

元件轉移技術與有機薄膜電晶體之研究

研究生：王碩晟

指導教授：葉清發 博士

國立交通大學電子工程學系暨電子研究所

摘要

本論文中探討了多項為了在可撓式塑膠基板製作半導體元件所需要的關鍵製程技術，由於塑膠基板的熔點僅有 200°C 左右，傳統複晶矽薄膜電晶體製程包括薄膜沈積、閘極氧化、爐管高溫再結晶與活化等製程都無法在如此低的製程溫度下進行；此外，相對於玻璃基板而言，塑膠基板具備較高的吸水率及熱膨脹係數，嚴重的基板形變使得黃光微影製程的對準精確度大幅下降，沈積在基板表面的多層薄膜更可能因為熱應力過大而龜裂或剝落，最後，受限於可撓式塑膠基板獨特的物理與化學特性，故化學清洗、蝕刻及機械手臂之承載輸送方面都讓直接在塑膠基板表面製作薄膜電晶體元件顯得困難重重。

有鑑於此，我們提出了元件轉移技術，其精神是先於矽基板表面以熱氧化生成一層二氧化矽層，並在其上製作薄膜電晶體元件，元件完成後，測得薄膜電晶體的移動率是 32.3 cm²/Vs，開關電流比約 4 × 10⁶；另一方面，塑膠基板先經過 150°C 的預烤以降低形變，表面經過臭氧水處理並使用室溫液相沈積技術在基板的兩面同時形成二氧化矽薄膜，以增加基板的擋水能力、隔絕基板的有機污染與平衡多層薄膜沈積後的應力累積；接著，運用適當的光學接著劑黏貼矽基板與塑膠基板，並以化學機械研磨法研磨晶背直到剩餘厚度約 20 - 40 μm，最後，以熱氧化層為蝕刻阻擋層，利用單晶矽對二氧化矽選擇比高達 80 倍的蝕刻液去除剩餘的晶背矽，並定義出金屬線接觸孔，完成將元件轉移至玻璃與硬質塑膠基板的流程，轉移後的元件並未發現有特性改變或良率下降的現象，此技術相容於傳統矽半導體製程，亦擺脫塑膠基材的諸多限制，實用性極高。

對於可撓曲的塑膠或易碎的超薄玻璃基材而言，運用化學機械研磨可能有研磨均勻性或導致破片的問題，故我們進一步採取完全濕式的蝕刻法來去除晶背的單晶矽。首先針對玻璃基板的元件轉移製程，利用 KOH 搭配高選擇比的矽蝕刻液，直徑四吋左右的圖案已證實可以成功轉移。我們亦探討了旋轉蝕刻技術，提出了一個理論模型來解釋蝕刻液流量、轉速與蝕刻速率之間的關係，並求出最佳的蝕刻條件。旋轉蝕刻技術的主要優點在於整個轉移製程僅需 3-5 分鐘，化學藥品的用量降低，蝕刻時的高熱可以獲得有效的控制，亦沒有研磨時產生機械應力的問題。一個直徑約 5 cm 的圖案已被成功地利用此法轉移至可撓曲的塑膠基板表面，元件的移動率為 $43 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，臨界電壓 10 V，開關電流比高於 10^6 ，我們並針對成功轉移的元件進行彎曲測試，在最小的曲率半徑 (2 cm) 之下，所有薄膜電晶體的元件特性都沒有明顯的變化。此外，利用旋轉蝕刻技術及一般的矽晶圓，已成功轉移單晶矽的圖案至玻璃或塑膠基板表面，未來可進一步檢驗單晶矽金氧半電晶體經過元件轉移製程後的特性表現。

傳統低溫複晶矽薄膜電晶體結構常因為汲極端較大的側向電場而有高漏電流、kink 效應與熱電子可靠度問題，為此我們提出了一個新穎的提升式通道暨閘極覆蓋淺摻雜區結構，其包括一個 100 nm 的通道與增厚之 150 nm 的源極/汲極區域，通道與源極/汲極間的平坦化則採取選擇性室溫液相沈積氧化層的技術來達成，無需額外光罩或化學機械研磨步驟，因而完全相容於玻璃或塑膠基板製程。提升式通道電晶體的主動層再結晶步驟採取準分子雷射退火技術，未完全熔融的主動層在固化時形成晶種並導致側向成長的現象，橫向成長的複晶矽晶粒大小超過 $2 \mu\text{m}$ ，載子移動率超過 $150 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，開關電流比則超過 10^7 ，雷射能量的製程區間則相當寬廣，代表元件的均勻性較佳；相對地，單純增加主動層的厚度至 150 nm 則會使移動率降至 $81 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，而且因為主動區陷阱態位增加的緣故，關閉狀態下的漏電流也大幅提昇。此外，提升式通道電晶體的汲極端側向電場分佈因為淺摻雜區域與較厚之汲極接面的關係而獲得抒解，使得這樣的結構可以有效抑制 kink 效應，並且避免元件的移動率或 ON 電流因為熱載子撞擊的關係而衰退。

對於利用金屬致再結晶法製成的薄膜電晶體而言，當進一步將主動層薄化至 50 nm 甚至 30 nm，元件的漏電流獲得抑制，但是移動率也因為寄生電阻的增加而下降，此時

提升式通道結構因為具有較厚的源極/汲極區域，可避免此問題。另外，調變閘極覆蓋淺摻雜區域的濃度或長度，發現 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 的摻雜濃度與 $2 \mu\text{m}$ 的長度可以最有效地降低汲極區域的側向電場，由於閘極在 ON 的狀態下會在淺摻雜區引致額外的載子，故不會損及電晶體的正常電壓 - 電流特性。

近年來，隨著有機半導體材料的開發，利用旋轉塗佈的方式，可以有效降低在塑膠基板表面製作半導體元件的成本。我們選擇的是 poly-3-hexylthiophene 或簡稱 P3HT 的有機材料，利用氯仿為溶劑，P3HT 在重量百分濃度為 0.3% 時，有機薄膜電晶體可擁有最高的開關電流比與最低的表面粗糙度，移動率可達 $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。有機薄膜電晶體的漏電流主要來自材料本體內，以及通過閘極氧化層等兩條路徑，故我們在源極/汲極區域成長場氧化層，並且調整 P3HT 的濃度，得以有效抑制漏電流。傳統上使用 Pt 和 Au 等貴金屬與 P3HT 層可形成良好的歐姆接觸，本文中使用的 Ni 金屬與薄層的 Pt 膜，可以解決單純使用 Ni 金屬時，在汲極電壓很小時所形成的電流 crowding 效應，同時降低製造成本，此外，縮減附著層 Ti 的厚度亦可降低 Ti/P3HT 界面的接觸電阻值。

有機材料對於水氣和氧氣相當敏感，約 3 hr 的氧氣暴露處理會造成臨界電壓值上升及假性的移動率上升，因為氧氣對於 P3HT 而言是有效的 P 型摻雜，進一步的氧氣處理則會使元件劣化；將有機薄膜電晶體浸泡在 D.I. 水中 8 hr 對於電性沒有明顯的影響，但是更長的浸泡時間則導致水通過 P3HT 的針孔進入閘極氧化層界面而使元件失效，至於氮氣或真空儲存都能夠部分回復電晶體的 I-V 特性。在有機薄膜電晶體的電性可靠度測試方面，不論在閘極外加偏壓、進行熱載子或自我發熱的壓力測試，在測試的一萬秒之內均不會導致移動率或漏電流等電性改變，但卻觀察到明顯的臨界電壓偏移狀況，方向則與偏壓極性有關，我們提出了一個有機主動層的極化模型來解釋觀察到的現象，這種暫時性的極化現象可以被反轉，亦不存在於交流模式的操作。