

# 電 晶 體 電 路

## 分 析 與 應 用

Transistor Circuit  
Analysis and Application

原著者 Ben Zeines

譯述者 謝 雅 全

科技圖書股份有限公司

# 電晶體電路

## 分析與應用

Transistor Circuit  
Analysis and Application

原著者 Ben Zeines

譯述者 謝 雅 全

科技圖書股份有限公司

# 目 錄

## 第一章 半導體二極體

1. 1	導言	1
1. 2	原子理論	2
1. 3	原子能鍵	5
1. 4	電子能階	5
1. 5	半導體	6
1. 6	外質電導	7
1. 7	N-型鍺	7
1. 8	P-型鍺	8
1. 9	半導體中的電傳導	8
1.10	PN 界面	9
1.11	偏壓考慮	10
1.12	二極體之作用	11
1.13	界面二極體負載線	16
1.14	變容體	17
1.15	稽納二極體	18
1.16	累增崩潰	19
1.17	稽納崩潰	19
1.18	透納二極體	21
	習 題	25

## 第二章 電晶體簡介

2. 1	PNP 電晶體	27
2. 2	NPN 電晶體	29
2. 3	電晶體符號	29
2. 4	射極、基極和集極電流	30
2. 5	$\alpha$ (ALPHA)	31

2. 6	特性曲線 .....	32
2. 7	射極曲線族 .....	33
2. 8	圖解分析法 .....	35
2. 9	動態轉移特性 .....	37
2.10	偏壓技術 .....	40
2.11	交流負載線 .....	45
2.12	偏壓穩定 .....	53
2.13	穩定因數 .....	54
2.14	非線型補償法 .....	58
2.15	通道接面場效電晶體 ( JFET ) .....	60
2.16	絕緣閘場效電晶體 ( IGFET ) .....	65
2.17	空泛型 FET .....	65
2.18	增強型 FET .....	67
	習 題 .....	69

### 第三章 小訊號放大器

3. 1	電晶體參數 .....	75
3. 2	混合參數 .....	80
3. 3	導納參數 .....	88
3. 4	JFET的等效電路 .....	89
	習 題 .....	93

### 第四章 電晶體電壓放大器

4. 1	導言 .....	95
4. 2	共射 RC 耦合放大器 .....	97
4. 3	低頻分析 .....	99
4. 4	米勒效應 .....	104
4. 5	故障修理分析 .....	111
4. 6	共源極放大器 .....	111

4. 7	中頻分析 .....	113
4. 8	低頻分析 .....	113
4. 9	高頻分析 .....	114
4.10	特性值 .....	118
4.11	串級放大器 .....	118
4.12	寬頻帶放大器 .....	120
4.13	調諧電壓放大器 .....	126
4.14	並聯諧振 .....	129
4.15	單調諧直耦放大器 .....	132
4.16	雙調諧變壓器耦合放大器 .....	138
4.17	故障修理分析 .....	143
4.18	FET 放大器之故障修理 .....	143
	習 題 .....	147

## 第五章 整流器與濾波器

5. 1	導言 .....	153
5. 2	單相半波整流器 .....	153
5. 3	單相全波整流電路 .....	158
5. 4	單相全波橋式電路 .....	162
5. 5	串聯電感濾波器 .....	163
5. 6	具有串聯電感濾波器的全波整流器 .....	165
5. 7	電容濾波器 .....	168
5. 8	LC 濾波器 .....	171
5. 9	濾波器輸入線圈的臨限值 .....	174
5.10	多段式 LC 濾波器 .....	177
5.11	$\pi$ 型濾波器 .....	179
5.12	故障修理分析 .....	182
5.13	電壓倍增器 .....	184
	習 題 .....	186

## 第六章 功率放大器

6.1	工作分類 .....	189
6.2	振幅失真 .....	193
6.3	設計上的考慮 .....	197
6.4	設計步驟 .....	198
6.5	熱考慮 .....	201
6.6	電晶體的電壓限制 .....	204
6.7	A類推挽放大器 .....	205
6.8	B類推挽放大器 .....	207
6.9	反相器 .....	212
6.10	故障修理分析 .....	213
6.11	C類放大器 .....	213
	習題 .....	215

## 第七章 回饋放大器與振盪器

7.1	導言 .....	217
7.2	回饋 .....	218
7.3	串聯回饋 .....	222
7.4	串聯回饋 (FET) .....	223
7.5	電壓回饋 .....	225
7.6	分路回饋 (FET) .....	227
7.7	複回饋 (FET) .....	229
7.8	運算放大器 .....	230
7.9	音質控制電路 .....	232
7.10	高音提昇 .....	233
7.11	低音與高音提昇的組合電路 .....	235
	習題 .....	238

## 第八章 正弦振盪器

8.1	導言	240
8.2	LC振盪器	241
8.3	排極調諧振盪器(FET)	245
8.4	柯耳匹茲振盪器	247
8.5	克雷卜振盪器	248
8.6	哈脫萊振盪器	248
8.7	調諧電路振盪器	249
8.8	FET調諧電路振盪器	252
8.9	晶體振盪器	254
8.10	故障修理分析	256
8.11	能相振盪器	256
8.12	維恩橋式振盪器	258
8.13	負電阻振盪器	261
	習題	264

## 第九章 調變

9.1	導言	268
9.2	調變特性	268
9.3	振幅調變	270
9.4	平方律調變	275
9.5	調變C類放大器	277
9.6	單旁波帶(平衡調制器)	280
9.7	單旁波帶傳輸的濾波器法	283
9.8	頻率調變(FM)	284
9.9	使用變抗電路的FM	286
9.10	FM系統	290
	習題	292

## 第十章 解調器

10. 1	平方律解調器 .....	294
10. 2	線型檢波器 .....	297
10. 3	線型檢波器的輸入阻抗 .....	301
10. 4	線型檢波器中的失真 .....	302
10. 5	故障修理分析 .....	305
10. 6	自動增益控制 .....	306
10. 7	調頻接收機 .....	309
10. 8	鑑頻器 .....	309
10. 9	比率檢波器 .....	313
10. 10	無線電接收機 .....	314
	習 題 .....	318

## 第十一章 接收機電路

11. 1	導言 .....	321
11. 2	基本的接收機電路 .....	322
11. 3	無線電接收機各部件 .....	323
11. 4	電路理論 .....	325
11. 5	中週(頻)放大器 .....	325
11. 6	自動音量控制(AVC) .....	327
11. 7	音頻放大器 .....	327
11. 8	B類工作 .....	327
11. 9	典型的超外差接收機 .....	330
11. 10	調頻接收機(FM) .....	332

## 附錄A 積體電路

A. 1	導言 .....	342
A. 2	晶膜 .....	343
A. 3	金屬化 .....	345
A. 4	積體電阻器 .....	345



A.5	積體二極體 .....	346
A.6	積體電路電容器 .....	348
A.7	包裝 .....	348
A.8	應用 .....	348
A.9	故障修理程序 .....	351

## 附錄B 系統故障修理

B.1	局限系統故障 .....	353
B.2	識別電晶體接腳 .....	356
B.3	電晶體測試 .....	357

## 附錄C 標準的色碼標示法

C.1	電阻器 .....	359
C.2	電容器 .....	360
C.3	變壓器 .....	362

參考文獻 .....	363
------------	-----

答 案 .....	366
-----------	-----

索 引 .....	369
-----------	-----

# 第一章

## 半導體二極體

# **SEMICONDUCTOR DIODES**

### 1.1 導言

在 1948 年時，半導體 ( semiconductors ) 的出現，擴展了電子技術的領域。在半導體出現以前，電子訊號放大 ( electronic signal amplification )、產生 ( generation )、整波 ( waveshaping ) 及交換 ( switching ) 等，一般皆由真空管 ( vacuum tube ) 進行處理。自 1948 年之後，半導體被證實當它們執行這些功能時，有着較高的效率。因此，在許多領域都以半導體取代真空管。

半導體的一些基本特性是：

1. 實體尺寸很小。
2. 機械性質較粗曠。

## 2 電晶體電路分析與應用

3. 壽命極長。

4. 無需燈絲電源。

研究半導體技術必須先了解物質結構的基本物理。

### 1.2 原子理論

現行的原子理論 ( atomic theory )，是說明物質乃由微小質點所構成，此微小質點即謂原子 ( atoms )。當一物質內含的所有原子皆為同類型原子時，此物質謂之元素 ( element )。若所含之原子不同，此物質稱為化合物 ( compounds )。化合物可再分割為成份元素 ( component element )，而元素則否。

原子又可細分成更小的質點，其結構類似太陽系。原子包含一原子核 ( nucleus )，原子核內含正電質點質子 ( protons ) 和許多不帶電荷的中子 ( neutrons )。原子核四週圍繞着許多負電質點稱謂電子 ( electrons )。目前被接受的理論是，電子以橢圓形軌道繞核運轉，有如行星繞太陽運轉一般。圖 1-1，為碳原子的結構圖。

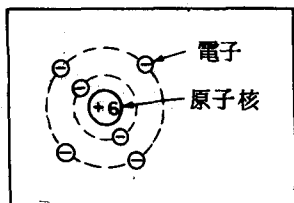


圖 1-1 碳原子

原子質量幾乎全集中於原子核。質子質量大約是電子質量的 1840 倍。另外，電子荷電量是  $1.6 \times 10^{-19}$  庫倫，大小等於質子荷電量，而符號則相反。

電子和質子間的吸力，剛好由軌道電子運轉速度產生的離心力抵消，而在它們之間維持一定的距離。此乃電子不會被原子核捲入，也不會溢出外界空間的理由。

因為每一元素的電子數及質子數都有其特定數目，故每一元素都是不相同的。

元素的原子序 ( atomic number ) 即為原子核內的質子數目。每一原子都含有一個或一個以上的軌道電子繞核子運轉。

物理學家們假定電子軌道路徑為三度空間。因此，殼層 ( shell ) 一語，即用來描述軌道的可能路徑。

殼層在本質上是有限的。一特定元素的電子必存在於某一殼層之內。殼層之間絕無電子存在。欲使電子自一般殼層跳至另一殼層，必須加上稱為量子 ( quanta ) 的不連續能量。量子能量，乃為此過程所需的最小能量。量子能量總額，必以整數倍存在，因量子不可能以分數形式存在。

外殼層稱為價殼層 ( valance shell )，它決定元素的化學活性。如果外殼層完全填滿，該物質即視為一純態，不起任何化學反應。另一方面一元素的未填滿外殼層，可導致化學反應以產生填滿外殼層的效應。此種作用，產生穩定化合物的分子，例如塩類，水等等。

每一殼層的電子容量，根據公式  $2n^2$ ， $n$  表殼層數，自零計數。因此第一殼層的最大容量是 2，第二殼層為 8，第三殼層為 18 等等。表 1-1 說明殼層內電子排列理論。

表 1-1 原子中之電子殼層排列

殼層	最大電子數
1	2 電子
2	8 電子
3	18 電子
4	32 電子
5	50 電子

殼層的電子分佈可由兩個基本規則求出。

規則 1：任一元素最外層的最大電子數不能超過 8。

規則 2：最外第二層的最大電子數不能超過 18。

#### 4 電晶體電路分析與應用

只要知道原子序，我們即可將電子排列成適當的殼層結構。茲用解答問題以說明該項理論。

範例：

銅原子序是 29。試求每一殼層的電子數。

解：

原子核含有 29 個質子與 29 個軌道電子。這些電子按序的排列為：

第一層—— 2 個電子

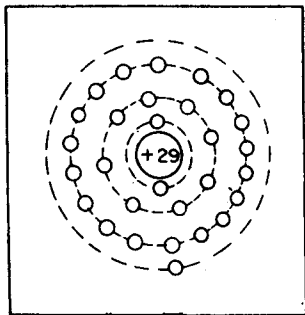
第二層—— 8 個電子

第三層—— 18 個電子

第四層—— 1 個電子

29 個電子

銅的原子結構為：



範例：

銀的原子序為 47。試求其原子構造。

解：

第一層—— 2

第二層—— 8

第三層—— 18

第四層—— 18

第五層—— 1

### 1.3 電子能鍵

某些元素具有穩定晶體結構的性質。此種內部的規則性造成元素顯示出線狀或面狀結構。在晶體結構中（稱為晶體格子）兩鄰近原子的價電子相連結，或謂共用電子（share electrons）。鍺和矽具有形成共價鍵的能力。圖 1-2 顯示鍺晶體的結構。

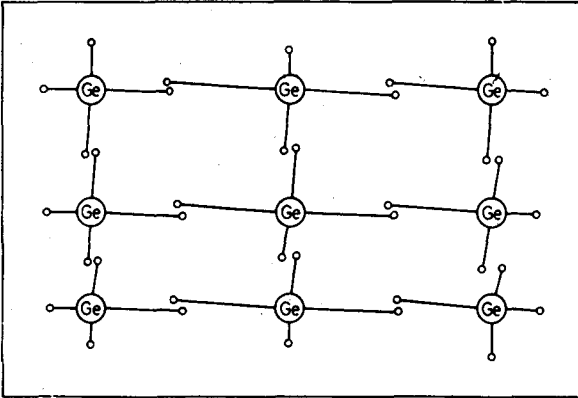


圖 1-2 鍺原子之共價鍵

自電子至原子核的直線代表原子核對其電子的吸力。注意，每個電子軌道，都以被兩原子共用的形式存在。

### 1.4 電子能階

電子相對於原子核的位置以決定這些電子的能階（energy level）。如果電子遠離原子核，僅須很小的能量即可將它變成自由電子。當電子位置移近原子核時，欲使電子脫離原子核則須大量能量。電子能量以電子伏特（electron volts,  $ev$ ）表示。一電子伏特（ $ev$ ）即電子經一伏特電位差時所獲得的能量。

爲了在一材料中造成電流，電子必須脫離它的原子鍵而轉入所謂傳導區（conduction region），外加  $emf$  所造成的電場可提供原子將電子自價帶（valence band）移去時而進入傳導區所需的能量。此種運動造成電流流動。

## 6 電晶體電路分析與應用

一般而言，所有元素可歸納成三個主要類別：1. 導體（conductors），2. 半導體（semiconductors），及3. 絕緣體（insulators）。

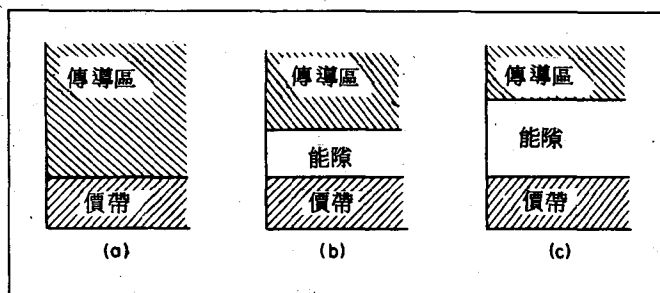


圖 1-3 能階圖：(a)導體 (b)半導體 (c)絕緣體

通常我們都以能階圖來說明這三種類別，示如圖 1-3。

在標為導體的能帶圖中，價帶與傳導區幾乎重合。在此種情況下，加上很小的能量（大約  $0.001 \text{ eV}$ ）即可將電子自價帶逸至傳導區。

半導體能帶圖顯示，在其價帶與傳導區之間有一能隙（energy gap）存在。因此，欲使價帶中的電子跳過能隙進入傳導區，必須加上相當的能量。（鎢大約為  $0.7 \text{ eV}$ ，矽為  $1.1 \text{ eV}$ ）。

至於絕緣體，其能隙顯得更寬。需加上更高的能量（大約  $7 \text{ eV}$ ）才能使電子越過能隙而進入傳導區。

### 1.5 半導體

鎢與矽是兩種經常用作電晶體工作的半導體。純鎢或純矽具有一內在特性：在電傳導發生之前，必須打破共價鍵。能量可藉熱能或光能形式加入。

當電子獲得足夠能量離開共價鍵時，它留下了一個稱為電洞（hole）的空位。此空位或稱電洞，具有可動正電荷的性質，電洞的運動與電子相反。因此，在純鎢或矽中，釋放一個電子，總隨著產生一個電洞。於是，半導體受熱能作用而產生電子-電洞對（electron-hole pairs）。於是，純半導體中的電導，稱為本質電導（intrinsic conduction）。

## 1.6 外質電導

爲了要使電晶體工作，我們必需控制半導體材料的性質。“雜質”(doping)就是在半導體材料加入某些雜質的過程。雜質對鎢的比值，是一個雜質原子對一千萬個鎢原子。使用的雜質可爲鋁、銻(indium)、鎵(gallium)，砷，或磷。

視使用雜質的種類，我們可以產生兩種類型的半導體：N型或P型。雜質原素的原子，在母體半導體材料的晶格(crystal lattice)中取代原子。這些雜質原子，稱爲施體(donor)雜質或受體(acceptor)雜質。

## 1.7 N型鎢

具有五個價電子的雜質(諸如砷、銻)，可按量加入鎢中。其結果顯示於圖1.4。

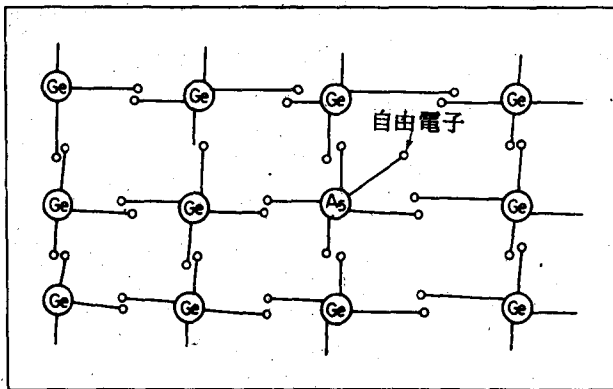


圖 1-4 摻入砷雜質之鎢晶結構

釋放過額電子所需的游離能(ionization energy)，小於純半導體中造成電導所需的能階。每個加入的五價雜質原子產生一過額電子(excess electron)，作爲電導之用。

除了施體電子外，在電導區內有來自電子-電洞對的自由電子，也有來自價帶內電子-電洞對的電洞。因此，在N型鎢中，電子名爲多數電流載體(majority current carriers)，電洞稱爲少數電流載體



## 8 電晶體電路分析與應用

( minority current carriers )。

五價雜質原子的加入或捐贈自由電子給半導體材料。故稱為捐贈雜質 ( donor impurity )。按此方式繪雜的半導體稱為 *N* 型半導體。用大寫字母 *N* 來表示。

### 1.8 P型鍺

三價雜質原子加入半導體的情形示於圖 1-5。

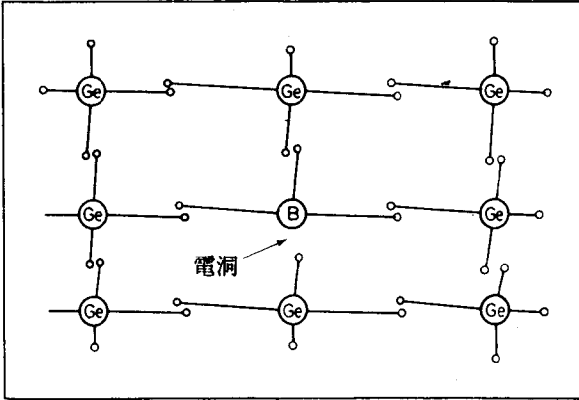


圖 1-5 摻入硼雜質之鍺晶結構

雜質原子含有三個價電子，加入半導體後即與鍺形成共價鍵。因為少了一個電子，此位置即變成常態下可由電子填入的空缺，我們稱為電洞 ( hole )。電洞具有正電荷，它可由鄰近原子偷取電子以填滿此空缺，而又創生另一電洞。電洞的運動便構成電流。

在鍺或矽中產生電洞的雜質，稱為受體雜質 ( acceptor impurities )，它們可由晶格中接受電子。這種半導體稱為 *P* 型半導體，以字母 *P* 表示。

### 1.9 半導體中的電傳導

圖 1-6 中，一塊 *N* 型鍺接上電池電壓。在 *N* 型鍺中電子是多數載體。電子電流方向恒由外加電池決定。電子電流自電源負端經由半導體流向電源正端。