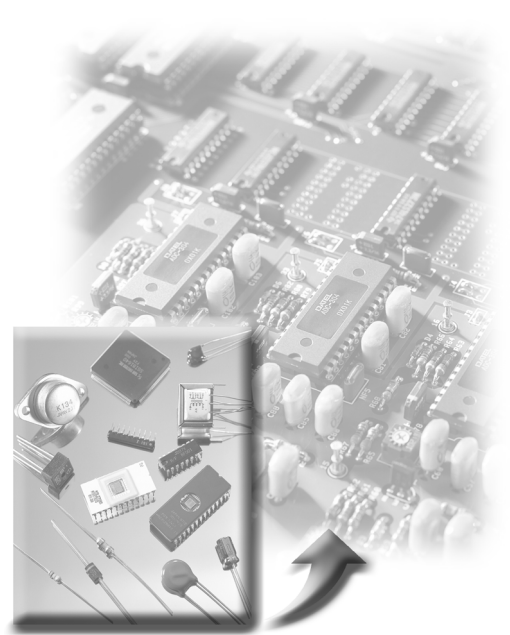


chapter 2

矽晶圓



一般而言物質以我們所熟悉的三態：氣態、液態與固態的狀態存在，而固態主要又可區分為結晶態 (crystalline) 與非結晶態 (amorphous)。一般的金屬 (metals) 與陶瓷 (ceramics) 材料在固態時都屬於結晶態，而我們日常所熟悉的玻璃是非結晶態的陶瓷材料。結晶態的固體——晶體 (crystals) 在微觀上，具有三度空間重複性的長距規律性 (long-range order)。也就是說以原子的尺寸觀之，晶體是由一小的晶胞 (unit cell) 在空間中規律的重複建構而成。以鋁金屬 (aluminum) 為例，在一般情形下它是以面心立方 (face-centered cubic, FCC) 的結構存在。也就如圖 2.1 所示，鋁原子是依 FCC 的組成單元，在三度的空間中重複的排列成了結晶的鋁金屬。

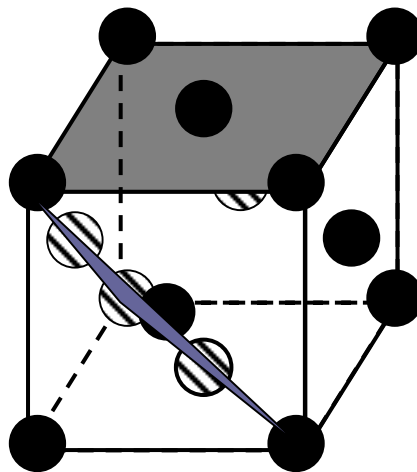


圖 2.1

然而在真正的晶體中，通常都含有一些缺陷 (defects)。這些晶體的缺陷包含了點缺陷 (point defects)，如在晶體當中的某個原子不見了，即所謂的空洞 (vacancy)，如圖 2.2 所示。原子的自然跳動，就可能產生空洞，所以一般而言空洞的缺陷是必然存在，不能完全消除的。晶體的缺陷亦包含了線的缺陷 (line defects)，如圖 2.3 所示的刃狀差排 (edge dislocation)，由圖中可以見到所多出的一個平面。材料是否為單晶 (single crystal) 或是一般晶體，則是由是否存在著面缺陷中的晶界 (grain boundary) 來區分，如圖 2.4 所示，而由每個晶界所包圍起來的部份則為一個晶粒 (grain)。晶界的產生原因甚多，機構之一為如圖 2.4 所示，當物質由液態轉變成結晶

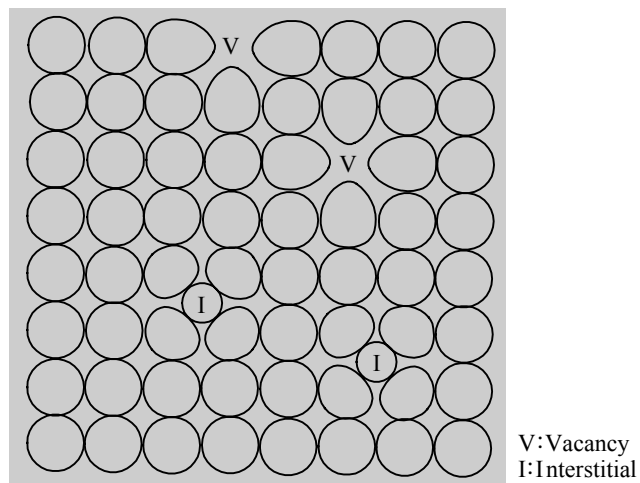


圖 2.2

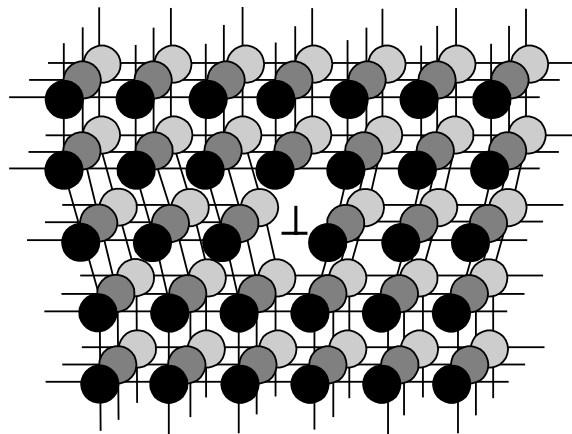


圖 2.3

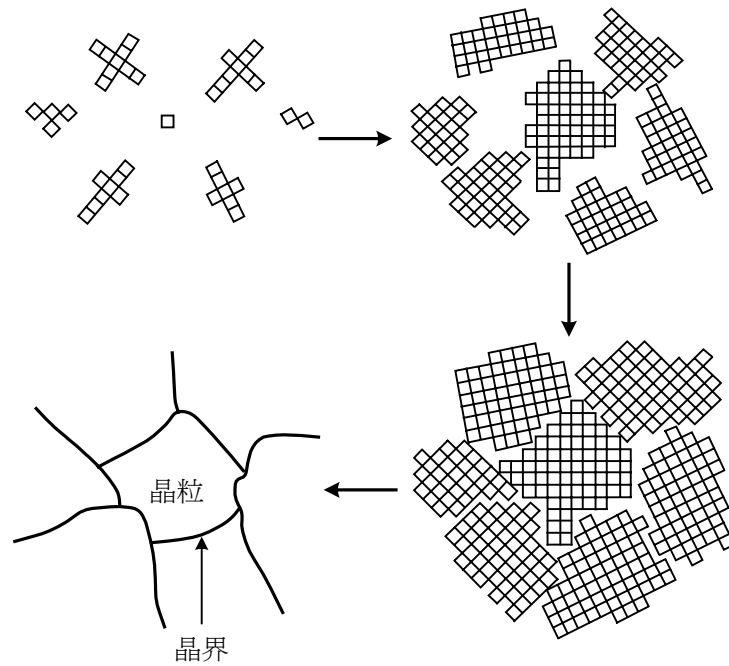


圖 2.4

態時，若是晶核 (nucleus) 超過一處，則每個穩定的晶核將依著各自的方向成長，當這些不同的晶粒成長至碰到一起時，在其邊界就會因成長方向的不同，產生了晶界的缺陷。如果在整個材料中，沒有存在任何晶界，即整個材料是由單一個晶粒所構成，這樣的材料稱為單晶材料。

在一般的積體電路製造中，基於電性的需求，大多使用單晶的基材，而且是以矽的基材為主。除了矽基材外，III-V 族與 II-IV 族的化合物半導體 (compound semiconductor)，如砷化鎵 (GaAs)，在高頻的應用上也有一些市場，但在目前都難以與矽的使用量相提並論。矽晶圓 (silicon wafer) 就是單晶矽的薄片，為積體電路製作的基材。如果以種田為例，矽晶圓就是那積體電路製造業中用以耕種的稻田。以作畫為例，矽晶圓則是那空白的畫布。矽是地球上蘊藏量第二豐盛的元素，佔了地表的 20%，主要是以氧化矽 (silica, SiO_2) 或其它矽氧化合物 (silicates) 的型態存在。

矽晶圓生產的第一步驟，就是將自然界中的矽砂 (SiO_2)，於電爐中藉由與焦炭的反應還原為矽。由這製程所得到的矽，其純度較低，而且也不是單晶，一般稱為冶金級的矽 (metallurgical-grade silicon)。將冶金級的矽

與無水的氯化氫 (HCl)，於高溫如 800°C 中反應，則生成四氯化矽 (silicon tetrachloride, SiCl_4) 與矽烷的氯化物， SiHCl_3 。這些含矽的化合物，如 SiHCl_3 與矽烷 (silane, SiH_4) 等，將進一步藉由蒸餾等方法純化，然後還原成矽，以得到高純度的半導體級矽 (semiconductor-grade silicon)。半導體級矽的純度雖高，但還不是單晶的矽。

單晶矽生產的最常見方法，是利用從熔融的純矽中，以拉晶 (crystal pulling) 的手段來製造單晶的晶棒 (ingot)，這樣的方法稱為柴氏長晶法 (czochralski method)。如圖 2.5 所示，半導體級的純矽首先於坩堝中加熱熔融。若是組成中必需有其它添加物，如砷元素等，也一併熔融混合成爲均勻的溶液。有著一定晶面 (crystal plane) 的矽晶種 (seed) 緩緩降下，接觸到融湯的液面。藉由液面溫度的精確控制於矽的熔點附近，可開始在晶種接觸點生成結晶。拉晶棒再緩緩往上拉升，若控制良好可長成一定需求尺寸的晶棒。而此結晶的成長之晶面，是由其所用的晶種來控制。以柴氏拉晶法所得的單晶晶棒，直徑大小總是有些變化起伏。而且因偏析 (segregation) 與含氧量分佈等原因，晶棒的電氣性質從外到內並不完全均一。

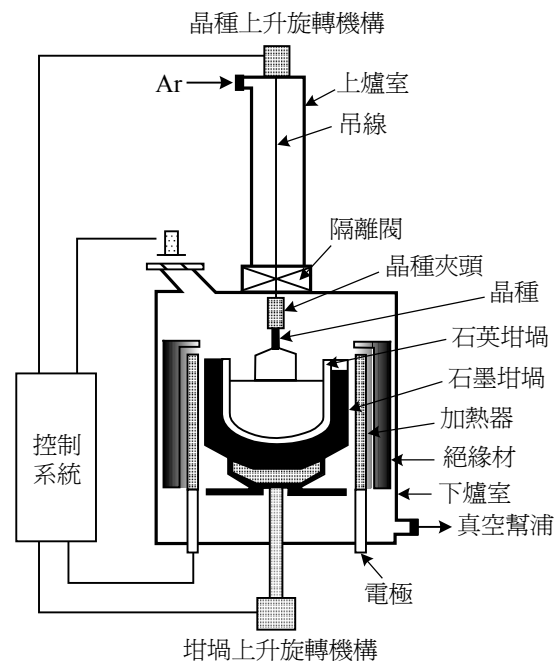


圖 2.5

因此，此單晶晶棒需進一步將圓週拋光切齊，再將圓週拋光的晶棒切片。此單晶矽薄片尚需進行研磨與拋光及必要的表面處理，就完成了矽晶圓的製作。

如圖 2.5 所示，一個典型的柴氏長晶爐包括了爐體、拉升機構、氣氛控制及偵測控制系統等四個主要部份。為了避免矽於高溫下產生劇烈的氧化，長晶一般皆在半密閉的爐體中於氬氣的氣氛下進行。爐體通常區分為上爐室與下爐室，下爐室是主要的加熱區，純度非常高的多晶矽於下爐室的石英坩堝中熔融。石英坩堝因為直接與矽融湯直接接觸，所以在純度與品質的控制上非常重要，不純的石英將引起最終矽晶圓產品的品質下降。石英坩堝會與矽融湯反應，將矽晶圓中氧含量提高，雖然太多的氧會引起許多電性與機械性質的不良效應。適當的氧含量會提升矽晶圓的機械強度，對矽晶圓的品質反而是有利的。矽與石英的反應會產生氣態的 SiO 離開融湯，爐體內的壓力通常保持在 5~100 torr 之間。壓力太低可能會引起融湯沸騰，太高的壓力又可能產生 SiO 凝結掉入矽融湯表面，引起長晶之各種缺陷。

純矽的導電度 (conductivity) 在 20°C 時為 $5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，其能隙 (energy gap) 為 1.1 eV，屬於半導體 (semiconductor)。一般而言半導體的導電度在 $10^{-6} \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 到 $10^4 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 間，而金屬導體 (conductor) 的導電度則在 $10^7 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右。能隙是指原子中其價電帶 (valence band) 與導電帶 (conduction band) 的能量差，代表的是電子從價電帶跳到導電帶成為自由電子所需的能量，一般的絕緣體 (insulator) 的能隙常在 7 eV 以上。半導體可區分為元素型半導體 (elemental semiconductor) 與化合物型半導體 (compound semiconductor)，矽與鍺屬前者，後者則包括了 III-V 族的 GaAs 與 II-VI 族的 ZnSe 等。

純矽不含雜質因此又屬於本質半導體 (intrinsic semiconductor)，在本質半導體中的電氣性質均來自其本身材料的特性。而外質半導體 (extrinsic semiconductor) 則與其不同，在外質半導體中因半導體中摻入了雜質，外質半導體的電氣性質則主要受到摻雜物 (dopant) 的影響。以純矽為例，如果在純矽中摻入磷，因矽在價電帶原有四個電子，但磷在價電帶卻有五個電子。此多出價電帶所能接受八個電子的多餘電子，被擠出位於較高的電

子能階，稱為施體能階 (donor level)，如圖 2.6 所示。此多出的電子也因此很容易跳到導電帶成為自由電子，這樣的半導體稱為 n- 型半導體。如果純矽中摻雜的是三價的鋁，則在鋁矽的鍵結中少了一個價電子，因此很容易從週遭抓進一個電子。這接受電子的能階將遠低於導電帶的能階，如圖 2.7 所示，稱為受體能階 (acceptor level)。這樣的外質半導體將產生電洞 (electron hole) 的移動，稱為 p- 型半導體。在矽晶圓的生產上有純矽的矽晶圓，亦有已含一定摻雜物的 n- 型或 p- 型矽晶圓。其摻雜的濃度隨不同的電性要求而有所改變，一般而言約在 10^{14} 到 10^{19} atom/cm³ 之間。

縱使在摻雜量被認為很大的重度摻雜，如高到 10^{20} atom/cm³，其相對的量與矽比較還是十分小量的。為了製程上控制的容易，摻雜物的添加通常是以母合金 (master alloy) 的形式來添加，而不是以純元素的形式添加。在有摻雜物添加的矽融湯中，在其長晶的過程中，偏析 (segregation) 是無可避免的情形。長晶過程中，拉升機構的旋轉可以減低區域性的偏析，但仍不能避免晶棒頭端與尾端成份的差異。這種偏析是因材料在液態

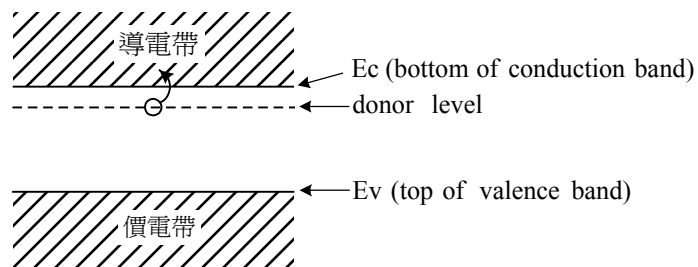


圖 2.6

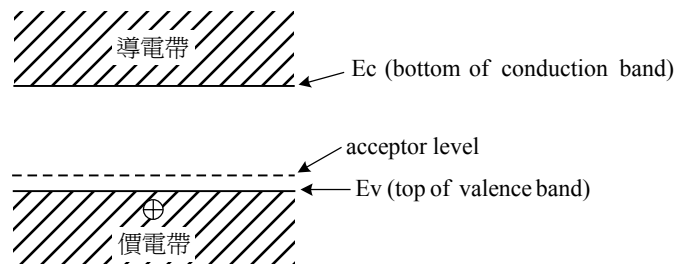


圖 2.7

與固態中對摻雜物所具有不同的溶解度而來，是材料的本質特性之一，無可避免，但可以由理論推之偏析的情形。於晶棒長成後，將頭尾端超出組成規範的部份切除。

在矽晶圓中另一項特徵是晶面，晶面的標示是以米勒指標 (miller index) 表示。以如圖 2.1 所示的 FCC 為例，依其組成單元可以定義出原點與互相垂直 X, Y, Z 三軸。而晶面與此三軸交點截距的倒數，即為此晶面的米勒指標。如圖 2.1 中標示斜線的二個晶面，與此三軸交點截距分別是 $(\infty, \infty, 1)$ 及 $(1, 1, 1)$ ，所以這二個晶面分別是 $(0, 0, 1)$ 及 $(1, 1, 1)$ 晶面。在 $(0, 0, 1)$ 面上，面積為 a^2 之內共有 $(1+4 \times 1/4) = 2$ 個原子。而在 $(1, 1, 1)$ 面中，於 $\frac{\sqrt{3}}{2}a^2$ 的面積中亦有 $(3 \times 1/2 + 3 \times 1/6) = 2$ 個原子。可見二個晶面的堆積密度並不相同，由此可見對同樣物質的晶體，不同的晶面其性質並不完全一樣。在一般的多晶物質中因有非常多的晶粒與各種不同的晶面，所表現出來的是各晶面平均的性質，因此一般多晶的材料並不特別注意晶面的方向。然而在單晶材料的使用上，如前所述不同的晶面具有不同的性質，因此晶面的選擇十分重要。在長晶的過程中，在矽晶棒中可以見到很獨特的晶線，這些晶線的存在是由於晶體各面的成長速率不同所引起的。矽的結構是鑽石結構 (diamond structure)，其結構宛如二個套在一起的 FCC，p- 型 $\langle 100 \rangle$ 的矽晶圓是最常使用的晶圓。



參考文獻

1. W. R. Runyan and K. E. Bean, "Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology", Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1994.
2. W. R. Runyan, "Silicon Semiconductor Technology", McGraw-Hill, New York, 1974.
3. L. H. Van Vlack, "Elements of Materials Science and Engineering", 6th ed., Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1990.
4. 林明獻，矽晶圓半導體材料技術，全華科技圖書，1999。



本章習題

1. 什麼是晶界？
2. 簡述柴氏長晶法之製程。
3. 在一片 8 吋的矽晶圓中，約有多少個矽原子？
4. 一根 8 吋的矽晶棒，若長一公尺，約有多重？
5. 何謂偏析？