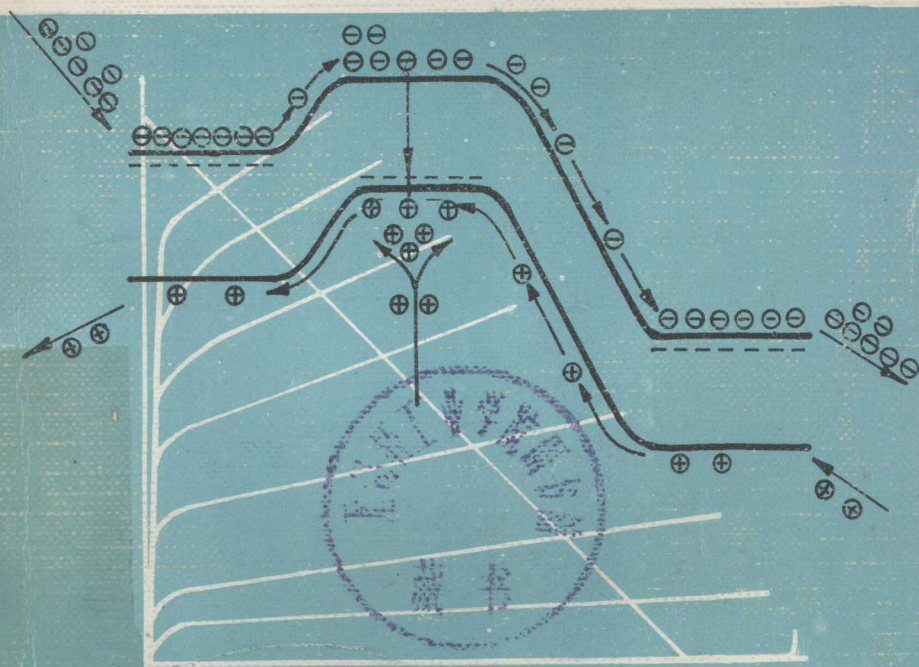


0394051

最新部訂專科課程標準

電子學 (上)

吳慶源 著
戴正芳

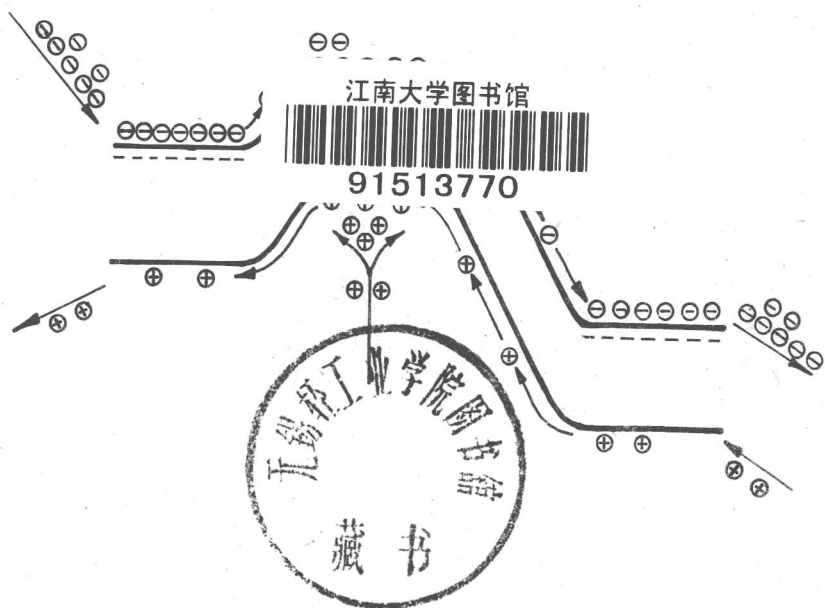


新學誠公局出版中心

最新部訂專科課程標準

電子學 (上)

吳慶源 著
戴正芳



新學城友出版中心

電子學 (上)

版權所有



翻印必究

- 科技為現代學術中心
- 工業為國家圖存利器。
- 工科大專為科技與工業的接點；
- 教學同仁于此接點散發無限光、熱！
- 教材則為發射光、熱的「能源」。

■ 著作者：吳慶源・戴正芳

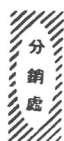
■ 發行者：張 瑞 鈐

■ 出版者：新學識文教出版中心

台北市新中街10巷7號

郵撥帳號：109262

電話：7656502 7656992



台北：重慶南路(力行書局)

台中：文華路(大學書社)

台南：博愛路(東華書局)

高雄：地下街(意文書局)

香港中區：21 WING WO ST.

1/F (啓文書局)

中華民國 68 年 5 月初版

基 價 5 元 角

中華民國 69 年 9 月第 2 版

編輯大意

- 本書係遵照教育部六十五(六)年公佈之五(二)年制工業專科學校電機科電子學教材大綱及編輯要點撰寫而成。本書共分兩冊，第一冊七章及第二冊八章，適合五(二)年制工業專科學校電機工程科一學年電子學課程教學的需要。
- 本書的內容排列及取材，相當新穎；適合大學電子、電機、外科系及工業界電子、電機工程師等專業人員參考及進修之用。
- 本書特別加強半導體元件及其積體電路規格的解說，及實用電路分析及設計所需的整體觀念，適合目前國內電子科技教育及適應國際電子快速發展之需。
- 本書撰寫付出極大心思，本着拋磚引玉的誠意，深盼各方隨時惠將疏漏之處予以指正。

序

綜觀國內十多年來電子工業的演進，實令人感慨萬千，感慨的是，我國電子工業仍然無法突破勞力密集的形態。根據筆者數年來的觀察，發現：十足長期沿襲已開發國家的科技教育模型，深值我們隱憂。此點與工商界人士時常感嘆：「國內的工業教育不能完全配合工業界的需要及發展」是互為因果的。在已開發的國家中，例如美國，大部份的公司及工廠，均具有良好的研究及開發部門，故其學校的工業教育，僅需灌輸基本學理及提供簡單實習即可。學生畢業後，與生產設計及開發有關的專業知識，均由公司負責訓練；更何況很多的工業生產及產品設計技術，均是日積月累，且大都列為公司機密無法外洩。反觀國內，工業基礎相當薄弱，工廠的生產技術及設計，不是全套買，就是違法仿照，毫無創新及長足競爭力的基礎可言。在此情況下，已開發國家中的教育法，其所培育出來的工程人員，的確很難替國內公司做設計及創新的工作；且國內現階段的公司規模，亦無此能力及環境可將這些剛出道的學子訓練成具有設計及創新的專才。在此種惡性循環下，國內純買技術的公司，僅一味地做裝配的工作；新進工程人員，亦因此無法獲得具有長期挑戰性的工作，只得到處跳槽找尋高薪待遇，以彌補失望中的最低滿足，或者，出國尋找當初所受科技知識的主流，進而大部份成為迷途的羔羊。

教育部有鑒於此，於民國六十五年，開始辦理一系列的大學及專科學校的評鑑，其中根據工專評鑑的結果，教育部技職司即網羅各組評鑑委員及工業界熱心人士，着手草擬全國專科學校的課程及設備標準，其主要良意即在彌補過去職教的缺失，並且順應國內工業未來的發展。

筆者有鑒於此，決心把過去十足專心電子尖端科技研究的無限精神、信心及毅力，撥假日及休閒時間，從事於電子科技叢書的撰寫，以多年來從事教學與研究的部份心得，本着拋磚引玉的誠意，貢獻給國內電子工業界未來的新血，及目前從事實務開發工作的工程人員，並以化繁為簡的手法及觀念謹慎撰寫，希望國內讀者建立起從事工業及科技研究所需的「自信」及「互信」精神。

本書僅是電子科技教科書中的一小部份，其內容及寫法讀者可與時下英文電子教科書作一比較，相信讀者及從事教學的同仁均能深受其益。最後，筆者要感

謝從事此一系列書籍印製完成的有關人員，其中包括：筆者家人，沒有她（他）們的鼓勵及容忍，本書無法順利撰寫；筆者的數十位博、碩班學生，沒有他（她）們聰明及銳利眼光的校對、閱讀及部份耐心抄繕，本書無法將不週之處減至最少；出版本書的中心及其負責人，沒有他（她）們的妥善安排，本書即無法印製及出版；採用本書的同仁及讀者，沒有他（她）們實地研習及批評指教，本書即無法推廣及獲得臻於完善的機會。

著者謹識於
國立交通大學工學院
半導體研究中心

第1章 半導體的物理特性和接面二極體 (1~34)

- 1 - 1 固態材料及半導體
- 1 - 2 常用半導體的晶體結構及種類
- 1 - 3 半導體的基本特性
- 1 - 4 半導體的基本導電特性
- 1 - 5 半導體的基本熱特性
- 1 - 6 半導體的基本光特性
- 1 - 7 $p - n$ 接面的形成
- 1 - 8 理想接面二極體的基本特性

習題一

第2章 接面二極體的特性及其應用 (35~96)

- 2 - 1 接面二極體的電流 - 電壓特性
- 2 - 2 接面二極體的接面電容
- 2 - 3 接面二極體的交換時間
- 2 - 4 接面二極體的轉換特性及等效電路
- 2 - 5 接面二極體的半波整流器及設計
- 2 - 6 接面二極體的全波整流器及設計
- 2 - 7 其他二極體全波整流器及其特性的比較
- 2 - 8 整流器的濾波線路及設計
- 2 - 9 接面二極體的定位器及倍壓器
- 2 - 10 接面二極體的訊號截割器及比較器
- 2 - 11 接面二極體的取樣開

習題二



第3章 特殊接面二極體及其應用 (97~130)

3 - 1 積納 (或崩潰) 二極體的特性及應用

3 - 2 透納 二極體的特性及應用

3 - 3 變容 二極體的特性及應用

3 - 4 蕭基 二極體的特性及應用

3 - 5 光二極體的特性及應用

3 - 6 太陽電池二極體的特性及應用

3 - 7 發光二極體的特性及應用

3 - 8 雷射二極體的特性及應用

3 - 9 變阻 二極體的特性及應用

習題三

第4章 雙極性電晶體之基本特性及測量 (131~170)

4 - 1 雙極性電晶體的基本結構及偏壓

4 - 2 雙極性電晶體的放大觀念

4 - 3 雙極性電晶體的共基極組態及其特性

4 - 4 雙極性電晶體的共射極組態及其特性

4 - 5 雙極性電晶體的共集極組態及其特性

4 - 6 典型雙極性電晶體的重要直流規格及其對溫度的變化

4 - 7 雙極性電晶體的約伯 - 摩爾模式及交換時間

4 - 8 光雙極性電晶體的特性

習題四

第5章 雙極性電晶體之偏壓、熱穩定及功率散逸 (171 ~ 214)

- 5 - 1 雙極性電晶體的工作點及固定偏壓電路
- 5 - 2 雙極性電晶體的自偏壓電路
- 5 - 3 雙極性電晶體的熱不穩定因素及偏壓電路的設計
- 5 - 4 雙極性電晶體的偏壓補償方法
- 5 - 5 雙極性電晶體的功率散逸
- 5 - 6 雙極性電晶體的熱穩定條件
- 5 - 7 功率電晶體的散熱裝置、材料及包裝結構

習題五

第6章 雙極性電晶體小訊號、低頻模式及其放大電路的分析 (215 ~ 288)

- 6 - 1 雙極性電晶體的等效電路模式
- 6 - 2 雙極性電晶體 H 參數的測量法及其變化曲線
- 6 - 3 雙極性電晶體三種基本放大器組態間的參數變換公式
- 6 - 4 雙極性電晶體放大電路 H 參數的精確及近似分析
- 6 - 5 密勒定理及其對偶定理的運用
- 6 - 6 雙極性電晶體的高輸入阻抗電路及其分析
- 6 - 7 雙極性電晶體放大電路之耦合電容及旁路電容的設計
- 6 - 8 雙極性電晶體的 RC 耦合串級放大電路及其低頻響應
- 6 - 9 雙極性電晶體變壓器耦合的串級放大電路及其低頻響應

習題六

第7章 雙極性電晶體小訊號、高頻模式及電路 (289~330)

- 7 - 1 雙極性電晶體共射極的混合 π 型模式及其參數
- 7 - 2 雙極性電晶體高頻共射極輸出短路的電流增益
- 7 - 3 雙極性電晶體高頻共基極輸出短路的電流增益
- 7 - 4 雙極性電晶體共射極的 Y 參數表示法
- 7 - 5 雙極性電晶體共射極放大器的高頻響應
- 7 - 6 雙極性電晶體射極隨耦放大器的高頻響應
- 7 - 7 雙極性電晶體 $R-C$ 耦合的串級放大器及其高頻響應
- 7 - 8 雙極性電晶體變壓器耦合的串級放大器及其高頻響應
- 7 - 9 雙極性電晶體的雜訊源及雜訊度

習題七



半導體的物理特性和接面二極體

幾乎所有近代科學與技術的進展，均仰賴於材料科學與工程技術的突破，尤其近代電子工業發展快速，對於材料的仰賴性更甚。目前，電子工業產品的核心是半導體元件 (semiconductor device) 及其積體電路 (integrated circuit; IC)，因此，一位電子工程的初學者，對於半導體材料的基本物理特性，必需具備基本的概念與認識。此種基本概念與認識，對將致力於電子裝置的應用與維護以及電子系統的設計者而言，將具有莫大的助益。在本章中，我們將根據原子的基本理論，探討固態材料的結構及其能帶 (energy band)，然後根據能帶的大小，以區分固態材料的基本種類，並分析半導體材料的基本物理特性。因為大部份的半導體元件及其積體電路均利用接面 (junction) 的形成，以得特殊的電氣特性，因此，對於接面形成的方法及接面的特性，我們亦將詳細地加以討論。

1-1 固態材料及半導體

我們知道，大多數的固態材料在結構上是呈晶體狀的。此種晶體的結構，可以利用 X - 射線繞射的方法加以觀察。依照 X - 射線繞射的實驗結果，我們可以

發現：一個晶體是由無數的原子或分子，在三度空間中作某種規則性的重複排列而組成，此種規則性排列的組成單元，可以是一個原子或多個不同原子所組成的分子。根據近代原子理論的學說，一個自由原子是由帶正電的質子、帶負電的電子、及不帶電的中子所組成，並且呈電中性。原子中的電子受庫倫力的作用，圍繞著帶正電的原子核（由質子和中子組成），作軌道性的運動。這些與質子數目（原子序）相同的電子，規則而穩定地分佈在各種不同能量的軌道上，有如太陽系內的行星群，圍繞著太陽作軌道性的運動一樣。因此，單原子內的電子，係依照固定的分佈組態，分別佔據着各種不同能量的軌道，這些不同能量的軌道稱為**電子的能階**（energy level）。每一能階內都含有固定數目的能態（energy state），依次以字母 s、p、d、f 來分組，各組內依次具有一、三、五、七個能態。在相同的能階內，不同組別的能態間仍有能量差異，此項能量差異的大小，隨原子種類及能態組別而有所不同，有的很小，幾乎測不出來。**根據波利不相容原理**（Pauli exclusion principle），能階內的每一個能態，只能容納一個電子或兩個不相同自旋量子數（spin quantum number）的電子。例如：碳原子（原子序等於 6）具有 6 個中子、6 個電子、及 6 個質子，其電子在能階上的分佈如圖 1-1 所示，其中第一及第二能階內的 s 能態均容納兩個電子；另兩個

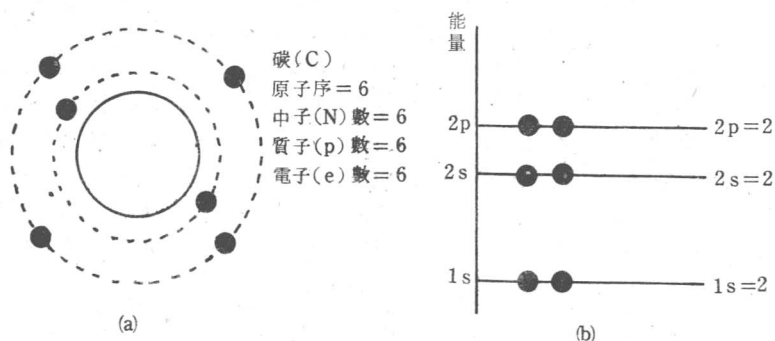


圖 1-1 (a) 碳原子的電子分佈組態；(b) 碳原子的電子在能階上的分佈

電子則佔有 2 p 三個能態中的二個。如果考慮自旋量子數的不同，則 s、p、d、f 各組內依次具有二、六、十、十四個能態，每一能態可容納一個電子。當我

們把相同的 N 個原子排列在空間中時，原子核與原子核、電子與原子核、電子與電子間會形成一種相互的作用力，此種作用力可以使各原子外層電子能階中相同能量的能態產生分離，分離能量的大小和原子間的距離及作用力大小有關。圖1-2(a)所示為 N 個碳原子的能階圖，其中內層的能階有 $2N$ 個 s 電子，填滿 $2N$ 個 $1s$ 能態，在圖內不予示出；外層的能階有 $2N$ 個 s 電子，填滿 $2N$ 個 $2s$ 能

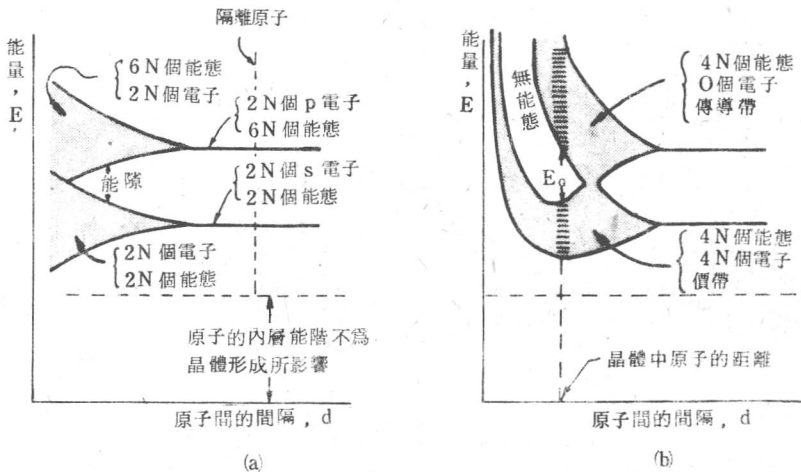


圖1-2 (a) N 個碳原子排列在一起，但原子間的距離較大時的能帶結構；
(b) N 個碳原子依照晶體的原子距離排列時的能帶結構

態，及 $2N$ 個 p 電子佔有 $6N$ 個 $2p$ 能態。當原子間の間隔 d 夠大時，各原子的能態沒有變化，因而重疊成一線；當原子間の間隔 d 很小且 N 很大時，外層能階分離的能態十分密集，呈帶狀，稱為能帶 (energy band)。 d 愈小，能帶的輪廓愈大。兩個能帶間沒有能態的區域稱為能隙 (energy gap)，能隙內沒有電子存在。至於內層能階，因為被外層能階所屏障，故能態不會有變化。當我們把無數的碳原子依照晶體的幾何構造排列時，上述的作用力會加強，使能帶的輪廓更形擴大，甚至還會相互重疊，如圖1-2(b)所示。其中， $4N$ 個電子填滿 $4N$ 個能態，而形成價帶 (valence band)； $4N$ 個能態沒有電子佔有，而形成傳導帶 (conduction band)。價帶與傳導帶之間也有能隙存在，其能量值為 E_g 。

晶體的導電性，大部份決定於原子最外層能階電子之特性，因為最外層能階上的電子，受原子核的作用力最小，比其他能階上的電子更易脫離能階而自由運動，以傳導電流。能帶也是原子外層能階所形成，因此根據能帶與能隙的特性，我們可以把固態晶體材料的導電性，以三種不同的能帶結構加以判別區分，如圖 1-3 所示。根據圖示，能帶分為價帶及傳導帶兩種，如果晶體不受外加因素如

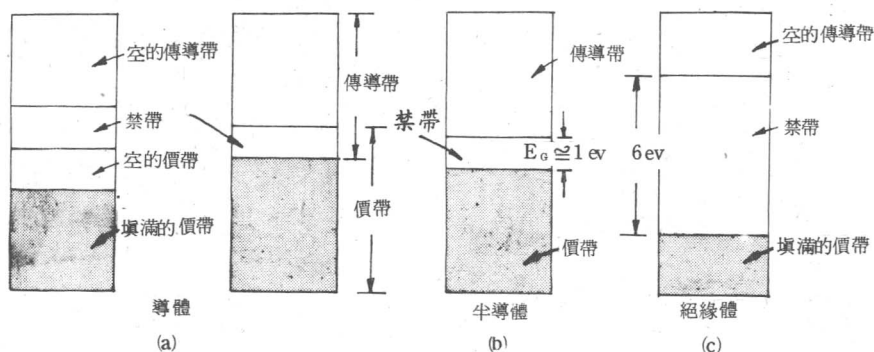


圖 1-3 簡化的(a)導體的能帶結構；(b)半導體的能帶結構；(c)絕緣體的能帶結構

光、溫度、電場等的作用，則所有的電子均填至價帶為止。價帶如果被填滿，根據波利不相容原理，價帶內的電子總數一定是偶數。如果晶體不受外加因素的作用，傳導帶是沒有電子的，但具有能態可供電子佔有。至於介於價帶與傳導帶之間的能隙或**禁帶**（forbidden band），因為沒有能態的存在，所以電子不能停留於其中。所謂**導體**，就是指價帶未填滿或傳導帶與價帶重疊，亦即能隙值等於零的物質。前者原子最外層能階的電子數目是奇數，例如鈉、鉀等鹼金屬，當外加少許的因素時，電子即能自由地在沒有填滿的價帶能態上運動，導電性佳，是良導體；後者原子最外層能階的電子數目是偶數，可以填滿價帶，但由於能帶重疊，使帶內少數電子會轉填入傳導帶，故真正導電的電子數目較少，導電性較金屬差，稱為**半金屬**（semimetal），鎂等鹼土金屬及銅等重金屬即屬此類。如果單元素晶體的價帶與傳導帶之間有一能隙存在，並且其最外層能階是填滿的，亦即電子數目是偶數，則此種材料不是絕緣體（insulator）就是半導體（semi-

conductor)。因為單元素晶體的偶數電子填滿整個價帶，傳導帶沒有任何電子存在，填滿價帶的電子由於沒有空的態留下，故不能自由運動，無法導電。如果價帶的電子要自由運動，則必需由外界獲得至少等於能隙大小的能量，才能跨過能隙而在傳導帶中自由運動，產生電流。因此，絕緣體與半導體的區分，通常是以能隙的大小 E_g 來決定。在室溫下，能隙的 E_g 值在4電子-伏特以下的材料，均被稱為半導體材料；而 E_g 值大於4電子-伏特的材料，均被稱為絕緣體材料。

如果我們以電阻係數的觀念區分固態材料，則導體的電阻係數大約介於 10^{-6} 至 10^{-3} 歐姆-厘米之間，例如金、銀、銅、鋁等導體；絕緣體的電阻係數則大於 10^{12} 歐姆-厘米，例如碳、二氧化碳、藍寶石等；半導體的電阻係數，依字面來看，應介於良導體與絕緣體之間。至於半導體材料能隙大小與電阻係數的關係，我們將於1-5節中討論。

1-2 常用半導體的晶體結構及種類

由於電子材料科學和技術的快速發展，目前被發現的半導體材料種類已不下百種，但具有實用價值，並且已為電子工業所大量採用的，僅有十幾種。半導體材料依其晶體結構可分為下列五類：(1)元素 (elemental) 半導體；(2) 化合物 (compound) 半導體；(3) 合金 (alloyed) 半導體；(4) 有機 (organic) 半導體；(5) 無定晶形 (amorphous) 半導體。其中最常用的半導體材料是元素半導體、化合物半導體、及合金半導體，現將此三種半導體材料，依其結構作一簡單的介紹：

元素半導體——元素半導體是指由單原子所組成，且具有半導體特性的晶體材料，例如矽 (Si) 及鍺 (Ge) 等。矽和鍺晶體的原子在週期表中佔第四行，係元素半導體材料中最重要者。矽與鍺的晶體呈鑽石結構 (diamond structure)，如圖1-4(a)所示；其單元細胞 (unit cell) 呈四方體 (tetrahedron)，如圖1-4(b)所示，其中四個原子所形成的四面體被包在參考用的虛線立方體內。矽與鍺的晶體結構，即由四面體的單元細胞在三度空間中作規則性的重複排列所形成，此種結構可以由圖1-4(c)所示的二度空間簡化圖表示之，其中每一個原子各有四個價電子 (valence electron)，而每一個價電子均與四個鄰近原子

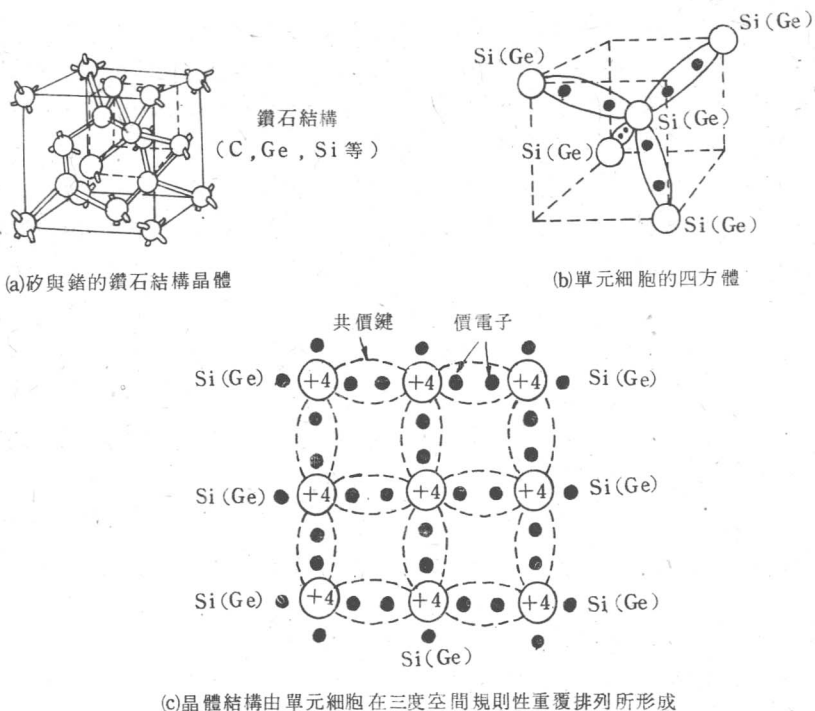
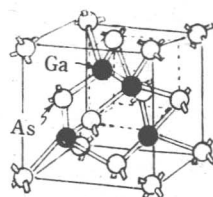


圖 1-4 晶體結構與四方體單元細胞的關係

的價電子結合，形成電子對 (electron pair) 或共價鍵 (covalent bond)。矽原子具有14個電子，鎢原子具有32個電子，兩者均具有偶數個電子，而且在室溫時，矽與鎢晶體的能隙值 E_g 分別為 1.12 及 0.72 電子-伏特，依照 1-1 節中所討論的材料區分，矽與鎢具有半導體的特性，因此，矽與鎢都是典型的元素半導體材料。

化合物半導體——化合物半導體是指由兩個不同元素的原子化合，且具有半導體特性的晶體材料，例如叁-伍價化合物中的**砷化鎵** (GaAs)、**磷化鎵** (GaP)、**氮化鎵** (GaN) 等；貳-陸價化合物中的**硫化鎘** (CdS)、**氧化鋅** (ZnO)、**硫化鋅** (ZnS) 等；肆-肆價化合物中的**碳化矽** (SiC) 等；肆-陸價化合物中的**硫化鉛** (PbS)、**碲化鉛** (PbTe) 等，其中砷化鎵是最重要的化



閃鋅礦狀結構
(GaAs , GaP , InSb 等)

圖 1-5 砷化鎵的晶體結構

化合物半導體材料。砷化鎵的晶體呈閃鋅礦狀結構 (zincblende structure)，如圖 1-5 所示，其中晶體的結構亦呈鑽石形，但每一單元細胞具有兩種不同的原子，因此砷化鎵除了具有共價鍵的結合外，尚具有少許離子鍵 (ionic bond) 的結合。通常，離子鍵的結合具有很大的結合力，結合力愈強的材料，其能隙值愈大，砷化鎵的能隙值在室溫時約等於 1.43 電子 - 伏特。重要化合物半導體的種類及其能隙大小，列於表 1-1 中，作為參考。

表 1-1 重要化合物半導體的種類及其能隙值

化 合 物	半 導 體 名 稱	能隙值 (300°K) (電子 - 伏特)
叁 - 伍價	砷化鎵 (GaAs)	1.43
	磷化鎵 (GaP)	2.24
	氮化鎵 (GaN)	3.5
貳 - 陸價	硫化鎘 (CdS)	2.42
	氧化鋅 (ZnO)	3.2
	硫化鋅 (ZnS)	3.6
肆 - 肆價	碳化矽 (SiC)	3
肆 - 陸價	硫化鉛 (PbS)	0.41
	碲化鉛 (PbTe)	0.32