

米雕? 光雕? 電子雕?-----來玩光學微影曝光吧!

洪鶯玲

國家奈米元件實驗室 / 微影光罩組

米雕是中國傳統工藝中很精密細微的手工藝術，就是在一顆米粒般大小的物體上刻畫許多精美的文字或圖畫，這和我們所要討論的主題-『科學』有何關聯呢?其實兩者最終的結果是一樣的。前者是靠細微的機械工具和精巧的手工技術，呈現出令人讚嘆的手工藝品，而後者(如智慧手機等科技產品)呈現的不也是現代的科技藝術品嗎?只是後者是由一科學家(或稱-另類的藝術家)利用各種物理、化學、材料、機械等特性，在晶圓上完成各種奈米級電子元件圖形的定義，這種圖形的定義方法在半導體製程中被稱為『微影技術(Lithography)』，或是『黃光製程』。

從傳統工藝的小小雕刻工具轉換為利用光、電子束、離子束等更小的工具去完成圖形的定義，將我們所要的元件圖形定義在一種特殊的化學材料上，這種化學材料我們稱為光阻或阻劑(Photoresist)。若以光作為工具，其過程簡單示意說明如下(圖1)。

光源經過光罩的透光區及不透光區形成對比，讓光阻

內的感光材料產生化學變化，再透過顯影的過程(即酸鹼中和反應)，將被曝光區的正型阻劑去除或被曝光區的負型阻劑留下，也就是將光罩上的圖形轉移到光阻上。光罩就是在玻璃(或石英等基板)鍍銻及氧化銻等金屬層，如

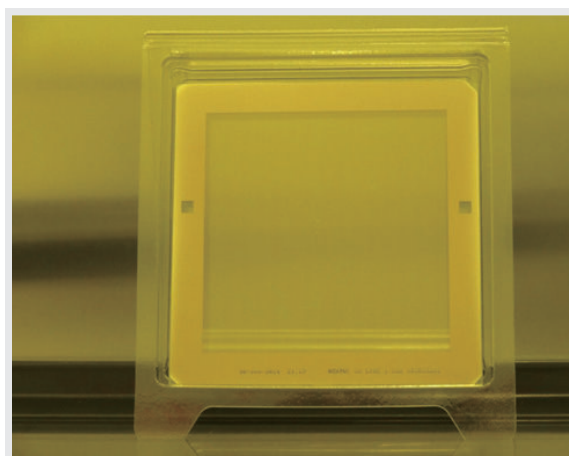


圖 2 光罩。

圖2，有金屬的部分，光源無法穿透；沒有金屬的部分，光源可以有90%以上的穿透率。而光阻當中主要的成分-感光材料，經過光源的照射產生化學變化，使正型阻劑對顯影液的溶解速率提升而快速溶解於後續製程的顯影液，再用去離子水去除之，形成與光罩相同的圖形；負型阻劑則相反，形成與光罩完全相反的圖形(圖3)。

上述的微影製程我們可以利用夜光膠帶、手電筒、深色色紙(圖4)來玩玩看。在暗室中，將夜光膠帶→用深色色紙(上面挖開幾個圓形的洞)蓋在夜光膠帶上→用手電筒照夜光膠帶5~10秒→關閉手電筒照明並拿開深色色紙，觀察夜光膠帶的變化。夜光膠帶上有圓形的圖案，

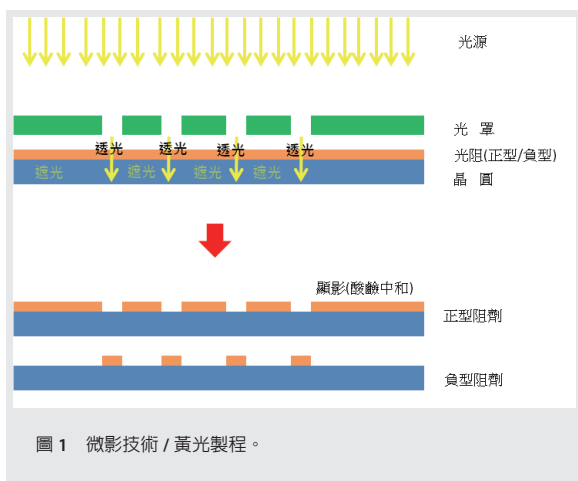


圖 1 微影技術 / 黃光製程。

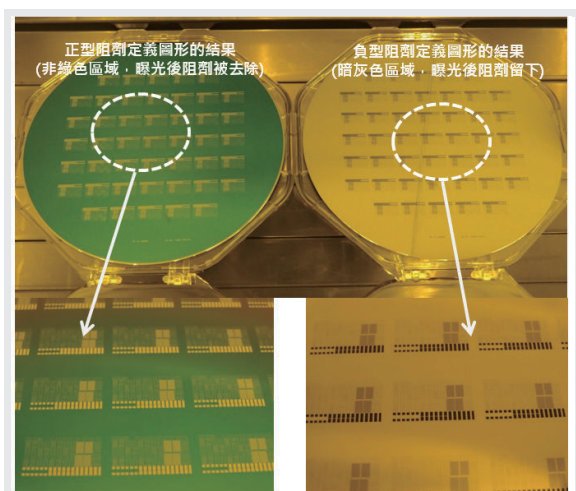


圖 3 相同圖形經由正型阻劑或負型阻劑定義後的結果。

只是圖形很模糊、不清楚(圖5)。夜光膠帶就是塗佈光阻的晶圓，深色色紙是光罩，手電筒的光源就是微影製程的曝光光源，最後的成品就是微影製程的結果，所以經由微影製程將光罩上所有圖形轉移到晶圓上。我們是在暗室中完成實驗過程，實際微影製程是在不易對光阻感光又能清楚操作的黃光室中完成，所以微影製程有時也稱為黃光製程。如此說來，定義圖形很簡單嗎？

圖形定義很簡單，但是要正確、精準的定義就很難。我們常在新聞報導中看到，『晶圓代工大廠台積電昨宣布，與矽智財大廠安謀（ARM）合作完成業界首顆64位元新一代運算技術與16奈米FinFET製程...』，或是『晶圓代工龍頭台積電今年第3季有將近8成的20奈米

產能，被蘋果A8處理器訂單包下...』很難想像當定義的圖形小到比頭髮(一般頭髮直徑約80微米)千分之一還小，只有16奈米，如何正確地完成圖形的定義呢!這就是現代的科技藝術。

讓我們再來玩曝光對準的實驗，道具還是夜光膠帶、手電筒、深色色紙，當然還是得在暗室中，將剛剛照過光的夜光膠帶→馬上蓋上另一張挖開菱形洞的深色色紙，位置與之前的圓形錯開放置→用手電筒照夜光膠帶5~10秒→關閉手電筒照明並拿開深色色紙，觀察夜光膠帶的變化。夜光膠帶有之前殘留較淡的圓形及後來較明顯的菱形，只是圖形還是很模糊、不甚清楚(圖6)。這就是多層對準的概念，實際在半導體製程中電子元件需要經過數十、甚至上百道的製程，而對準的精確度會嚴重影響該元件的電子特性。

透過光學微影製程，可以將光罩上大量的元件圖形快速地完全轉移至晶圓上，但是曝光過程會有干涉、繞射、反射、折射等光學特性的干擾，以及曝光的聚焦深度、能量不足等問題，造成圖形定義不正確或不精準，這是光學曝光需要克服的困難點。

短短數十年的時間，聰明的科學家研究各種化學材料，選擇適當的感光物質當阻劑，並努力研發各種曝光設備及曝光方法，希望將微影技術往前推進，帶入10奈米以下製程，進而將元件特性發揮到最佳。從利用汞燈中過濾出436奈米波段(g-line紫外光)當曝光光源，再進而以365奈米(i-line紫外光)、248奈米(氟化氬(KrF)氣體雷射)、193奈米(氟化氬(ArF)氣體雷射)當曝光光源，用越來越短的波長來定義越來越微小的圖形，要將微影技術從



圖 4 夜光膠帶、手電筒、深色色紙。



圖 5 夜光膠帶感光結果。



圖 6 夜光膠帶感光結果。

微米製程往奈米製程推進，這當中技術的困難性以設備的造價就不難想像，一台最新型的氟化氬準分子雷射掃描曝光系統(ArF excimer laser scanner)可能要數十億新台幣。近幾年設備大廠更投入數十億美金研發極紫外光微影技術(Extreme Ultra-violet Lithography, EUVL)，一種需要在真空中使用，以避免被光罩、反射鏡系統、甚至空氣分子吸收的13.5奈米曝光光源，將被利用在10奈米以下製程，所有前一代微影製程所需要的材料(包含光阻、光罩、光學系統等)及周邊環境(曝光機硬體設計、無塵室潔淨度等)等都將會有很大的變化。

看起來聰明的現代科學藝術家似乎已經將微影技術發揮到極致，其實還有另一種微影技術也不相上下，我們可以利用夜光膠帶、手電筒(圖7)來簡單示範，還是在暗室中，用手電筒直接將小小的光點聚焦在夜光膠帶上5~10秒鐘，再關閉手電筒電源，你會發現夜光膠帶就有小小模糊的圓形圖案(圖8)，這和上個遊戲的差別在於它不需要深色色紙。如果我們將手電筒的光點在夜光膠帶上沿著一固定範圍移動再關閉光源，你會發現夜光膠帶被寫出一長條形，所以不需要深色色紙(等同微影技術中的「光罩」)就能完成圖形的定義，這似乎也是不錯的方法。實際在微影技術中常被使用的手電筒是電子束，電子是波長極短的物質波，所以可以達到奈米級製程的要求。

電子束在真空中透過電磁透鏡的聚焦及偏折，直接對阻劑感光(曝光)，與光學微影原理相似，被曝光的正型阻劑對顯影液的溶解速率提升而快速溶解於後續製程的顯影液，再用去離子水去除之；負型阻劑則相反。如此，將微米或奈米級圖形定義在晶圓上，這

在半導體製程中被稱為『電子束微影(Electron-beam Lithography)』。

控制電子束的困難性不亞於光學，圖形經過電腦的精密計算後轉換為電子訊號，再精確的控制電子束的聚焦與偏折、以及晶圓位置的定位等。光學微影及電子束微影因為感光來源的差異，在阻劑的選擇也不盡相同，這對科學家來說，可又是另一項考驗。

相對於光學微影，電子束微影比較容易達到奈米級製程要求，但是它的致命傷是曝光速度遠遠不及光學曝光設備。隨著工業電腦邏輯運算的進步及工業技術的發達，近年來設備商更積極研發，將電子束從單一電子束曝光改為多電子束曝光(Multiple Electron Beam)，試圖將曝光速度提升，期能與光學微影相比。

光學微影雖有曝光速度上的先天優勢，但是昂貴的設備造價及維護費用實在讓人卻步，多電子束曝光技術及各種先進微影技術正在陸續研發中，相信聰明的現代科學藝術家一定能想出更完善的微影技術來達到製程要求。

參考資料

- [1] 半導體元件物理與製作技術-第三版，施敏、李明達 著。
- [2] VLSI 製作技術，莊達人 著
- [3] 半導體元件物理與製程：理論與實務-第三版，劉傳璽、陳進來 著



圖 7 夜光膠帶、手電筒。



圖 8 夜光膠帶感光結果 (不需要深色色紙)。