驅物為液體，容易處理且均勻度良好，在分子層級上形成互穿式網狀結構，增加材料間的相容性，避免相分離。
2. 所製備得有機無機複合材料，多為透明物質，可作為光學用途。
3. 製備溫度低
4. 可精準控制材料結構，以及有機無機分子比例，達到可調整材料特性的目的。
5. 可補足無機材料反應高溫導致加工困難的不足。
6. 與其他薄膜製程相比（例如化學氣相沈積,CVD），薄膜製程簡單，且可面積塗佈。

而其缺點有：

1. 反應製備時間較長
2. 溶膠-凝膠反應在乾燥過程中，因材料的收縮應力不同，而導致龜裂。
3. 原料成本較貴。

2.3 複合材料的介電性質[45-51]

2.3-1 介電常數

材料的介電特性是由極化所造成的，真空中兩平行版面積為 A ，距離為 d ，在外加電壓時，板上會累積電荷 Q 。即令電容量為：

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$ ，此為真空常數。但是如果兩板間夾有介電材料時，在同一電壓下，介電材料會因外加電場而產生極化量 P ，此時電容量為：

$$\epsilon_r = 1 + P \frac{d}{\epsilon_0 V} \quad C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

ϵ_r 為相對介電常數，和我們採用的介電材料本身特性相關。

當絕緣物質受到外加電場作用時，其內部的正負電荷差會產生位移，因此可以產生電偶極(electric dipole)，導致極化而產生介電性(dielectric)。而因外加電場產生極化機構可分為四種：

1. 電子極化或原子極化 (electronic polarization or atomic polarization) :

材料內部原子是由原子核和周圍電子所組合而成的，因此當加入電場時，會使電子受到電場作用而產生偏移，使正負電荷不在同一個點上，因此產生了電偶極而形成極化。

2. 離子極化 (ionic polarization) :

當離子鍵晶體受到外加電場作用下，正負離子受電場作用而產生偏移，形成電偶極而極化。

3. 偶極矩極化 (dipole polarization) :

在極性分子中，其結構本身以存有電偶極，因此在電場作用下，電偶極會沿電場方向排列而形成有規則化的極化。

4. 空間電荷極化 (space charge polarization) :

在晶體中的缺陷、間隙中的離子，在電場作用下移動而造成分極，這些空間電荷是受到介面之間的阻礙而被陷入在晶體缺陷中，因此其不是由電極供應，也不會經由電極流出。因此當極化發生時，每一個偶極都可以看成是小型電容。

因此若外加電場為交流電場，隨交流電場頻率的增加時，空間電荷極化、偶極、離子等極化會依次序消失，因此介電常數會隨著交流電場頻率增加而降低。圖 2-9 為極化機構與交流電場的關係圖。

2.3-2 介電損失[52]

薄膜電容因不為理想電容，所以應看成電容C和電阻R並聯，因此除了 $I_C = \omega CV \cos(\omega t)$ (通過電容的電流)外，還會有 $I_R = V \sin(\omega t/R)$ 。V和 I_C 有 $\pi/2$ 的相位差， I_R 和V同相，因此 I_C 和 I_R 也有 $\pi/2$ 的相位差。如圖所示，因此可知 I_R / I_C 比例有一個tan關係：

$$\tan \delta = \frac{i_R}{i_C}$$

相位差的產生將導致電路能量的損失，損失最大值發生在極化鬆弛週期與外加電場週期相同時，其中 δ 稱之為損失角(loss angel)，而 $\tan \delta$ 稱為散逸因子(dissipation factor)，是表示一個介電材料損失大小的參數。

散逸因子($\tan \delta$)與相對介電常數(ϵ_r)的乘積稱為介電損失因子(dielectric loss factor)，而電容在使用時的能量消耗和本身的介電常數、介電損失因子及頻率有關。而介電損失主要成因有三種：(a)電子極化損失(electron polarization losses)；(b)離子振動與變形損失(ion vibration and deformation losses)；(c)離子遷移損失(ion migration losses)。

聚亞醯胺介電損失約在 10^{-3} 等級，為兼顧不同特性需求，如製程容易等，使其成為一良好之薄膜材料。

2.3-3 漏電流機制[53-54]

一般薄膜的漏電流機制可分為下列幾種：

1. 歐姆電流(Ohmic Current):

當介電薄膜與電極間的接觸為歐姆接觸(Ohmic Contact)，其漏電流機制為歐姆電流，其表現為介電材料的特性。

其關係式為： $J = q\mu nE$ n 為載子濃度、 μ 為載子遷移率。

2. 離子傳導(Ionic Conduction):

此機制通常發生在厚膜或塊材上，其高溫傳導為離子傳導，因為離子比電子大，所以需要較大的活化能。其傳導公式可表示成：

$$J_i = aE/kT \exp(-E_i/kt)$$

3. 空間電荷限制傳導 (Space Charge Limited Conduction) :

空間電荷限制傳導產生的條件，是接觸電阻能夠使電子注入傳導帶或電洞注入價帶，而其注入速率必需大於電子電洞復合速率，當其發生時，在電極的接觸必須是中性或歐姆接觸，且薄膜本身是均質的。而載子會形成空間電荷限制電流注入，其關係式為：

$$J_{SCL} = 9u\epsilon_i/(E^2/d)$$

4. 穿遂效應 (Tunneling Effect) :

當薄膜厚度較薄時，高能量的載子可以利用穿遂的方式通過能障，因此若薄膜厚度較厚，則此現象的機率就變小。傳統的穿遂和溫度無關，其關係式為：

$$J_T = q^2 E^2 / 8\pi h \psi_B \exp(-8\pi(2m)^{1/2} / 3hqE (q\psi_B)^{2/3})$$

5. 蕭特基發射 (Schottky Emission) :

電子從金屬電極克服 $q\psi_B$ 的能量，以達到真空或是絕緣體的傳導帶。 q 為載子電荷， ψ_B 為功函數，和接面(Contact)的性質有關。因此如果絕緣介電材料和導體間有此傳導機制，則中間的接面為 (Schottky Contact)。其能帶圖為圖 2-10(a)所示。其關係式為：

$$J_s = AT^2 \exp(-q\psi_B/kT) \exp(1/kT(q^3 eE/4\pi\epsilon_i)^{1/2})$$

6. 普爾-法郎克放射 (Poole-Frenkel Emission) :

此效應有時又稱為內部蕭特基效應。當薄膜內部有雜質或缺陷時，載子容易被陷在雜質能階裡，比起傳導帶或價帶的電子電洞更有機會激發導電。因此普爾-法郎克容易發生在大能間隙的材料中，其能帶圖，如圖 2-10(b)所示。其關係式為：

$$J_{pF} = cE \exp(-E_i/kT) \exp(1/kT(q^3 E/\pi\epsilon_i)^{1/2})$$

7. 本質傳導(Intrinsic Conduction) :

此為是電子直接激發到傳導帶所發生的導電現象。但是介電絕緣層的能帶很大，因此在低溫時此機制漏電流很小可以忽略。其關係式為：

$$J_I = bT^{3/2} \exp(-E_g/2kT)E$$

2.4 有機薄膜電晶體的操作原理

一般傳統的場效電晶體是在反轉增強的模式 (inversion enhancement mode) 下操作，而有機薄膜電晶體是在累積增強模式 (accumulation enhancement mode) 下操作，而一個簡單的有機薄膜電晶體的結構如圖 2-11 所示。由圖可得知，一個簡單的有機場效電晶體是由：閘極 (gate)、介電層 (insulator)、源極 (source)、汲極 (drain) 以及有機半導體 (semiconductor) 所組成。而整個電晶體是由閘極、源極、汲極來控制。其中施加於閘極的電壓，控制整個電晶體的開與關，類似於水龍頭的轉頭。而汲極的電壓是決定在半導體裡，源極和汲極之間的電流大小。也因為閘極電場控制整個電晶體的操作，因此才稱為場效式電晶體 (Field Effect Transistor)。

首先我們先以 P-Type 的半導體來說明元件操作的原理。當閘極電壓相對於源極接地端為負偏壓時，則電晶體操作在累增模式下，在通道 (channel) 中累增的載子為電洞。而電晶體操作在線性區 (linear region, V_d 較小時)，電流 I_d 隨著 V_d 線性增加，如圖 2-12，此電流電壓可用式 (1) 描述：

$$I_d = \frac{WC_i}{L} \mu (V_g - V_t - \frac{V_d}{2}) V_d \quad (1)$$

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的電容 (capacitance per unit area of the insulating layer)

V_t : 臨界電壓 (threshold voltage)

μ : 場效載子移動率 (field-effect mobility)

在線性區中的場效載子移動率，我們可以利用元件的轉移電導值 (transconductance) 求得，如式 (2)

$$g_m = \left(\frac{\partial I_d}{\partial V_g} \right)_{V_d = \text{const}} = \frac{WC_i}{L} \mu V_d \quad (2)$$

給定一低 V_d 值， I_d 對 V_d 做圖 (如圖 2-13)，可得到曲線的斜率就是 g_m 值。

再帶入各項參數 (W 、 L 、 C_i) 便可得到線性區中場效載子移動率 μ 。

若閘極電壓相對於源極接地端為正電位時，則電晶體操作在空乏模式 (depletion mode)，通道中的載子被空乏。而通道導通電流與通道關閉

暗電流的比值 (I_{on}/I_{off}) 為一電晶體重要參數。電流 I_{on} 為電晶體操作在累增模式下的通道電流值，電流 I_{off} 為電晶體操作在空乏模式下的通道電流值。此電流比值越高代表此元件電流易調變，元件特性佳。

當汲極電位 V_d 比閘極電位 V_g 更低時，通道電流 I_d 值有漸趨向於飽和現象，則在汲極端有通道截止 (pinch-off) 現象的產生，此時電晶體在飽和區 (saturation region) 操作，其電流-電壓關係式可由式 (3) 表示：

$$I_d = \frac{WC_i}{2L} \mu (V_g - V_t)^2 \quad (3)$$

因此在飽和區中的場效載子移動率可利用 $(I_d)^{1/2}$ 對閘極電位 V_g 做圖，

則從圖中的斜率即可求得飽和區中的場效載子移動率。



表 2-1 聚亞醯胺之特性[21]

- 熱安定性
5%重量損失溫度：560°C (TGA，加熱速率：5°C/min)
- 電氣特性
介電強度：4500V/mil
介電常數：3.5
散逸因素：0.004
體積電阻率： $10^{16}\Omega\text{-cm}$
面積電阻率： $10^{15}\Omega$
- 機械特性
拉伸強度：12.1Kg/cm²
延伸率：23%

表 2-2 聚亞醯胺之特點[21]

- 熱安定性
可承受所有的封裝條件
禁得起金屬化溫度的考驗
- 電性特性
低漏電率(表面和總體)
適用於高頻線路
- 機械特性
韌性佳是良好的機械保護塗膜
- 耐化學藥品性
可承受製程中所使用之化學品
- 高純度
鈉離子含量小於 2ppm

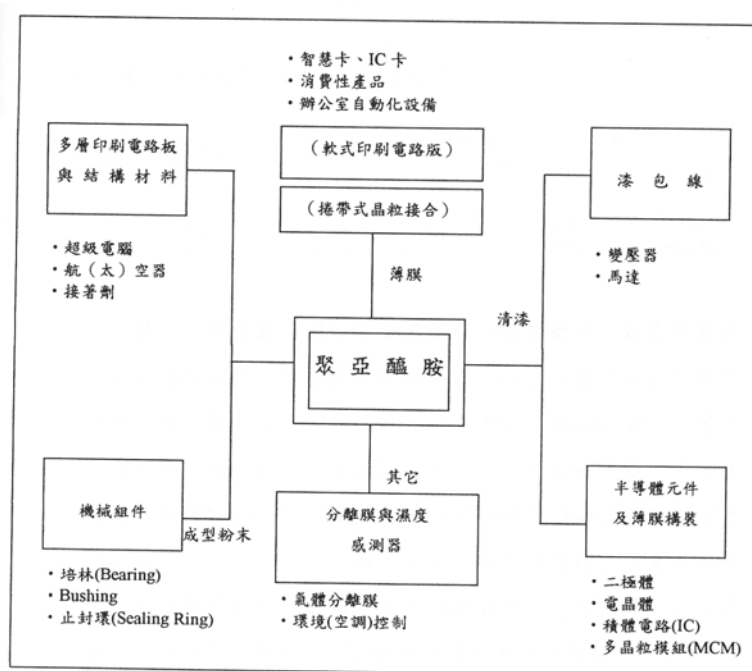


圖 2-1 聚亞醯胺之應用分類圖[21]

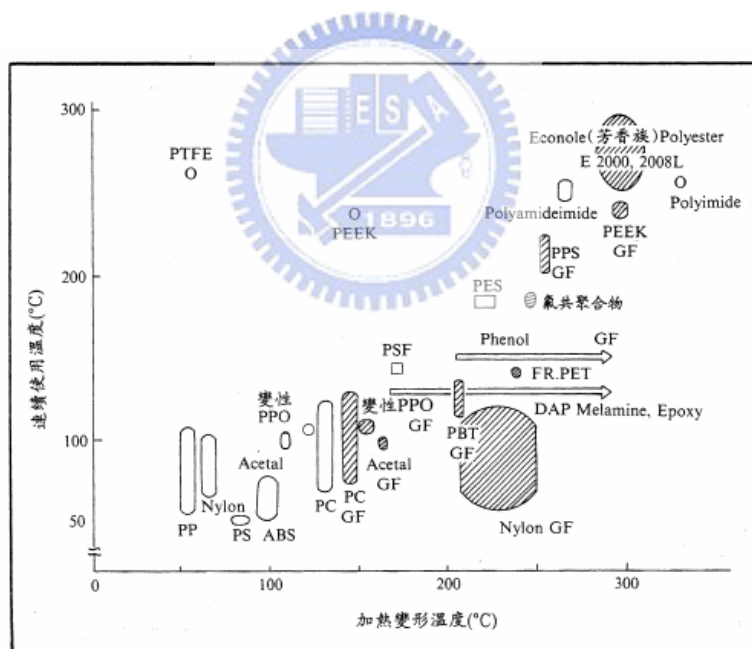


圖 2-2 一般工程塑膠加熱變形與連續使用溫度圖[21]

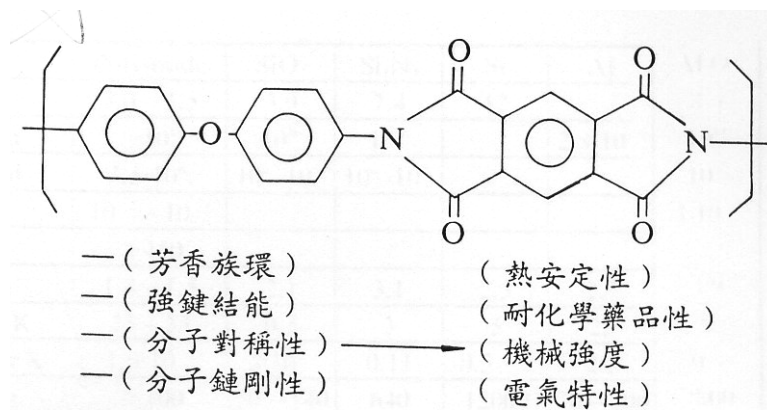


圖 2-3 一般聚亞醯胺的結構[21]

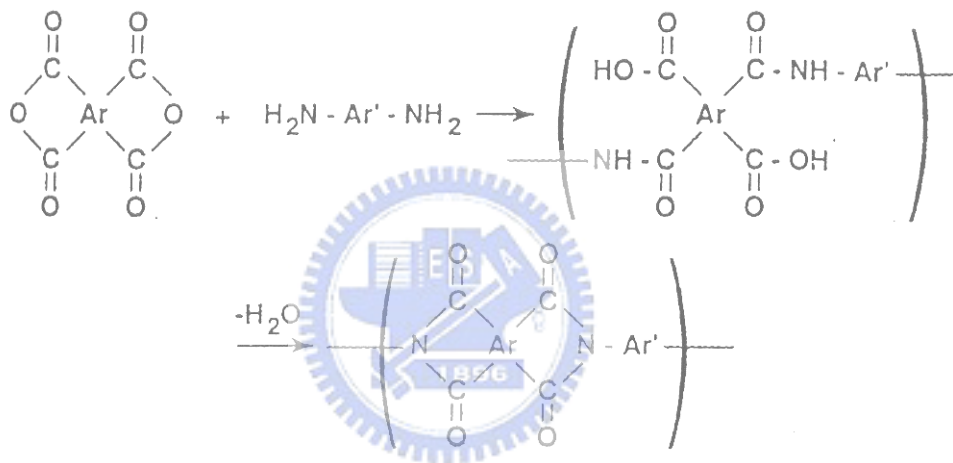


圖 2-4 聚亞醯胺化反應流程圖[21]

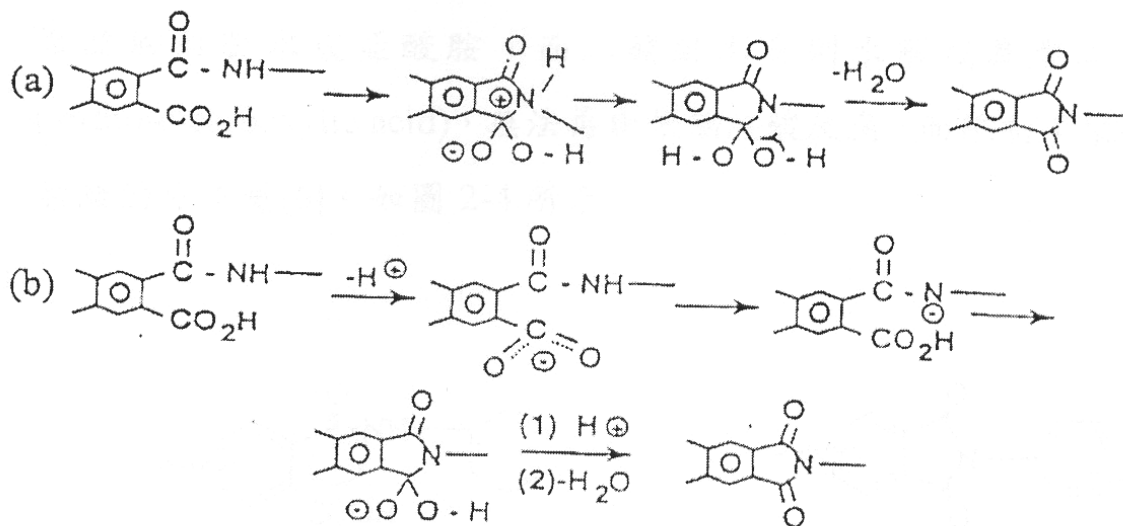


圖 2-5 熱亞醯胺法的反機機構[33]

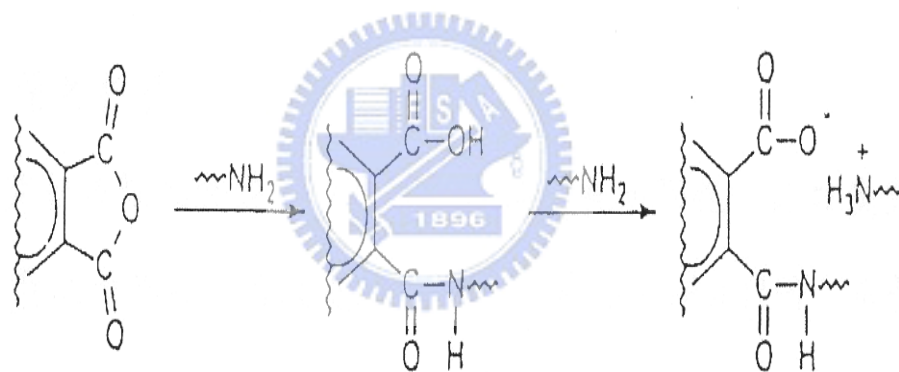


圖 2-6 雙胺過量時，PAA 合成反應圖[34]

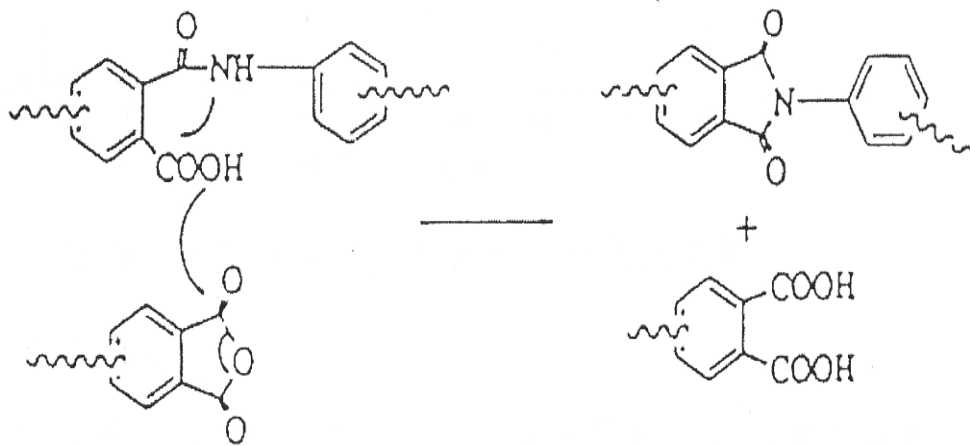


圖 2-7 雙酸過量時，PAA 合成反應圖[35]

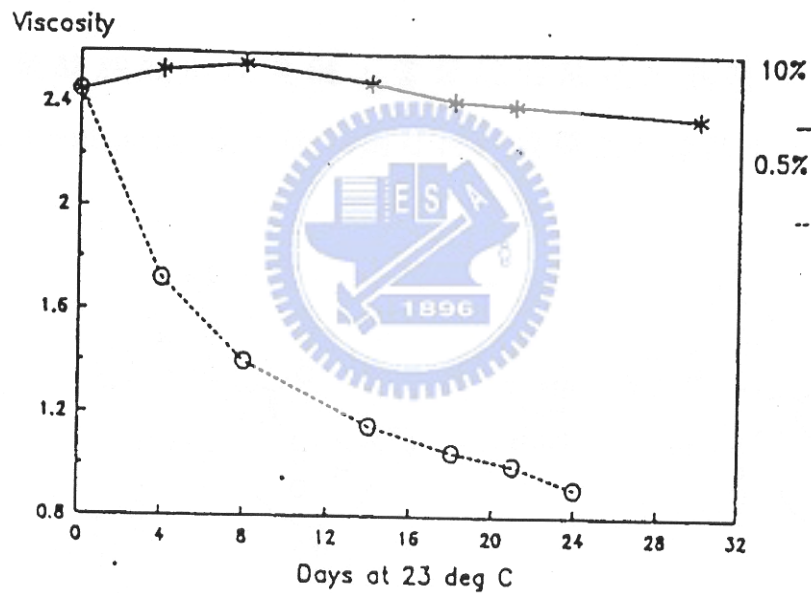


圖 2-8 聚醯胺酸之黏度與時間變化關係圖[36]

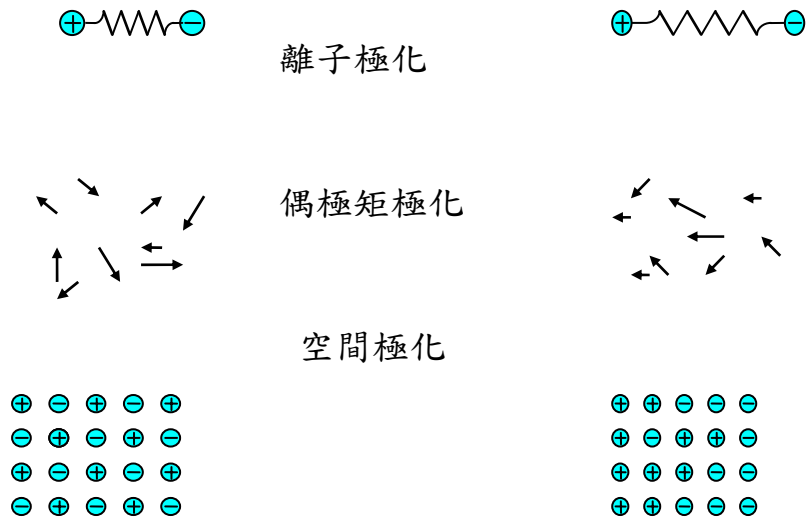


圖 2-9 極化機構與交流電場關係圖

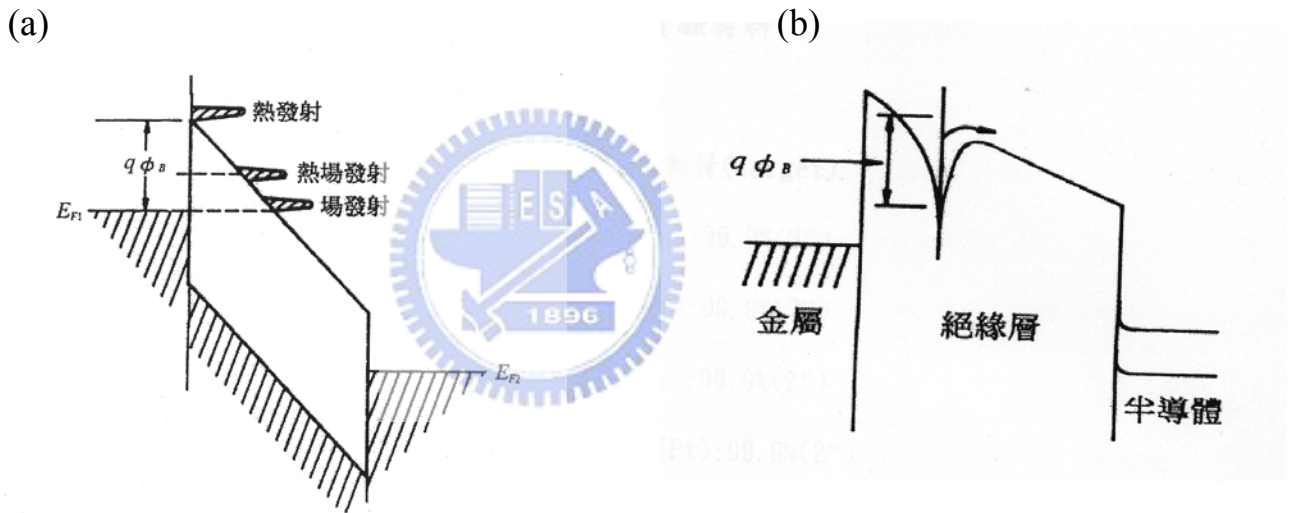


圖 2-10 (a) 蕭特基漏電流機制圖(b) 普爾-法郎克放射[53]

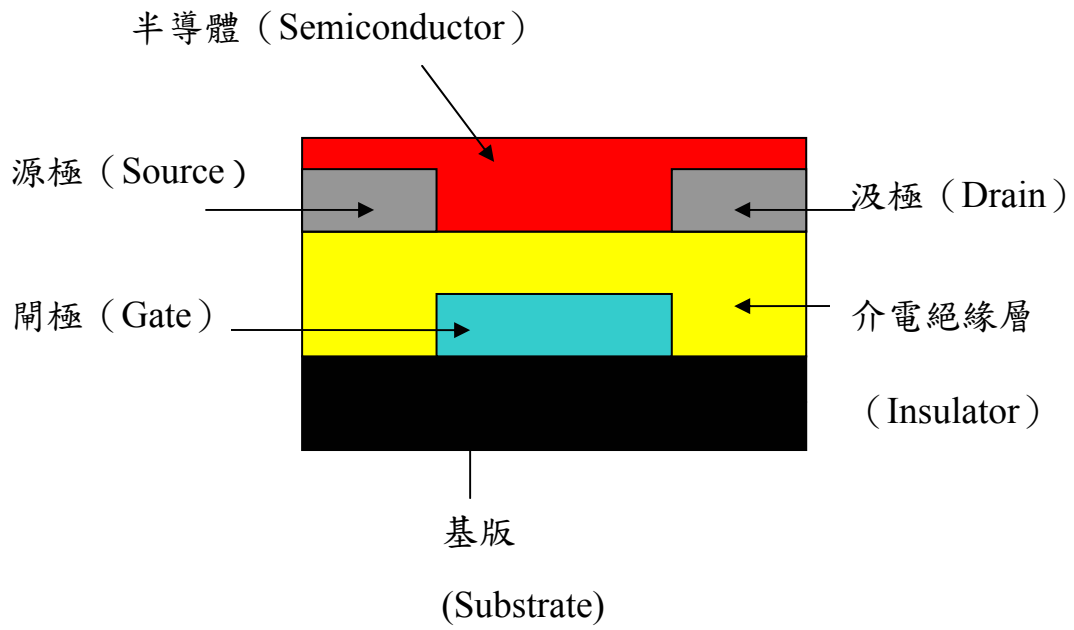


圖 2-11 有機薄膜電晶體側面圖

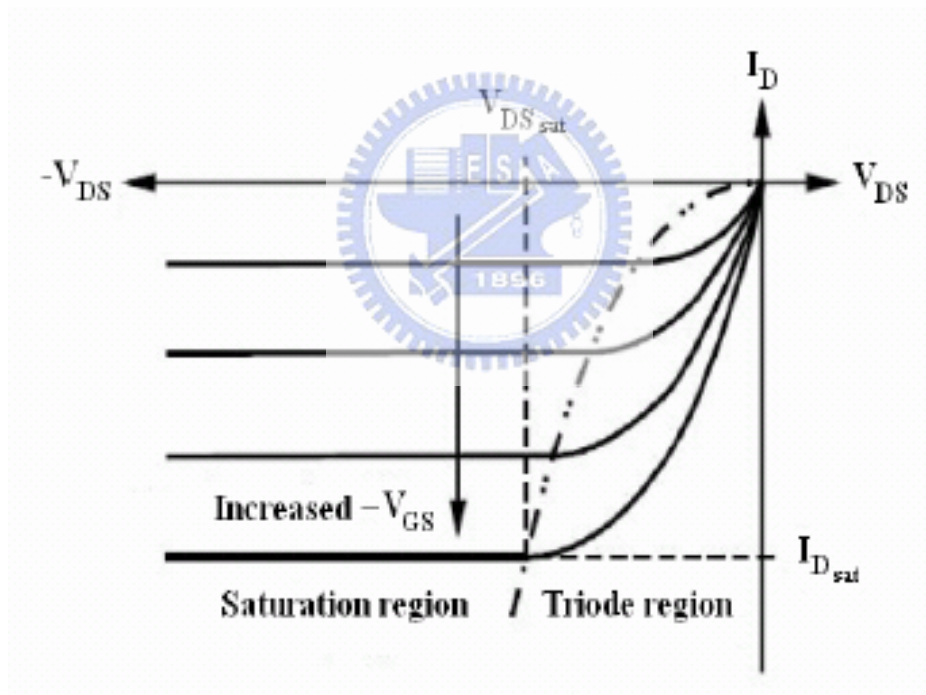


圖 2-12 薄膜電晶體 $I_{DS}-V_D$ 圖 [55]

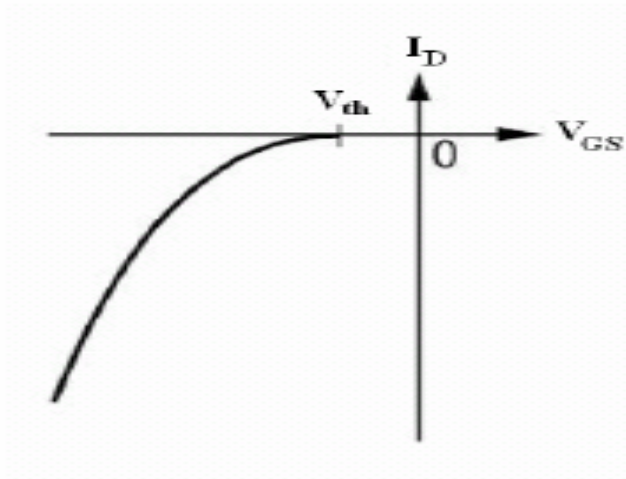


圖 2-13 薄膜電晶體 I_{DS} - V_G 圖[55]

