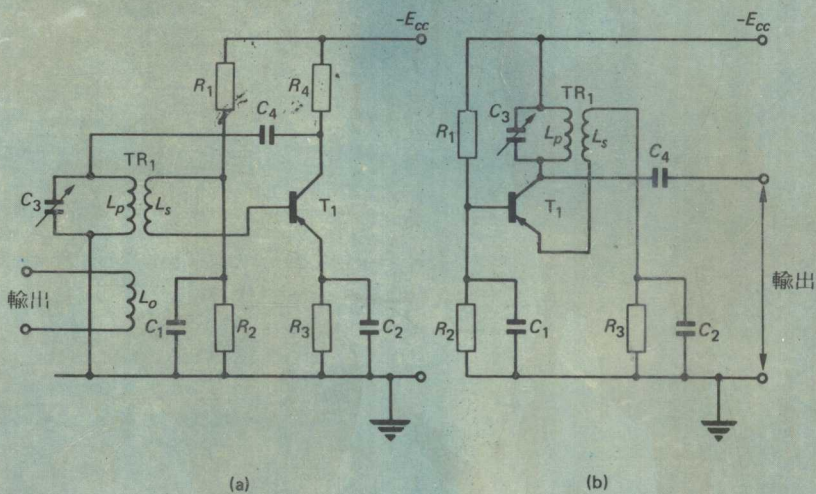


電子技術入門

陳遠宗 編譯



1	半導體理論概述	1
	原子理論簡介	
	本徵半導體	
	非本徵（含雜質）半導體	
	P - n 結	
2	半導體二極管	19
	半導體二極管的結構	
	半導體二極管電壓電流特性曲綫	
	二極管的種類及用途	
3	晶體管	33
	晶體管的種類	
	晶體管的工作原理	
	共基極電路	
	共發射極電路	
	共集電極電路	
	晶體管的靜態特性	
	晶體管的構造	
	熱效應與頻率效應	
	晶體管的額定值	
4	熱陰極電子管	63
	熱電子發射	
	二極管	
	三極管	
	四極管	
	五極管	
5	陰極射綫管	89
	陰極射綫管	

TN1/C639

彩色電視顯像管
時基

6	小信號放大器	103
	工作點的選擇	
	電子管偏壓	
	晶體管偏壓	
	利用負載綫確定增益	
7	波形發生器	121
	波形	
	LC 振盪器	
	振盪器電路	
	LC 振盪器的種類	
	頻率穩定性	
8	電源	139
	整流電路	
	濾波電路	
	倍壓電路	
	齊納二極管電壓穩定器	
	直流電源的變換	
9	數字元件與電路	157
	電碼概述	
	二進制代碼	
	雙態器件	
	電子門	
	二極管邏輯門	
	練習題 (附數字答案)	181
	本書內容索引	213

1

半導體理論概述

隨着科學技術的發展，半導體（Semiconductor）的重要性顯得日益突出。顧名思義，半導體是指電阻率（Resistivity）介於絕緣體（Insulator）和導體（Conductor）之間的物質。例如，在 27°C 時，銅的電阻率為 10^{-8} 歐·米（Ohm-metre），石英為 10^{12} 歐·米，而本章要介紹的半導體材料硅（Silicon）和鍺（Germanium）這時的電阻率分別為 0.5 歐·米和2300歐·米，可見半導體的電阻遠小於絕緣體而遠大於導體。實驗表明，半導體的電阻率隨着溫度的升高而減小。爲了認識半導體及其器件的工作性能，我們需要對物質的原子結構的一些基本概念有所了解。

原子理論簡介

自然界存在的一切物質都是由一個或多個元素（Element）所構

成。我們把包含一個以上元素的物質稱為化合物 (Compound)。元素是指既不能通過普通的化學作用加以分解 (分解成一些其他物質)，也不可能通過其他一些物質的化學組合而予以形成的物質。化合物是由兩種或多種不同元素化合而成，而且它的性質與構成它的元素的性質有所不同。例如水是氫和氧的化合物，它的性質顯然與氫和氧都截然不同。各種物質能獨立存在的最小單元稱為分子 (Molecule)，分子保留着它所組成的物質的一切特性。例如，過氧化氫 (Hydrogen peroxide) 分子是由兩個氫原子和兩個氧原子所構成，一氧化碳 (Carbon monoxide) 分子是由一個氧原子和一個碳原子所構成，二氧化碳 (Carbon dioxide) 分子是由兩個氧原子和一個碳原子所構成，等等。化學元素的最小組成單元是原子 (Atom)。任何一種特定元素的一切原子都有相同的平均質量，而且這個平均質量不同於任何其他元素的原子的平均質量。

現在已經發現的各種元素，根據它們的化學性質排列，便形成元素周期表 (Periodic Table of the Elements) (見表 1-1)，其中性質相似的元素垂直排列在同一欄內。當今科學上已知的元素有 100 多種；其中的一些元素分佈地區很廣，例如氫、氧和碳等，而像金、鈾和鐳等則比較稀罕。有的元素自然界中並不存在，是由原子物理學家利用特殊的設備用人工方法創造出來的。

任何元素的原子是由帶正電荷的原子核 (Nucleus) 以及沿着原子核周圍軌道高速旋轉的電子 (Electron) 所構成。每個電子具有一個電量等於 1.602×10^{-19} 庫倫 (Coulomb) 的負電荷 (稱為電子電荷 e)，而原子的電子數目恰好足以使原子的總電荷等於零。原子核含有一定數目 A 的粒子，我們稱之為核子 (Nucleon)。 A 是原子的質量數 (Mass number)。核子有兩種：一種是質子 (Proton)，每個質子具有 e 庫倫的正電荷；另一種是中子 (Neutron)，它不帶電荷。原子核裏的質子數目稱為該原子的原子序數 (Atomic number)，用符號 Z 表示；而中子數目簡稱為中子數 (Neutron number)，用符號 N 表示。於是可得出下列關係：

$$A = Z + N$$

各種元素的原子之間的區別在於構成原子的電子、質子和中子的數目和排列情況有所不同。各種元素之間的電子沒有任何不同之處。

氫原子

最簡單的原子是氫元素的原子，它的原子核裏只含有一個質子，原子核外面只有一個電子沿軌道作繞核運動（見圖 1 - 1 a）。氦原子是另一個最簡單的原子，如圖 1 - 1 b 所示，它的原子核含有兩個質子和兩個中子，原子核外面有兩個電子繞核運動。

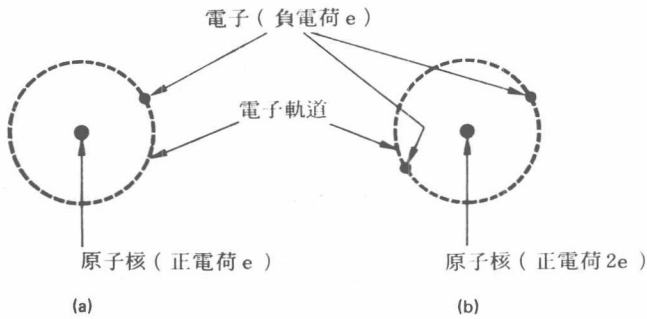


圖 1 - 1 氫和氦原子示意圖

爲了使電子能沿着圓形軌道圍繞原子核運動，如圖 1 - 1 所示，必須有一個力作用於電子，並把它拉向原子核。這個力是帶正電荷的原子核對帶負電荷的電子的電氣吸引力。要使電子在電場 (Electric field) 中運動必須作功，因此，使電子從原子核移到它的運動軌道也必須作一些功。可見，一個電子在它能處於原子核周圍的軌道上之前，必然具有一定的離散能量。電子只能處於某些特定半徑的軌道上，而且當處於其中的某一軌道上時，它必然具有與該軌道相連繫的特定能量。一個電子只能佔有如圖 1 - 2 所示的允許它佔有的幾個軌道之一。通常電子是在最靠裏的軌道上運動，因為這個軌道對應於最小能量，但如果通過某種方法，例如通過加熱使電子獲得額外的能量，則該電子就會轉移到另一個軌道上。電子只能吸收確定數量的能量，靠這一能量來使它的總能量提高到與另一個軌道相對應的數值，從而實現向該軌道轉移並在其中運動的過程。在新軌道中，電子將一直停留到它失去一些能量時爲止。電子只有在失去了確定數量的能量之後，才能重新返回到較低能級的軌道

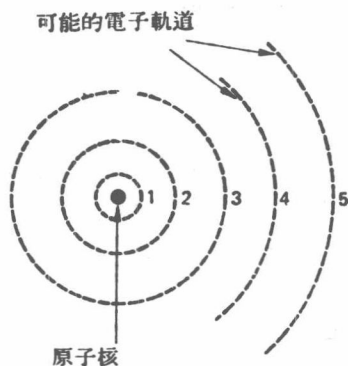


圖 1 - 2 氫原子裏電子可能佔有的一些軌道

上。這意味着電子只能吸收或失去離散數量 (Discrete amount) 的能量。

至此為止所給出的氫原子簡化模型還不能用來解釋所有觀察到的現象，需要把這個模型加以改變，設想電子也能沿橢圓形軌道運動（見圖 1 - 3）。橢圓形軌道可能有的數目等於 $n - 1$ ，這裏 n 是基本圓形軌道的序數。例如，最靠裏的軌道 $n = 1$ ，沒有橢圓形軌道與它發生連繫；第二個圓形軌道 $n = 2$ ，有一個橢圓形軌道與它發生連繫；其它依

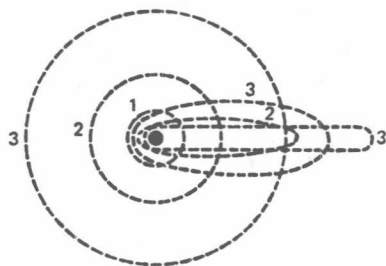


圖 1 - 3 氫原子中可能有的橢圓形電子軌道

此類推。我們把編號為 1、2、3 等的圓形軌道分別看作形成 K、L 和 M 殼 (Shell)，等等。而橢圓形軌道看作是在這些殼內部形成的副殼 (Sub-shell)。

其他原子

其他較複雜元素的核外結構，可準確地推演至原子序數為 18 的元素——氬 (Argon)，方法是對每一種元素依次加多一個電子；這時要記住的是，一個特定的殼中能容納的電子數目為 $X = 2n^2$ ，這裏 n 是殼的序數。例如，最靠裏的殼只能容納 2×1^2 即 2 個電子，第二個殼只能容納 2×2^2 即 8 個，第三個殼只能容納 2×3^2 即 18 個電子，等等。在一特定的殼中的各個電子沿着不同偏心率 (Eccentricity) 的軌道運動。在原子序數大於 18 時，周期系統中出現一些空缺，因為 N 殼中的一些軌道比 M 殼中的一些軌道具有較低的能量，所以先填入電子。

元素週期表如表 1-1 所示。

表中第 III 組各元素的原子有三個電子不屬於一個閉合的殼或副殼。以鋁為例，它有 13 個電子，其中 10 個填滿 K 和 L 殼，M 殼只有 3 個電子，沒有填滿（因為該殼需要 18 個電子才能填滿）。

鎳也屬於第 III 組元素，它有 49 個電子，其中 28 個填滿 K、L 和 M 殼，其餘 21 個電子當中有 18 個填滿 N 殼四個副殼中的三個，剩下的 3 個電子進入 O 殼 (N 殼的第四個副殼沒有電子填入)。因此，對鋁和鎳來說，核外結構 (Extra-nuclear structure) 是由一些緊密連繫的閉合的殼和副殼以及三個處在外軌道的電子形成的，這三個電子與原子核的連繫不緊密。

其他各種原子的電子結構也是由一些閉合的殼和副殼以及一些處在外軌道的電子形成的。原子核和閉合的電子殼和副殼可看成是帶正電荷的中心核，正電荷電量等於 $e \times n$ ，其中 e 為電子電荷， n 為中心核外的電子數目。某原子中心核外的電子數目等於元素週期表中該原子所屬的組的號數。於是在第 I 組裏的所有原子可畫成圖 1-4 a 的樣子，第 II 組裏的所有原子可畫成圖 1-4 b 的樣子，其他依此類推。

外層電子稱為價電子 (Valence electron)，對元素的性質起決定

表 | — |

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0
Hydrogen 氫 1 Lithium 鋰 3 Sodium 鈉 11 Potassium 鉀 19	Beryllium 鈹 4 Magnesium 鎂 12 Calcium 鈣 20	Boron 硼 5 Aluminium 鋁 13 Scandium 鈾 21	Carbon 碳 6 Silicon 矽 14 Titanium 鈦 22	Nitrogen 氮 7 Phosphorus 磷 15 Vanadium 鈮 23	Oxygen 氧 8 Sulphur 硫 16 Chromium 鉻 24	Fluorine 氟 9 Chlorine 氯 17 Manganese 錳 25	Iron 鐵 26 Cobalt 鈷 27 Nickel 鎳 28	Helium 氦 2 Neon 氖 10 Argon 氬 18
Copper 銅 29 Rubidium 鉀 37	Zinc 鋅 30 Strontium 銣 38	Gallium 鎵 31 Yttrium 釷 39	Germanium 鍮 32 Zirconium 鈷 40	Arsenic 砷 33 Niobium 鈮 41	Selenium 硒 34 Molybdenum 鉬 42	Bromine 溴 35 Technetium 錳 43	Ruthenium 鈳 44 Rhodium 銑 45 Palladium 鈀 46	Krypton 氪 36
Silver 銀 47 Caesium 鐳 55	Cadmium 鎘 48 Barium 鋇 56	Indium 銦 49 Rare Earths 57-71 稀土族	Tin 錫 50 Hafnium 鈪 72	Antimony 銻 51 Tantalum 鉭 73	Tellurium 碲 52 Tungsten 鎢 74	Iodine 碘 53 Rhenium 銲 75	Osmium 銱 76 Iridium 銱 77 Platinum 鉑 78	Xenon 氙 54
Gold 金 79 Francium 釷 87	Mercury 汞 80 Radium 鐳 88	Thallium 鉍 81 Actinide Series 89-100 錒系	Lead 鉛 82	Bismuth 鉍 83	Polonium 鉍 84	Astatine 鰐 85		Radon 氡 86

作用。

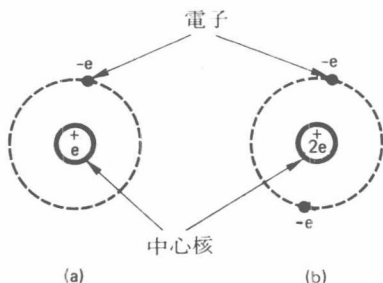


圖1-4 (a) 第I組原子和 (b) 第II組原子的表示法

本徵半導體

製造半導體器件，例如二極管和晶體管之類的器件所用的材料是硅和鍺。從表1-1可以看出，這兩種材料都屬於元素週期表的第IV組元素。硅和鍺元素的原子可表示為由帶 $4e$ 正電荷的中心核和四個分別帶 e 負電荷的繞核運動的電子所組成（見圖1-5）。本章下面將圍繞着硅來討論半導體的性質，所得結論對鍺同樣適用。這兩種材料的一些不同

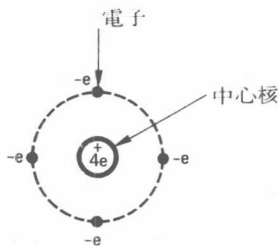


圖1-5 硅或鍺原子的表示法

點將在適當地方指出。固態硅的晶體呈金剛石型，亦即在它所造成的立體點陣（Cubic lattice）中，所有原子（除了位於表面的原子以外）與相鄰原子保持等距離。對晶體結構的研究結果表明，能與某一特定原子等距離相鄰，而且彼此之間也保持等距離的原子，最大數目是四。因此硅晶體中每個原子有四個相鄰原子。在晶體點陣（又稱晶格）中，每個原子利用它的四個價電子與相鄰原子形成共價鍵（Covalent bond）。每個共價鍵包含兩個電子，其中每個電子分屬於一個原子，如圖1-6a所示。每對電子沿着圍繞其母體原子和一個相鄰原子的軌道運動。每個原子有效具有四個額外電子，而這些電子足以填滿它最終的副殼。以下爲了簡化起見，共價鍵將按圖1-6b所示樣子畫出。

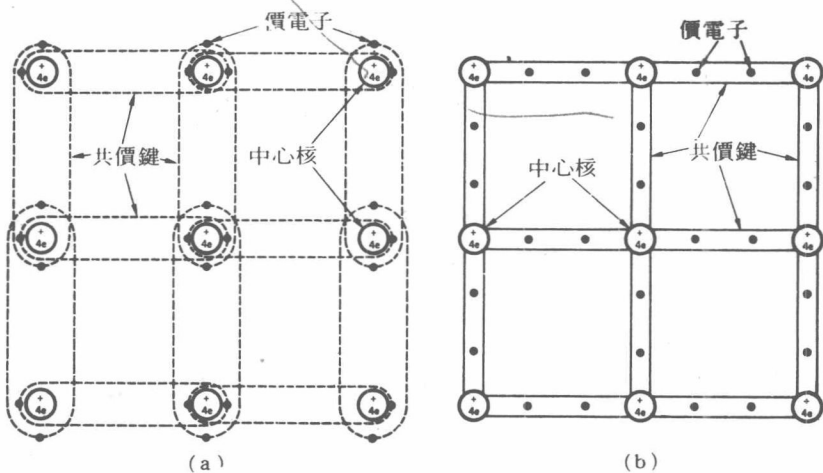


圖1-6 原子的共價鍵

晶體溫度在絕對零度以上昇高時，晶體點陣受到熱激勵，有些價電子吸收到足夠能量來克服共價鍵的束縛。出現這種情況時，解放出來的電子就在晶體裏作不規則運動，遇到外加電場時，這些電子能量進一步增加，從而有助於電氣傳導。溫度進一步昇高時，有更多的共價鍵瓦解，自由電子增多，硅的導電性能跟着提高。換句話說，半導體材料的電阻溫度系數（Temperature coefficient of resistance）是負的。

一個電子擺脫共價鍵的約束以後，就留下一個「電子空位」，而該電子帶負電荷 e ，這從效果上看，就相當於空位是由正電荷 e 所構成。這種正電荷稱為空穴 (Hole)。空穴對電子具有吸引力，能被在附近通過的、先前已從別的共價鍵解放出來的電子所填充。這種過程稱為復合 (Recombination)，它造成空穴和電子的不斷消失。在任何給定溫度下，空穴和電子的復合率總是等於新的空穴和電子的產生率，因此空穴和自由電子的總數是恆定的。

共價鍵遭到破壞時，我們就說產生了空穴電子對。空穴和電子被稱為帶電粒子或載流子 (Charge carrier)。載流子的壽命是指它的產生和它與另一個符號相反的載流子復合之間所持續的時間。

空穴通過晶體點陣的運動

圖 1-7 表示由於熱騷動而使共價鍵遭到破壞的部分晶體。在圖 1-7 a 中，晶體點陣的熱騷動使一個共價鍵瓦解，並在 A 點產生一空穴電子對。再過一瞬間，在 B 點產生第二空穴電子對，於是在晶體點陣中產生了兩個自由電子 (見圖 1-7 b)。在圖 1-7 c 中，電子 2 跑到很接近第一個空穴的地方，在後者電場的作用下發生了復合。原先的空穴顯然已從 A 處移到 B 處，然而與此同時在 C 處又產生第三空穴電子對。最後，在圖 1-7 d 中，自由電子 3 已穿越晶體點陣，並已在 B 處與空穴復合，其效果等於一個空穴已從 A 點通過晶體點陣移到了 C 點。

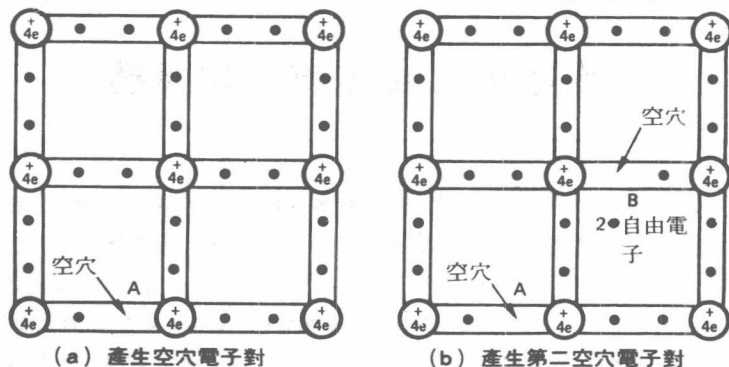


圖 1-7 空穴通過晶體點陣的運動

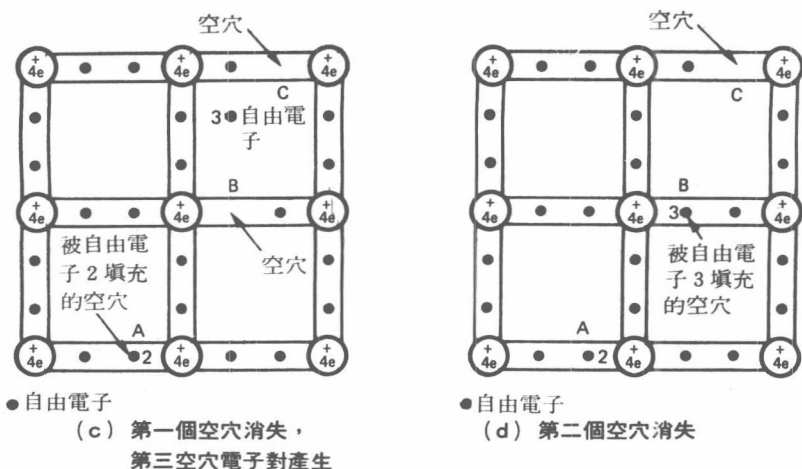


圖 1-7 空穴通過晶體點陣的運動

空穴和電子通過晶體的運動是很不規則的，然而空穴的運動要比電子慢。（這是因為空穴在某一特定方向的運動實際上是由一系列沿相反方向電子的不連續運動構成的。）如果在晶體裏建立起電場，電子就趨向於沿電場方向漂移，空穴則趨向於沿相反方向漂移。於是在純正的半導體中就產生電流的傳導，我們稱之為本徵導電 (Intrinsic conduction)（電流方向傳統上看成與電子流方向相反）。本徵導電能力隨溫度而提高，對於鍺來說，溫度每昇高 1°C ，本徵導電能力提高 5%，對於硅來說為 7%。

非本徵（含雜質）半導體

如果在硅晶體中經過仔細控制摻入極少量的雜質元素 (Impurity element)，則每個雜質原子在晶體點陣中將取代一個硅原子的位置。由於雜質原子數量遠少於硅原子（大約為 1 比 10^8 ），故有理由認為晶體點陣基本上不受干擾，而且每個雜質原子被四個硅原子所包圍。實際上，雜質總是選擇元素周期表中第 III 或第 V 組裏的元素來充當，亦即是一些具有三個或五個價電子的元素。典型使用的雜質元素，第 V 組裏有砷

(Arsenic)、銻 (Antimony) 和磷 (Phosphorus)，第Ⅲ組裏有銾 (Indium)、鋁 (Aluminium) 和鎵 (Gallium)。把雜質原子摻入硅晶體的過程稱為「摻雜」 (Doping)，經過摻雜處理的半導體就叫做非本徵或含雜質半導體 (Extrinsic or impurity semiconductor)。

n 型半導體

假設硅晶體已摻有很少量的磷 (它是有五個價電子的元素)。每個磷原子將與它周圍的四個相隣硅原子建立起共價鍵，然而為此目的只需要磷出四個價電子，因此，磷就有一個價電子多出 (見圖 1 - 8)。此多餘價電子不受它的母體原子的束縛，能在晶體點陣中自由運動。

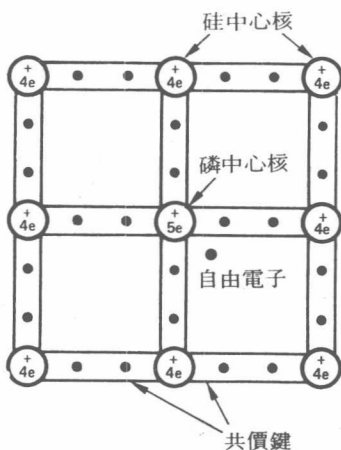


圖 1 - 8 n 型硅晶體點陣

硅晶體點陣中每摻入一個雜質原子就有一個自由電子產生，而沒有相應的空穴生成。不過，晶體點陣的熱騷動仍然會產生空穴電子對。結果晶體中自由電子數量遠大於空穴數量，負電荷佔優勢，我們把這種晶體稱為 n 型半導體。由於每個雜質原子施給晶體一個自由電子，故這種雜質原子稱為施主原子 (Donor atom)。

p 型半導體

如果用第Ⅲ組元素例如硼來代替磷摻入硅晶體，則每個硼原子將試圖與它相鄰的四個硅原子分別建立共價鍵。然而硼只有三個價電子，所以只能建立三個完整的共價鍵（見圖 1 - 9）。於是，每個雜質原子在晶體點陣中能產生一個空穴，此空穴在晶體裏也能像熱騷動造成的空穴那樣地運動。在這種情況下，空穴佔多數，晶體稱為 p 型半導體，而雜質原子稱為受主原子（Acceptor atom）。

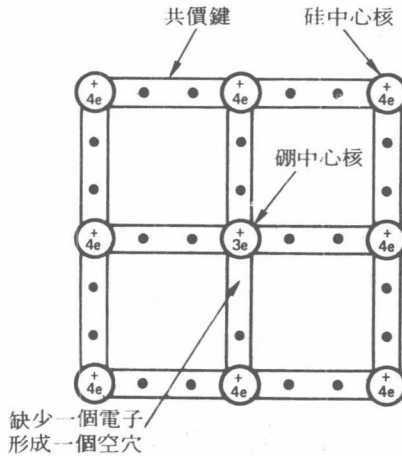


圖 1 - 9 p 型硅晶體點陣

n 型或 p 型硅晶體是電中性的（Electrically neutral），因為摻入晶體點陣的每個雜質原子本身是中性的。在 n 型材料中，電子是多數載流子（Majority charge carrier），空穴是少數載流子（Minority charge carrier），而在 p 型材料中，電子是少數載流子，空穴是多數載流子。

電流

如果在非本徵半導體兩端維持一個電位差（見圖 1 - 10），則有一

股漂移電流 (Drift current) 將從材料的一端流入，而從材料的另一端流出。帶正電荷的中心核不能離開其在晶體點陣裏的位置，所以流入材料的電流只能是流出材料的電子流所構成，而流出材料的電流事實上是流入材料的電子流所構成。

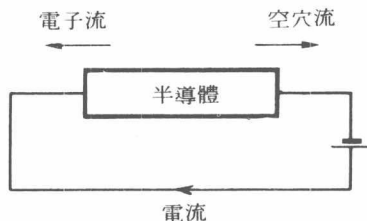


圖1-10 非本徵半導體的電流

P-n 結

如果硅晶體一端摻入施主原子，另一端摻入受主原子，則該晶體將同時具有 p 型和 n 型區，而且兩個區域之間會有面結 (Junction) 存在。在圖 1-11 中，AA' 平面是 p-n 結；圖中為清楚起見只畫出自由電子和空穴。兩個區域裏都有兩種符號的載流子，但是在 n 型區電子佔多數，在 p 型區空穴佔優勢。兩個區域裏少數載流子與多數載流子相遇和復合的機率很高，所以少數載流子的壽命很短。

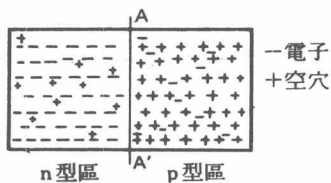


圖1-11 p-n 結的形成

自由電子和空穴的運動完全是隨機的，它們在晶體點陣中自由移動。然而，由於 $p-n$ 結左邊電子比右邊多，右邊空穴比左邊多，平均說來，從左邊越過 $p-n$ 結的電子比從右邊越過的多，從右邊越過該結的空穴比從左邊越過的多。因此，平均說來， n 型區獲得空穴而失去電子， p 型區獲得電子而失去空穴。這種過程稱為擴散 (Diffusion)，可定義為載流子從密度高的區域離開的趨勢。

由於 n 型區失去負載流子而得到正載流子， p 型區失去正載流子而得到負載流子，因此在緊靠 $p-n$ 結左邊的區域變為帶正電，右邊的區域變為帶負電。一個空穴進入 n 型區或一個電子進入 p 型區就成為少數載流子，它有可能與一個相反符號的載流子復合而消失掉。然而其中一個區域仍然失去了一個正（或負）電荷，另一個區域仍然獲得了一個正（或負）電荷。空穴或電子穿越面結的運動構成電流，這種電流稱為擴散電流 (Diffusion current)。

如果晶體在擴散過程發生前是中性的，則往後它也應該是中性的。此外，由於兩個區域原先也是中性的，它們在擴散過程發生後應該含有數量相等符號相反的電荷。這些電荷之間具有電的吸引力，它們不可能從面結附近擴散掉。這兩種電荷集中在緊靠面結的區域，並在面結兩端產生勢壘（又稱位壘）(Potential barrier)。這個勢壘的極性對多數載流子進一步越過面結擴散起阻礙作用，而對少數載流子的運動則起促進作用。結果就有一股與擴散電流方向相反的少數載流子電流出現。

從面結一邊到另一邊的電位差稱為勢壘的高度 (Height of potential barrier)，並以伏 (Volt) 作為測量單位。勢壘高度達到這樣的數值，即在它的作用下多數載流子（擴散）和少數載流子的電流相等，所以通過面結的淨電流為零。任何進入面結兩邊勢壘有效作用區域內的載流子很快都會被「清除」掉，因此這個區域是耗盡載流子的，我們稱之為貧乏層或耗盡層 (Depletion layer)，它的電阻率比較高，厚度約為 0.001 毫米。

如果在 $p-n$ 結兩端施加外部電勢源，則面結的平衡狀態就遭到干擾，勢壘或者增高，或者減低，要看外加電勢如何而定。因為我們討論的硅晶體含有兩個低電阻率的區域，中間隔着一個高電阻率的區域即耗盡層，所以在晶體兩端施加電勢，其效果如同在耗盡層兩端直接施加該