

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電子電路

編 著 者

姚靜波 曲毅民 丁愛明

(上冊)

興業圖書股份有限公司印行

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電子電路

編著者

姚靜波 曲毅民 丁愛明

(上冊)

興業圖書股份有限公司印行

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電子電路

編著者

姚靜波 曲毅民 丁愛明

(上冊)

興業圖書股份有限公司印行

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電子電路

編著者

姚靜波 曲毅民 丁愛明

(上冊)

興業圖書股份有限公司印行

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電子電路

編著者

姚靜波 曲毅民 丁愛明

(上冊)

興業圖書股份有限公司印行

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電子電路

編著者

姚靜波 曲毅民 丁愛明

(上冊)

興業圖書股份有限公司印行

本書遵照教育部專科學校課程標準編著

電子電路

編著者

姚靜波 曲毅民 丁愛明

(上冊)

興業圖書股份有限公司印行

中華民國六十七年三月出版

電子電路

編著者：姚靜波
曲毅

發行人：丁志康
王愛明

登記證：局版台業字第〇四一〇號
出版者：興業圖書股份有限公司
發行所：興業圖書股份有限公司

：台南市勝利路一一八號

電話：三七三二五三號
郵撥：南字三一五七三號

版權所有
翻印必究

定價：上冊 120 元

編輯大意

1. 本書遵照教育部 65 年頒佈最新專科學校課程標準編纂而成。
2. 全書分上下兩冊，內容力求理論與實例並重，灌輸電子科學生基本電子學和電子電路之設計理論基礎，以配合本科專業專門課程之進展。
3. 本書編者乃利用授課之餘編寫而成，編印時間匆迫，錯誤之處在所難免，祈先進隨時不吝賜教是幸！

編著者 謹識

本書編者之主要參考書

- 1 Nashelsky 著 Electronic Devices And circuit Theory.
- 2 Millman and Halkis 著 Electronic devices and circuit.
- 3 Millman and Halkis 著 Integrated Electronics.
- 4 Coughlin 著 Principles and Applications of Semiconhuctors and circuit.
- 5 Allen Mottershead 著 Electronic Devices and circuits.
- 6 Lurch 著 Fundamentals of Electronics.
- 7 張 燿 著 電子學
- 8 梁 振 坤 著 積體電路

目 錄

第一章 半導體之基本物理特性和接面二極體

1—1	電子伏特	1
1—2	能帶及能隙	1
1—3	絕緣體、半導體、導體之區別	2
1—4	鍺與矽之原子結構	3
1—5	N型和P型物質	5
1—6	P—N結合體	7
1—7	半導體之溫度係數	12

第二章 二極體之基本特性和線路應用

2—1	理想二極體	14
2—2	載入電壓	16
2—3	二極體電路	17
2—4	二極體片段等效電路	19
2—5	二極體內之電容效應	20
2—6	二極體之交換時間	21
2—7	截波器與鉗位器	23
2—8	比較器	29
2—9	取樣閘	30
2—10	整流器	31
2—11	濾波器	43
2—12	倍壓器	62

第三章 其他接面二極體元件和應用

3-1	稽納二極體	71
3-2	稽納二極體之特性	71
3-3	稽納二極體之等效電路	72
3-4	電壓調整電路之設計	76
3-5	透納二極體	78
3-6	蕭克萊二極體	80
3-7	二極體變容器	81
3-8	光動作二極體	82
3-9	太陽電池	82
3-10	熱電阻	83
3-11	發光二極體	85
3-12	字母數字的顯示	87
3-13	光耦合器	88

第四章 普通放大器之特性及測量

4-1	放大之概念	92
4-2	放大器之常用符號	93
4-3	電流、電壓及功率增益	94
4-4	放大器之輸入電阻	95
4-5	放大器之輸出電阻	96
4-6	放大器功率之最大輸出	98
4-7	放大器之轉換效率	98
4-8	放大器之分類	99
4-9	諧波失真	100
4-10	諧波失真的計算「三點法」	101
4-11	諧波失真的計算「五點法」	103

4—12	諧波失真的測量	106
4—13	放大器其他型式的失真	108
4—14	分貝	108
4—15	用以計算分貝值之其他方程式	110
4—16	零分貝的參考位準	112
4—17	利用電壓表爲分貝值指示計	113
4—18	電壓表各測量範圍之校正因數	115
4—19	阻抗的校正因數	115
4—20	頻率響應曲線	116
4—21	放大器之波帶寬	118
4—22	輸出功率表的使用	118
4—23	方波測試	120
4—24	听覺響應，響度位準	121
4—25	放大器的各種規格說明	123

第五章 雙極性電晶體之基本特性及測量

5—1	電晶體的結構	127
5—2	電晶體之工作	128
5—3	典型電晶體接面電壓值	139
5—4	電晶體特性曲線之解析式	141
5—5	電晶體最高額定電壓	146
5—6	光電電晶體	148
5—7	電晶體之交換時間	152
5—8	電晶體之構造	155
5—9	電晶體之包裝形狀和端點之識別	157

第六章 電晶體之偏壓及熱穩定

6—1	共基極偏壓電路	161
-----	---------	-----

6—2	共射極偏壓電路.....	165
6—3	共集極偏壓電路.....	176
6—4	直流偏壓之圖形分析.....	179
6—5	電晶體之偏壓及其熱穩定.....	187
6—6	穩定因數之定義.....	188
6—7	穩定因數之計算.....	190
6—8	偏壓電路之設計.....	197
6—9	穩定操作點之偏壓補償.....	202
6—10	熱穩定度.....	203
6—11	功率放大器之散熱裝置及包裝結構.....	205

第七章 電晶體小信號低頻等效電路及放大器響應

7—1	電晶體片段式線性等效電路.....	215
7—2	電晶體混合等效電路.....	219
7—3	h 參數之圖解決定法.....	223
7—4	h 參數之實驗決定法.....	228
7—5	電晶體參數之變動.....	230
7—6	利用混合等效電路的基本電晶體放大器之小信號 分析.....	232
7—7	利用混合等效電路及其有關方程式所經常應用的 近似法.....	249
7—8	近似的基極、集極、射極等效電路.....	265
7—9	戴維寧定理與諾頓定理.....	271
7—10	米勒定理及其對偶定理.....	272
7—11	串聯電晶體放大器.....	276
7—12	電阻電容耦合放大器.....	281
7—13	變壓器耦合放大器.....	285
7—14	達靈頓複合組態.....	287

7-15	放大器的頻率響應.....	291
7-16	射極旁路電容之低頻響應.....	293
7-17	電阻電容耦合放大器的低頻響應.....	296
7-18	變壓器耦合放大器的低頻響應.....	297

附 錄

A	混合參數——轉換方程式.....	303
B	漣波因數和電壓計算.....	306
C	圖表和數表.....	310

第一章 半導體之基本物理特性和接面二極體

1-1 電子伏特 (Electron Volt—eV) :

焦耳乃MKS中之能量單位。實用上某些工程動力問題中，此單位往往嫌小，故常以 10^3 或 10^6 倍數分別將瓦特（焦耳／秒）轉變為仟瓦（Kilowatts—kw）或兆瓦（Megawatts—Mw），但在其他問題中，焦耳又嫌太大，而採用CGS單位爾格，就電子學上所用之能量，爾格依然嫌大，故採用電子伏特，其定義為，若一電子由1伏之電位落下，則其動能增加量（位能減少之量）稱為1 eV即：

$$qV = (1.6 \times 10^{-19} \text{ 焦耳} = 1 \text{ eV} \dots\dots\dots (1-1))$$

下面討論能階中之能隙 E_g ，即採用電子伏特為能量單位。

1-2 能帶及能隙

(Energy Bands and Energy Gaps) :

就電的性質而言，半導體要比一般導體複雜的多，因此欲了解半導體，必須先研究其原子結構及其形成之能帶與能隙，即半導體之導電可由另外一個角度來說明之。當一個原子被隔離的時候，其軌道上電子，由包利（Pauli）排斥原理知必各具其一定能量，稱謂能階（Energy level），各電子之能階視其所在規道而定，較大規道上的電子具有較高的能階。而電子僅能存在於幾個固定能階的軌道上，不可能存在於軌道外任何地方。

在半導體結晶體中由於原子與原子間相靠甚緊之故，鄰近原子的存在會使允許能階（Allowed Energy level）發生變化。原先的

2 電子電路

允許能階一變而為允許能帶 (Allowed Energy Band)。允許能帶中才有電子的存在。其他能帶則為能隙。

能帶中較重要者為價帶 (Valence Band) 和傳導帶 (Conduction Band)。傳導帶比價帶能量高且二者間被能隙分開。其間關係如圖 1-1 所示。

絕對零度下本質半導體所有的價電子都在價帶之內。當溫度升高後，一些價電子將獲得足夠的能量而成為自由電子，這相當於從價帶跳至傳導帶。自由電子抵達傳導帶後就同時在價帶產生新的電洞。能

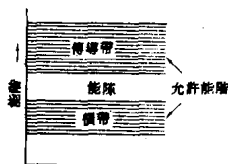


圖 1-1 半導體中能隙及重要的能帶分佈情形

隙的能量就是一個價電子突破共價鍵所須獲得的最低能量。矽的能隙約為 1.1 eV ；鎢約為 0.7 eV ，在絕對溫度零度下的本質半導體價帶是被充滿的，而傳導帶全部都是空的，故如絕緣體一樣不能導電。當溫度升高之後傳導帶內部份被自由電子填充，價帶部份中空而可導電。

蕭克萊 (W. Shockley)

曾把此情況比作一個雙層車房，如圖 1-2 所示。底層相當於價帶而上層相當於傳導帶。若底層排滿車輛而上層空着的話，下層車子全都無法活動，如圖 1-2

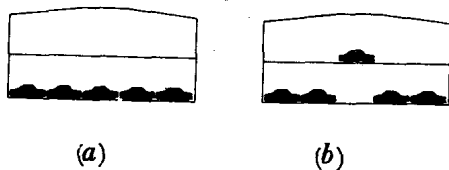


圖 1-2 半導體內的導電與車房之情形相似

a 所示。若其中一輛被移動至上層如 1-2 *b* 所示，此刻則上下兩層的車子就有活動之餘地了。

1-3 絕緣體、半道體、導體之區別

依能帶結構之不同，一切物體其對電的特性可分為三類：極差之導電體稱為絕緣體、導電極佳者稱為導體，導電性介於兩者之間者稱

爲半導體。茲以能隙之區別分述如下。

絕緣體：如鑽石（碳）晶體。其價帶層內全部充滿，且所有電子都緊緊地與核子結合在一起。與傳導帶之間形成甚大之能隙（禁帶），此相當大之能隙將擠滿之價帶與空虛之傳導帶完全隔開如圖 1-3 (a) 所示，通常由於外加電場供給電子之能量太小，不足以使電子由擠滿之價帶跳入傳導帶，因電子不能由外加電場獲得足夠能量，以致不能使電子傳導，故鑽石爲絕緣體。

半導體：能隙較小的物質如圖 1-3 (b) 所示，常用之半導體材料爲鎢與矽，在 $0^{\circ} K$ 時其各別之能隙寬是 0.785 和 $1.21 eV$ 。一般外加電場不能供給如此大之能量，所以價帶保持所有的電子，傳導帶仍是空的，在低溫時這些材料爲絕緣體。然而當溫度升高時，其傳導性隨之增加。即有些價電子因爲所吸收的熱能超過能隙之阻力而跳至傳導帶變爲自由電子，此刻只要外施一個很小的電場就可使這些電子運動，由於這些自由電子的存在，原是絕緣體的物質變爲有一點傳導性，因而就成爲半導體。

導體：包括部份填滿之能帶結構內可能無能隙之形成，如圖 1-3 (c) 所示，價帶和傳導帶重疊。在外加電場的作用下，電子可變得額外的能量而跳入較高之能階上，由於這種電子移動而形成電流這類材料稱爲導體，其特徵是其價帶和傳導帶相重疊中間無能隙之阻隔。

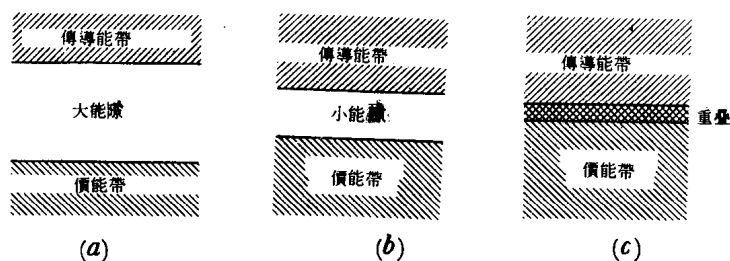


圖 1-3 不同材料的外殼層能階 (a) 絕緣體 (b) 半導體 (c) 導體

1-4 鎢與矽之原子結構

4 電子電路

銻與矽係兩種主要的半導體材料，為充分了解半導體活動狀態首先簡要地複習一下固態物理學是必要的。即由原子之基本結構開始討論。原子包含三種基本質點：電子、質子、和中子，在其結構圖上一波爾模型 (Bohr model)。中子和質子構成原子核，而電子依一定軌道環繞原子核旋轉，圖 1-4 所示為銻與矽的原子結構圖。銻原子有 32 個軌道電子，而矽原子有 14 個。兩者均有 4 個價電子在外層。欲移開任一個價電子，所需要之電位皆比結構上其他任何一個電子為低。在純銻和純矽之晶體中，4 個價電子均被鄰近之原子所束縛。如圖 1-5 所示，這種由共用電子結合方式，稱為共價鍵結合。雖共價鍵在價電子和其原子間，構成較強的結合，但價電子仍有可能從自

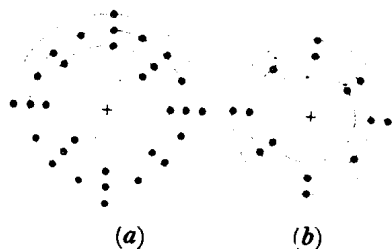


圖 1-4 原子結構

(a) 銻 (b) 矽

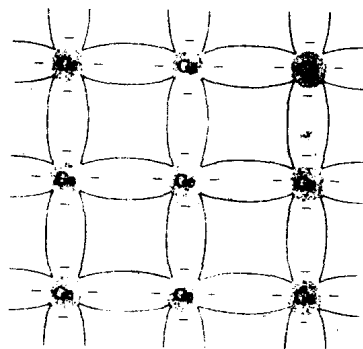


圖 1-5 銻原子之共價結合

然條件下吸收充分的動能來破壞其價鍵而變為自由狀態。這些自然條件包括光能電磁能，及周圍介質的熱能作用，在室溫下每 5×10^{10} 個銻原子約含一個自由電子，這些自然條件下，所產生之自由電子，當其離開價鍵時將產生一荷正電的電洞 (Hole)，在純銻或矽內自由電子與電洞的數目相同，此一組合稱為電子—電洞對，亦稱為本質載子 (Intrinsic Carriers)。

在半導體內電洞與電子同樣的為構成導電要素，而電洞是藉下述方式而對導電有所貢獻的，即當一共價鍵失去一個電子不完整時，因

而有電洞存在。電洞鄰近原子的電子較易脫離其本身共價鍵而來填補這個電洞。因而就在它的原處留下另一個電洞。這樣電洞等於在電子移動之反方向移動。這個在新位置的電洞又將被另一個共價鍵的電子來填充。即等於它又向電子移動的反方向更進了一步。故吾人得知有一不涉及自由電子之導電方式。如圖 1-6 所示，其中有黑點之圓圈代表完整鍵，而空圈代表電洞。圖 1-6(a) 表示有 10 個離子排成一列，在第 6 號離子有一斷鍵（電洞）。若第 7 號離子之電子移至 6 號離子之電洞內，則成如圖 1-6(b)

之組態，若吾人比較圖 1-6 將發現(b)圖中之電洞彷彿係(a)圖中之電洞向右移動（由 6 號移至 7 號離子

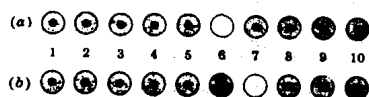


圖 1-6 電洞之導電機構

）。上述之討論指出：電洞在某一方向之移動實際上是電子在反方向

移動同一距離之傳輸。值得注意的是電洞流和電子流不一樣，造成電洞流的電子是從一個電洞跳至另一個電洞，它們並沒有足夠的能量成為自由電子。因此，自由電子的移動速度要比跳躍的電洞速度快。也就是說，自由電子有較高的移動率。

1-5 N型和P型物質

純鎢或矽之傳導性能並不佳，由於實際上的需要，我們往往在鎢或矽中加入不純物使其有較多的電子或電洞。在加入雜質之前必須提煉至較高之純度，以便作較佳之雜質濃度控制。純度之要求則視半導體種類及其用途而異，摻入之雜質濃度甚稀，通常是 $10^8 : 1$ ，雜質分為兩類，即五價和三價元素，前者稱前者稱N型雜質，後者稱P型雜質。雜質摻入後之物質稱為外質半導體 (Extrinsic semiconductor)。

N型物質是在鎢或矽元素中加入小許五價元素，如銻 (S₅) 砷 (A₅) 和磷 (P) 等所形成。如圖 1-7 所示為以鎢為基體，銻為

6 電子電路

雜質，我們注意到四個共價鍵電子依然存在，就是雜質原子所多出的第五個電子，並未和任何一個共價鍵相結合。這個多餘的電子，失去了母原子（鎢）之束縛，而較自由地在新形成的 N 型物質中活動。每當有一個五價之元素加入基體後即供給一個較自由的電子，故稱該雜質原子為施體原子（

Donor atoms）。我們知道雖然有很多的自由電子在 N 型材料中存在，但仍保持電的中性，因理想的結構上，原子核中的荷正電質子數仍和軌道上荷負電的電子數相等。此種摻入雜質後獲得大量自由載子的過程，稱為摻雜（Doping）。

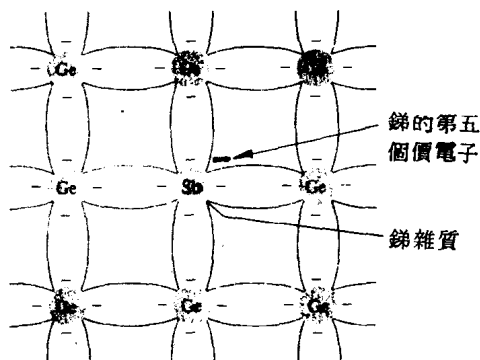


圖 1-7 n 型物質中的鎢雜質

P 型物質：係在純鎢或矽中摻入三價雜質（硼、鎵、銦等）原子而成，其中硼摻入基體鎢中之作用如圖

1-8 所示。在硼（Boron-B）四週新形成的晶體格子完成四個共價鍵結合却缺少一個電子，而形成一空位，稱為電洞（Hole），通

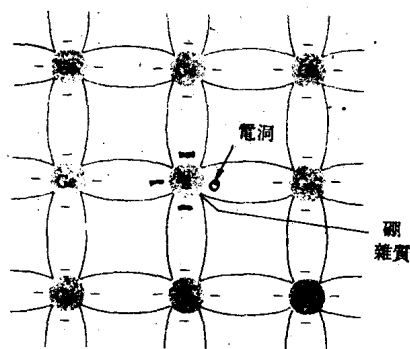


圖 1-8 p 型物質中的硼雜質

常以小圓圈或“+”號表示缺少一個電子產生之電洞，可接受一個自由電子，故三價雜質又稱為受體原子（Acceptor atoms），其所產生 P 型物質亦與 N 型物質一樣，仍保持電的中性。

由上述知 N 型物質中有較多之電子而 p 型中有較多之電洞如圖

1-9 所示，因而稱這些電荷載體為多數載體 (Majority carrier)。 N 型中之正離子和 P 型中之負離子，分別稱為施體和受體離子。 N 型中之電洞和負離子及 P 型中之電子和正離子純由基體 (Ge, Si) 本身所引起，並非製造過程中所產生的。因而為數甚少。故稱為少數載體 (Minority Carriers)。

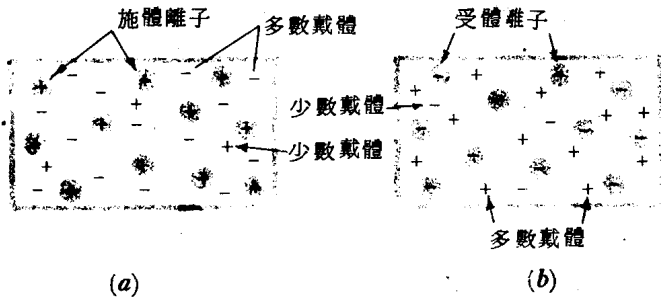


圖 1-9 (a) n 型物質 (b) p 型物質

1-6 P-N 結合體 (P-N junction)

半導體二極體係由 N 型和 P 型物質結合而成。如圖 1-10(a) 所示。當兩物質接合之瞬間，由於接面兩側有密度梯度存在，電洞就開始向接面右方擴散，而電子即向左方移動；在 p 型中之電洞與由 N 型邊穿過接面的擴散電子將結合，同理，在 N 型中的電子與 P 型邊穿過之電洞結合。這些電子電洞結和之結果，就有電場出現於接面之兩側，當電場強度大到足以限制這種擴散作用時，該接合體即呈平衡狀態。此刻接合面處無可移動之電荷存在，故稱為空乏區 (Depletion Region)，空間電荷區 (space charge region)，或過度區 (Transition region)。其電荷分佈之情形如 1-10(b) 所示。在接面處之空間電荷密度 ρ 為零，而接面右邊為正左邊為負。此種電荷分佈形成自左向右方向之電力線如圖 1-10(c) 所示為一負電場強度其曲線與電荷密度曲線之積分成正比。可由泊松 (Poisson's equation) 方程式表示之：