

# 第 1 章

## 緒 論

- 1.1 半導體
  - 1.2 半導體 IC 產品的製造流程
  - 1.3 基本可靠度觀念
  - 1.4 產品可用壽命
- 參考文獻

考慮本書的主題，開宗明義（1.1 節），自然要介紹何為半導體，以及有些什麼半導體的材料可被工業界廣泛地應用。其次，在 1.2 節中，對今日半導體工業，從電路設計，到 IC 產品完成的最後測試，作一簡要的製造流程介紹。在 1.3 節中，從物理及統計兩個面相，解釋 IC 產品的可靠度觀念。

根據這可靠度觀念的解釋，在最後一節（1.4 節）裡，引介工業界經常用到的產品可用的幾個壽命參數。

## 1.1 半導體

簡單地說，半導體（semiconductor），就其電傳導性質而言，是介於導體（conductor）與絕緣體（insulator）之間的一種物質。但這種說法似乎純粹從字面而望文生義，未免失之過於粗糙含糊。要更精確地解釋半導體是什麼，我們需從近代物理學中以量子觀（quantum concept）為基礎建立起來的原子模型（atomic model）說起。

近代物理由丹麥物理學家 Bohr（波爾，1885-1962）率先以環繞原子核（nucleus）的電子（electrons）只能在分離特定的軌道、能量上存在的量子化（quantization）觀念來描繪原子。後來，又經幾位量子學物理先驅大師，如 de Broglie（1892-1987），Schrodinger（1887-1961），Heisenberger（1901-1976）等的開拓、改進、提煉，量子物理的原子模型遂臻於成熟而完善。總結而言，現在的原子模型認為在原子中的電子為環繞原子核的一團具有特定狀態的電子雲（electron cloud，由所謂的波函數 wave function 代表）。所謂特定狀

態，基本上由四個量子化參數（quantum parameters，或簡稱量子數 quantum number）決定。此四個量子化參數為：

1. 主量子數（principal quantum number） $n$ ； $n = 1, 2, 3, \dots$ ，一直到無窮大的正整數。主量子數為描述電子雲在對原子核中心徑向方向如何分佈的一量子數。 $n$  愈大，電子雲離原子核中心的分佈愈廣，節點（nodes，即電子雲濃度為零之處）愈多（有  $n-1$  個），具有的能量愈高。
2. 軌道角動量（orbital angular momentum） $l$ ； $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。此參數代表電子的軌道角動量，只能以上述的量子化數值存在。注意：在量子物理學裡，通常角動量以  $\hbar = h/2\pi$ （ $h$  為普蘭克常數 Planck constant）為單位。
3. 磁量子數（magnetic quantum number） $m$ ； $m = -l, -l+1, \dots, 0, \dots, l-1, l$ 。此參數代表電子的軌道角動量在某個特定方向上的分量。換個比較容易了解的說法， $l, m$  二者合在一起決定電子雲環繞原子核中心在角度上的分佈狀況。
4. 自旋（spin） $s$ ； $s = \pm 1/2$ 。此參數代表電子的自旋角動量。在量子物理學裡，電子只有半上旋（ $+1/2$ ）與半下旋（ $-1/2$ ）兩個自旋狀態。

如上所言，這四個量子數決定原子中電子的狀態（state，或逕稱 quantum state 量子態）。因當主量子數為  $n$  時，軌道角動量值可能為  $0, 1, 2, \dots, n-1$ ；而當軌道角動量值為  $l$  時，磁量子數值可能為  $-l, -l+1, \dots, 0, \dots, l-1, l$ ，又自旋可有  $\pm 1/2$  兩個值，所以主量子數為  $n$  的量子態一共可有

$$\sum_{l=0}^{n-1} 2 \times (2l+1) = 2n^2 \text{ 個。}$$

電子是所謂 Fermion（費米子）的基本粒子。凡 Fermion 的粒子（具有半自旋的粒子皆是）滿足所謂的獨佔原理（exclusion principle），即每一個量子態只能為一個 Fermion 所佔據。所以，在原子中，主量子數為  $n$  的電子軌道裡，最多就只能佔有  $2n^2$  個電子。

然而，不同量子態的電子有不同的能量。電子要佔據原子中的量子態自然從具最低能階（energy level）的量子態開始，依序而上。直至所有的電子佔據所有可能最低能階的量子態為止。這樣的原子狀態稱為該原子的基態（ground state）。

圖 1-1 為原子中電子量子態能階的示意圖。當  $n = 1, l = 0$ （或用 1s 代表）的能階被兩個電子填滿（為氦 helium 原子的基態）後，如再有多餘的電子，就繼續填進  $n = 2, l = 0$ （或用 2s 代表）的次高能階。當 2s 的能階被另兩個電子填滿（為鈹 beryllium 原子的基態）後，如再有多餘的電子，就繼續填進  $n = 2, l = 1$ （或用 2p 代表）的次高能階。當 2p 的能階被另六個電子填滿（為氖 neon 原子的基態）後，如再有多餘的電子，繼續填進  $n = 3, l = 0$ （或用 3s 代表）的次高能階，……。基本上，所有化學週期表（periodic table，參考附錄一）上的元素，可以依此程序去了解它們的原子結構及其化學性質。

因本書所討論的半導體乃以建立在矽（silicon）元素長成的晶體上為主，此處自然是一個交代矽原子中電子結構的好地方。矽的原子序（atomic number）為 14，也就是原子核中有 14 個正電荷的質子（protons），原子核外圍有 14 個負電荷電子在環繞。依圖 1-1，這 14 個電子將從最低能階 1s 依序排到 3p 的能階，構成矽的基態。注

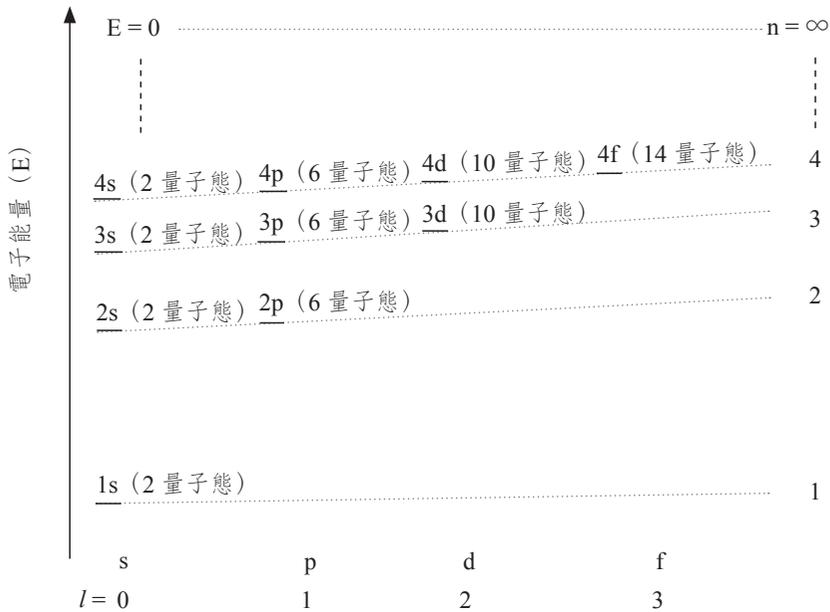


圖 1-1 · 原子中電子能階示意圖（能階尺寸不一定正確）

意：事實上，3s 與 3p 的兩個能階佔有四個電子，構成矽原子最外圍的電子層。而伴隨著這最外圍的電子層的還有可供另外四個電子佔據的四個空缺的量子態。

上面所言是針對單一存在的矽原子的情況。但在半導體工業界被廣泛應用的矽晶體而言，每單位立方公分的體積內就擁有至少  $10^{22}$  個以上的矽原子。在如此小的空間內，這麼多的原子擠在一起，電子雲的分佈及其能階又會有什麼變化呢？

首先，必須知道固態矽基本上是以鑽石的結晶體（crystal）結構存在。結晶體，簡而言之，是以相同的單位原子構造重複出現的一種固態物體。對這種物體，量子物理學有一套理論方法可以進行分析了。本書僅將其分析結果概要地呈現在圖 1-2 內。

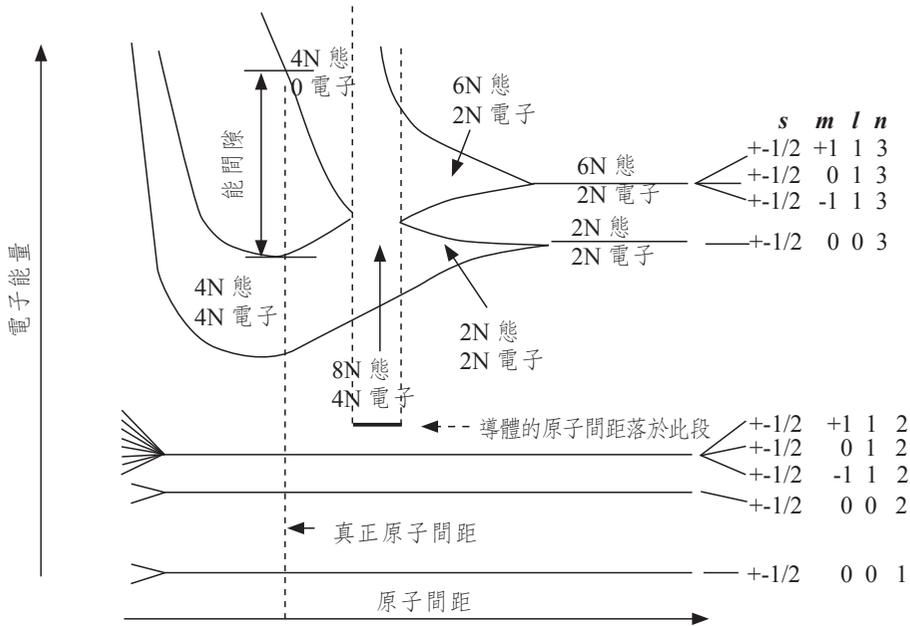


圖 1-2 · 矽原子中電子能階隨原子間距的變化

圖 1-2 表示一具有 N 個矽原子結晶體的量子態能階隨原子間距離變化的理論計算結果。注意：此圖只供示意解說而已，其繪畫尺寸並沒有嚴格遵照計算得到的數值。讓我們且將焦點放在矽原子的最外圍的電子層（即 3s 與 3p），因為這是我們對從單原子轉變到多原子結晶體結構的問題的主要興趣所在。當原子間距離非常遙遠時，每個原子互相獨立無關，所以這 N 個原子不過是一群各擁有 2 個佔據 3s 能階，及另 2 個佔據 3p 能階的外圍電子的原子群而已。當原子間距離漸漸減少，原本無關而相同的 2N 個 3s 態，及 6N 個 3p 態將漸漸在能階上顯現出不同；原本的 3s 能階將逐漸散開成 2N 個離散的能階。相同地，原本的 3p 能階也將逐漸散開成 6N 個離散的能階。但

因  $N$  為很大的數目（每單位立方公分的體積內就擁有至少  $10^{22}$  個以上的矽原子），這些密集的離散能階實際上與連續的能階幾無二致，故亦稱能帶（energy band）。事實上，能階的分散，或能帶的形成，是粒子間的電磁作用隨距離縮短而持續加強的結果。

當原子間距離繼續減少，上下兩能帶持續展開，最後在小於某個特定距離時，兩個能帶會二合為一連結起來，成為一個有  $8N$  個密集離散能階的能帶。當原子間距離繼續減少， $8N$  個密集離散能階的能帶又將開始分裂成二個各自擁有  $4N$  個密集離散能階的能帶；在基態時，下能帶為  $4N$  個電子（就是所有原子的全部外圍電子）所佔滿，而上能帶的  $4N$  態都是空的，沒有電子佔據。在兩能帶間的空隙，沒有任何量子態存在，也就沒有任何電子可被准許佔據，故稱禁區間隙（forbidden gap）。

事實上，在下能帶佔滿的電子，如用電子雲的觀念來看，主要分佈在最相鄰的每兩個矽原子之間，構成兩個矽原子緊密相連的鍵鍊。故下能帶亦稱價電帶（valence band）。而上能帶的  $4N$  個空缺態，通常沒有電子佔據。但一旦有電子佔據，其代表的電子雲基本上不受制於任何原子，除非正在固體的邊緣，否則，幾乎可以到處「雲」遊，近似自由電子（free electrons）。故上能帶亦稱導電帶（conduction band）。

固態矽的原子間距離落在圖 1-2 中垂直虛線的地方。於此處，禁區間隙的高度（簡稱間隙能 gap energy）約為  $1.12\text{eV}$ 。以這樣的間隙能，價電帶上端的電子靠著熱能振動（前面所謂的基態就是毫無熱能的狀態，或溫度為絕對零度的情況），就有可能跳過禁區間隙（也就是價鍵斷了），成為導電帶上的導電電子。同時，價電帶因缺了一個

電子（有空洞），鄰近的價電子也很容易跳過來，形成另外的導電路徑。因此，價電帶上的「洞」也是可以導電的，我們遂將其稱為電洞（holes）。價電帶中電子借熱能而跳過禁區間隙產生的導電電子及導電電洞，合稱為本質電載子（intrinsic carriers），而它們就分別被稱為本質電子（intrinsic electrons）及本質電洞（intrinsic holes）。像矽這樣的固體，由於間隙能不大，在室溫時，就有不容忽視的本質電載子濃度提供導電的能力，是一種導電體。但這種導電體又不同於一般金屬導電體，於是被稱為半導體。如此段所述，僅靠本質電載子導電的半導體稱為本質半導體（intrinsic semiconductor）。注意：本質電子及本質電洞的數目永遠相等。

然而，金屬導電體與半導體真正的差異到底在哪裡？較精確的解釋仍然要借助於圖 1-2（雖然圖 1-2 是以原子序數 14 建立的，但類似的圖案也可援用到其它原子序數的元素，譬如原子序數 13 的鋁 Al）。還記得我們提到當原子間距離減少時，上下兩個能帶（當然，它們各自的能階數與矽原子的不一樣）會二合為一連結起來，成為只有一個能帶的區間（圖 1-2 中被另兩條垂直虛線界定的範圍）嗎？如果原子間距離是落在此區間內的固態物質就是金屬導電體。因為在這種情況，沒有禁區間隙，所謂價電子只要有一點微小的熱能（只要不在絕對零度），又受一點外加電場就可自由移動，就像自由電子一樣。因此的導電度，在通常情況下，比半導體大了好幾個數量級（orders of magnitude）。這種導電體就是金屬導電體。

我們同時也可用圖 1-2 來解釋絕緣體。如果固體原子間的距離是落在導電帶與價電帶分離得很開的地方，也就是間隙能很大之處，在這種情況下，價電子很難借著熱能從價電帶跳到導電帶。這種固體的

電載子濃度，即使有也很小，因此可被忽略，這就是絕緣體。譬如二氧化矽（ $\text{SiO}_2$ ），有類似矽晶體的鑽石結晶體結構。雖然此固體中含有兩種不同的原子（Si 與 O），但矽與氧原子將結合成類似圖 1-3b 代表的晶體結構（事實上，真正的晶體結構分佈於三維空間，圖 1-3 為求易懂，簡化為二維空間）。這結構顯示基本上兩個氧原子配一矽原子結合成  $\text{SiO}_2$  的分子單位。在基態時，氧原子 2p 態的四個電子與矽原子的 3s 及 3p 態的四個電子形成價電帶，而氧原子另二個空缺的 3p 量子態與矽原子另四個空缺的 2p 量子態形成導電帶。能帶隨原子間距的變化也類似圖 1-2 所示。不同的是  $\text{SiO}_2$  真正的原子（或更真切地說，分子）間距落在導電帶與價電帶分離得很開的地方（約  $9\text{eV}$ ），因此， $\text{SiO}_2$  是一個絕緣體。

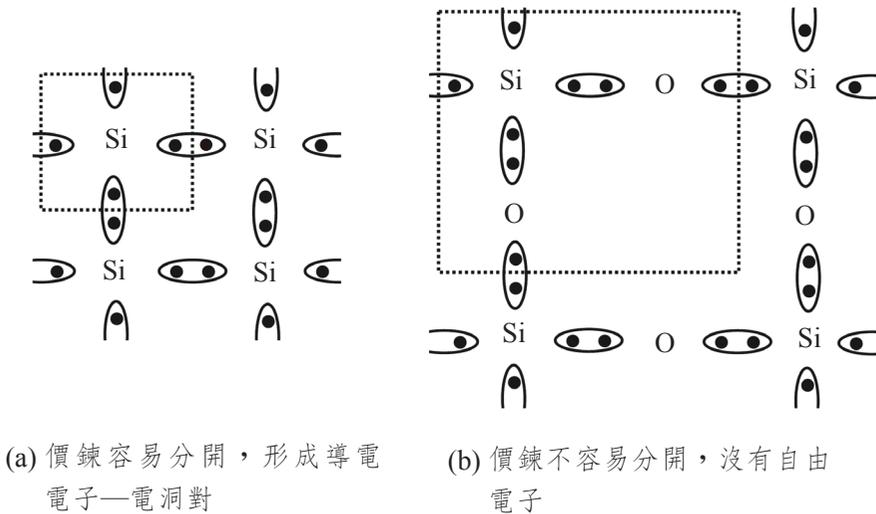


圖 1-3 • (a) Si 晶體的原子結構；與 (b)  $\text{SiO}_2$  晶體的分子結構的二維平面簡化圖

本質半導體雖可導電，但在實際應用上，導電度嚴重不足。以矽晶體為例，在室溫時，本質電載子濃度只有約  $10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，比起一般金屬，如鋁，約有  $10^{22} \text{cm}^{-3}$  的自由電子濃度，其間導電度的差距實有如天壤之別。為增加半導體的導電度，以利於實用，便有在本質半導體中摻進雜質（impurity）以增加其導電度的外質半導體（extrinsic semiconductor）的出現。用來摻進本質半導體的雜質通常可概分為兩類：一類為三族元素，即可提供三個價電子的元素，如硼（B）；另一類為五族元素，即可提供五個價電子的元素，如磷（P）。

摻進雜質的原子濃度（ $10^{16-19} \text{cm}^{-3}$ ）通常比起半導體本身的原子濃度（ $10^{22} \text{cm}^{-3}$ ）小得很多，所以，雜質的出現基本上對於半導體的固體結構並不造成根本的改變——其原子不過填進可能的晶格空缺（vacancy，即該有矽原子卻無矽原子之處）處，以彌補矽原子之不足而已。

如所摻進的雜質屬於三族元素，如硼，因其價電子只有三個，比矽原子少一個，鄰近的矽原子的價電子就很容易借著熱能，跳過來佔據這個空缺，而在價電帶，留下一個電洞。價電子從矽原子跳到硼原子的轉換，稱為游離（ionization）。游離所須的能量稱為游離能（ionization energy），對矽固體中摻進硼雜質而言，游離能僅為 0.045eV 左右。通常室溫的熱能就足夠提供這個能量。所以，經由游離過程產生的電洞濃度幾乎與摻進的三族元素雜質的原子濃度相同。三族元素雜質原子的添加，其目的主要就是為接受矽原子的電子，產生電洞，故這種雜質的原子稱為受體（acceptor）。以上所描述，可以禁區間隙中存有一受體能階，而此能階與價電帶上緣之間隔即為游離能的能帶圖來代表（見圖 1-4a）。