

DIANGONG JISHU  
YU DIANZI JISHU

# 电工技术与 电子技术 下册

王鸿明 编 宗孔德 审

清华大学出版社

DIANGONG JISHU  
YU DIANZI JISHU

内 容 介 绍

# 电工技术与电子技术

(下 册)

王 鸿 明 编

宗 孔 德 审

清华大学出版社

## 内 容 简 介

本书是根据高等工科学校电工学课程教学领导小组审定的《电工技术》、《电子技术》课程教学基本要求编写的，分为上、下两册。上册是电工技术，内容有电路分析；变压器；电动机；继电器—接触器控制等。下册是电子技术，内容有模拟电子技术；数字电子技术；晶闸管应用电路以及电工、电子测量等。

本书是作者在清华大学多年从事电工学工作的基础上编写成的。本书文字叙述详细、概念阐述清楚、通俗易懂、便于自学，在内容上强电、弱电并重。除满足课程教学基本要求的基础知识外，还适当增加了一些拓宽的知识，因此适用的专业面广。

本书可作为高等工科院校非电类专业本科生、大专生学习电工技术、电子技术的教材或参考书，也可作为非电类工程技术人员了解有关电工知识的参考书。

(京)新登字158号

### 电工技术与电子技术

(下册)

王鸿明 编

宗孔德 审

☆

清华大学出版社

北京 清华园

中国科学院印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：850×1168 1/32 印张：15.75 字数：406千字

1991年5月第1版 1997年4月第7次印刷

印数：30001—35000

ISBN 7-302-00801-9/TM·10

定价：15.80元

# 符 号 说 明

## 1. 基本符号

电流:  $I, i$ ; 电压:  $U, u$ ; 电位:  $V$ ; 功率:  $P, p$ 。

(1) 大写字母  $I, U, P$  表示: 最大值 (峰值)、平均值、恒定值、均方根值 (有效值)、电压 (或电流) 相量的模。

(2) 小写字母  $i, u, p$  表示随时间变化的瞬时值。

(3) 大写下标表示:

恒定值或恒定分量, 如  $I_B$ ; 总的瞬时值, 如  $i_B$ ;

总的平均值, 如  $I_{B\text{AV}}$ ; 总的最大值 (峰值), 如  $I_{B\text{M}}$

(4) 小写下标表示:

交变分量的瞬时值, 如  $i_b$ ; 交变分量的最大值, 如  $I_{b\text{m}}$ ; 交变分量的平均值, 如  $I_{b\text{av}}$ ; 交变分量的均方根值 (有效值), 如  $I_b$ 。

## 2. 一些常用下角标的含义:

$\text{AV}, \text{av}$ : 平均, 如平均电压  $U_{\text{AV}}$ ;

$F, f$ : 正向, 如二极管正向电压  $U_F$ ;

$M, m$ : 最大值;

$\text{MIN}, \text{min}$ : 最小值;

$R, r$ : 反向或作为第二下标, 表示重复;

$\text{BR}$ : 击穿, 如反向击穿电压  $U_{\text{RBR}}$ ;

$H, h$ : 高的, 如输出高电平  $U_H$ ;

$L, l$ : 低的, 如输出低电平  $U_L$ ;

$\text{ON}, \text{on}$ : 导通态, 如导通电压  $U_{\text{ON}}$ ;

$\text{OFF}, \text{off}$ : 截止态, 如截止电压  $U_{\text{OFF}}$ ;

$I, i$ : 输入, 如输入阻抗  $Z_i$ ;

$O, o$ : 输出、如输出电压  $U_O$ ;  
 $sc$ : 短路、如短路电流  $I_{sc}$ ;  
 $oc$ : 开路, 如开路电压  $U_{oc}$ ;  
 $S, s$ : 串联, 如串联电阻  $R_s$ ;  
 $P, p$ : 并联, 如并联电容  $C_p$ ;  
 $sat$ : 饱和, 如饱和电流  $I_{sat}$ ; 或简记为  $I_s$ ;  
 $L$ : 负载, 如负载阻抗  $Z_L$ ;  
 $C, c$ : 共模, 如共模放大倍数  $A_c$ ;  
 $D, d$ : 差模, 如差模放大倍数  $A_d$ ;  
 $S$ : 信号的, 如交流信号电压  $u_s$ ; 源的, 如电流源电激流  $i_s$ ;  
 $TH, th$ : 阈值, 如阈值电压  $U_{TH}$ ;  
 电源电压用相应的两个重复大写字母  $CC, DD$  表示, 如  $U_{CC}, U_{DD}$ .

# 目 录

<b>第八章 半导体二极管——特性、模型与应用</b> .....	1
8.1 半导体二极管 .....	1
8.1.1 P-N 结 .....	1
8.1.2 半导体二极管及其 $V-A$ 特性 .....	5
8.2 含二极管的电路分析 .....	9
8.2.1 图解法 .....	9
8.2.2 二极管的微变等效电路 .....	11
8.3 稳压管 .....	16
8.4 二极管的应用 .....	21
8.4.1 二极管整流电路 .....	22
8.4.2 二极管在其它方面的应用 .....	30
习题 .....	32
参考文献 .....	35
<b>第九章 基本放大电路</b> .....	36
9.1 晶体三极管 .....	36
9.1.1 三极管的电流控制作用 .....	36
9.1.2 三极管的特性曲线 .....	39
9.1.3 三极管的主要参数 .....	42
9.1.4 三极管的等效电路 .....	43
9.2 三极管（基本）放大电路 .....	47
9.2.1 静态分析 .....	47
9.2.2 动态分析 .....	50
9.2.3 电压放大倍数和输入、输出电阻 .....	53
9.3 工作点稳定的三极管放大电路 .....	58
9.3.1 静态工作点对放大器工作的影响 .....	58
9.3.2 工作点稳定的放大电路 .....	60

9.4	多级放大器 .....	63
9.5	差动放大器 .....	66
9.5.1	简单直接耦合放大器存在的问题 .....	67
9.5.2	基本差动放大电路 .....	70
9.5.3	具有恒流源的差动放大电路 .....	75
9.5.4	差动放大器的输入、输出连接方式 .....	82
9.6	场效应管放大器 .....	84
9.6.1	结型场效应管 .....	84
9.6.2	绝缘栅型场效应管 .....	89
9.6.3	场效应管放大器及反相器 .....	94
9.7	基本放大电路存在的问题 .....	98
9.7.1	输入电阻 $R_i$ 低、输出电阻 $R_o$ 高、放大倍数 $\dot{A}_v$ 不稳定 .....	99
9.7.2	通频带窄 .....	99
9.7.3	非线性失真 .....	100
	习题 .....	100
	参考文献 .....	106
<b>第十章</b>	<b>负反馈放大电路 .....</b>	<b>107</b>
10.1	负反馈放大器的一般概念 .....	107
10.1.1	负反馈放大器的四种连接方式 .....	107
10.1.2	反馈放大器的一般关系式 .....	114
10.1.3	负反馈对放大器性能的影响 .....	118
10.2	负反馈放大器电压放大倍数的计算 .....	121
10.2.1	通过放大器微变等效电路求电压放大倍数 .....	121
10.2.2	负反馈放大电路 $\dot{A}_{VF}$ 的估算 .....	123
10.2.3	分析负反馈放大电路时的一些问题的讨论 .....	128
10.3	射极输出器 .....	132
10.3.1	射极输出器的电压放大倍数 .....	132
10.3.2	输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$ .....	133
	习题 .....	139
	参考文献 .....	143
<b>第十一章</b>	<b>集成运算放大电路 .....</b>	<b>144</b>

11.1	概述	144
11.1.1	集成运算放大器简介	144
11.1.2	集成运算放大器的技术指标	147
11.1.3	集成运算放大器的特点	149
11.1.4	开环与闭环应用	151
11.2	信号运算电路	153
11.2.1	反相比例、求和电路	153
11.2.2	同相比例、求和电路	159
11.2.3	差动运算电路	161
11.2.4	积分和微分运算电路	168
11.3	信号处理中常用的一些运算放大电路	171
11.3.1	采样保持电路	171
11.3.2	电压比较器	172
11.3.3	有源滤波器	179
11.4	信号发生电路	183
11.4.1	正弦信号发生器	183
11.4.2	方波、三角波、锯齿波发生器	187
	习题	195
	参考文献	199
<b>第十二章 功率放大电路及稳压电源</b>		<b>200</b>
12.1	功率放大电路	200
12.1.1	最简单的功率放大电路——射极输出器	201
12.1.2	互补对称功率放大电路	203
12.1.3	准互补对称功率放大电路	205
12.1.4	功率放大电路 (OCL) 介绍	209
12.1.5	集成功率放大电路	211
12.2	直流稳压电源	214
12.2.1	滤波电路	214
12.2.2	具有放大环节的直流稳压电路	216
12.2.3	性能较好的稳压电源	219
12.2.4	集成稳压器	220
	习题	222



参考文献	223
<b>第十三章 数字电路</b>	<b>224</b>
13.1 概述	224
13.2 逻辑门电路及其函数表达式	226
13.2.1 与逻辑关系和与门	226
13.2.2 或逻辑关系和或门	228
13.2.3 非逻辑关系和非门	229
13.2.4 与、或、非门的逻辑关系表示式	229
13.2.5 与非门	231
13.3 集成门电路	232
13.3.1 TTL 与非门工作原理	233
13.3.2 TTL 或非门	234
13.3.3 数字集成门电路的特性	235
13.3.4 TTL 数字集成电路的主要参数	239
13.3.5 三态门	241
13.3.6 MOS 数字集成门电路	244
13.4 组合逻辑电路的分析与设计	246
13.4.1 简单组合逻辑门	246
13.4.2 逻辑函数的表示方法	252
13.4.3 组合逻辑电路的化简	257
13.4.4 组合逻辑电路的设计	263
13.4.5 数字集成组合逻辑电路	265
13.5 触发器	282
13.5.1 R-S 触发器	282
13.5.2 D 触发器	287
13.5.3 J-K 触发器	291
13.5.4 触发器的逻辑结构、逻辑功能和 触发方式间的关系	297
13.6 寄存器	300
13.6.1 基本寄存器	300
13.6.2 移位寄存器	301
13.7 计数器	306

13.7.1	二进制计数器	307
13.7.2	十进制(模十)计数器	311
13.7.3	数字集成电路计数器	318
13.8	脉冲波形的产生与整形	325
13.8.1	多谐振荡器(无稳态触发器)	325
13.8.2	单稳态触发器	331
13.8.3	施密特触发器(鉴幅器)	334
13.8.4	数字集成电路的单稳态触发器和多谐振荡器	336
13.8.5	综合应用举例——数字频率计	342
13.9	数字信号与模拟信号的相互转换	344
13.9.1	数字信号与模拟信号的转换(D/A)	344
13.9.2	模拟信号与数字信号的转换(A/D)	348
13.9.3	集成电路A/D及其应用举例	357
	习题	360
	参考文献	371
<b>第十四章 硅晶体闸流管应用电路</b>		<b>372</b>
14.1	晶闸管的工作原理、特性曲线和主要参数	372
14.1.1	晶闸管的工作原理	372
14.1.2	晶闸管的伏—安特性曲线和主要参数	375
14.1.3	其它类型的晶闸管	380
14.2	可控整流电路	382
14.2.1	单相可控整流电路	382
14.2.2	三相可控整流电路	397
14.2.3	晶闸管保护电路	400
14.3	触发电路	402
14.3.1	单结晶体管的工作原理与特性	403
14.3.2	单结晶体管振荡电路	405
14.3.3	单结晶体管触发电路	406
14.3.4	具有放大环节的单结晶体管振荡电路	408
14.4	晶闸管可控整流电路应用举例	409
14.5	晶闸管交流调压电路	414
14.5.1	晶闸管交流调压电路的工作原理	414

14.5.2	晶闸管交流调压器	414
14.6	晶闸管逆变器	415
14.6.1	单相无源逆变器的工作原理	416
14.6.2	三相无源逆变器(三相变频电源)	417
	习题	419
	参考文献	420
<b>第十五章 电工、电子测量</b>		421
15.1	测量的有关概念及测量误差	421
15.1.1	测量及其有关概念	421
15.1.2	测量的误差与评价	422
15.1.3	指示仪表的误差和准确度	423
15.1.4	指示仪表常用符号	426
15.2	直流电压、电流、电阻的直读测量	427
15.2.1	磁电系测量机构的结构与工作原理	427
15.2.2	直流电流、电压、电阻的测量	429
15.3	交流电压、电流的直读测量	442
15.3.1	电磁系交流电压、电流的直读测量电表	442
15.3.2	电动力系电表	445
15.3.3	其他类型的交流电压、电流的直读测量仪表	448
15.4	功率测量	450
15.4.1	伏—安法测量直流电路功率	450
15.4.2	电动力系功率表	451
15.5	数字式电表	457
15.5.1	双积分数字式直流电压表的工作原理	458
15.5.2	数字式繁用表	461
15.5.3	数字电压表的主要工作特性	464
15.6	低频信号发生器	467
15.6.1	低频信号发生器的自激振荡源	467
15.6.2	低频信号发生器的结构与使用	468
15.7	电子示波器及应用	469
15.7.1	示波器的工作原理	470
15.7.2	示波器的应用举例	479

习题.....	483
参考文献.....	484

## 附录

[ I ] 半导体器件型号命名方法 (国家标准 GB249-64) .....	485
[ II ] 半导体集成电路型号命名法 (国家标准 GB3430-82) .....	486
[ III ] TTL集成电路型号命名规则.....	487
[ IV ] 数字电路一些元件的国家标准逻辑符号与目前还使用着的部颁逻辑符号对照表.....	488

## 第八章 半导体二极管——特性、模型与应用

二极管是电子电路中应用很广泛的一种电子元件，在这一章里将着重介绍二极管的特性、电路模型和含二极管电路的分析方法并介绍二极管在电子电路中的某些应用。

为了便于讨论半导体二极管的特性，将简要的介绍半导体P-N结的知识。

### 8.1 半导体二极管

#### 8.1.1 P-N 结

##### (一) 半导体的导电情况

制造半导体器件的材料常用的有半导体单晶硅和单晶锗，这种由单一的硅（或锗）原子构成的晶体称为本征半导体。

硅和锗都是四价元素，成晶体状时每一个原子外层的四个价电子都与邻近的原子形成共价键的结构。图8-1是硅（或锗）晶体共价键结构的示意图。

处于共价键上的某些电子在接受外界能量后可以脱离共价键的束缚成为自由电子。价电子脱离束缚成为自

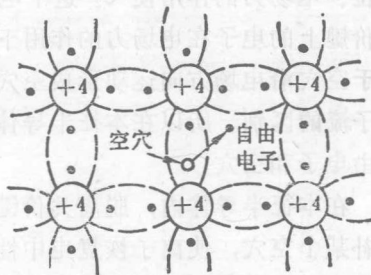


图 8-1 硅（或锗）晶体结构示意图

由电子后该电子原来位置上就会出现一个空位，这个空位称为空穴，空穴表示在该处缺少了一个电子。

丢失电子的原子显正电，称为正离子，故在分析时认为空穴是一个带正电的粒子。

在本征半导体内，自由电子和空穴是成对出现的，自由电子带负电、空穴带正电，二者所带电量相等、符号相反。自由电子和空穴都是载运电荷的粒子，称为载流子。

自由电子和空穴在电场力的作用下产生定向运动，载流子在电场力作用下的定向运动称为漂移运动。本征半导体内的电流就是由这样两种载流子的漂移运动形成的。

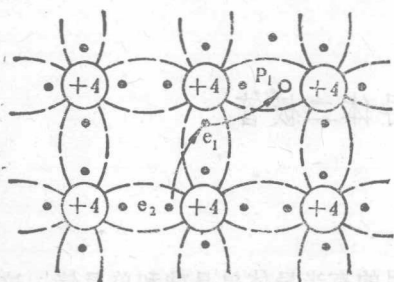


图 8-2 价电子填补空穴的运动

半导体内空穴电流也是电子定向运动产生的，但空穴电流与自由电子运动时所形成的电流不同，空穴电流是由处于共价键上的价电子不断填补空位形成的，如图 8-2 所示。在电场力的作用下，电子  $e_1$  填补了空穴  $P_1$  的位置后、在  $e_1$  原来所在的位置上又出现了一个新的空位、电场力的作用使  $e_2$  这个电子填补  $e_1$  遗留下的空位……。共价键上的电子在电场力的作用下逆电场方向不断填补空位，相当于空穴沿电场方向运动形成空穴电流，这就是空穴电流与自由电子流的区别。所以在本征半导体内参与导电的粒子有两种——自由电子和空穴。

在本征半导体内，脱离共价键的电子成为自由电子后也可能填补某个空穴，使离子恢复电中性，这个过程称为复合。

一般情况下本征半导体内的载流子数目有限，为增强它的导电性，可以在本征半导体内掺杂，以提高导电能力。向硅（或

锗) 单晶体内注入少量杂质元素后可使它的导电性能提高。例如, 向硅单晶体内注入五价的砷(或磷) 杂质元素后, 注入的砷原子在硅单晶内取代某些硅原子的位置并与其它硅原子结成共价键。因砷原子外层有五个价电子, 它只需要用四个电子与硅原子形成共价键, 第五个电子很容易成为自由电子, 因此每注入一个砷原子就会多余一个电子 [如图 8-3(a) 所示]。而注入的砷原子失去一个电子后就成为固定在晶格中不能移动的正离子。

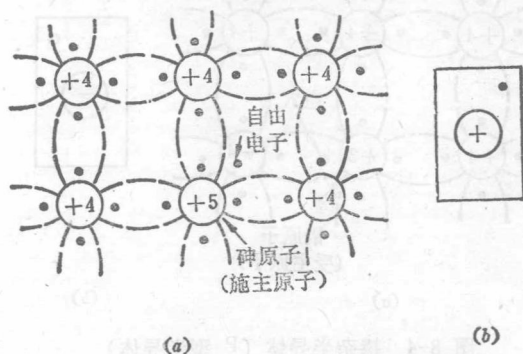


图 8-3 掺杂半导体 (N 型半导体)

(a) N 型半导体结构示意图; (b) N 型半导体符号

本征半导体注入的五价原子越多半导体内的自由电子数也就越多, 导电性能得到改善。

掺入五价杂质的半导体, 其自由电子的数目要比空穴数目多出许多, 载流子中自由电子占多数, 空穴占少数。这种多数载流子是自由电子的掺杂半导体称为 N 型半导体, 用图 8-3(b) 所示符号表示, 符号的意思是, 每注入一个五价的砷原子就会出现一个带正电的离子和一个自由电子。因此, N 型半导体从总体上看仍然是电中性的。

为增强本征半导体的导电性, 也可以向它注入三价元素的铝(或硼)。注入的铝原子取代了某些硅原子的位置, 如图 8-4(a) 所示, 每注入一个铝原子就会出现一个空穴, 当邻近的价

电子填补这个空穴后，使得注入的杂质原子成为带负电的离子、同时出现一个空穴。本征半导体掺入三价元素的杂质后，多数载流子是空穴，自由电子是少数，多数载流子是空穴的半导体称为 P 型半导体，P 型半导体的符号如图 8-4(b) 所示，符号的意思是每注入一个三价铝原子后就会出现一个带负电的离子和一个空穴。同样 P 型半导体从总体看仍然是电中性的。

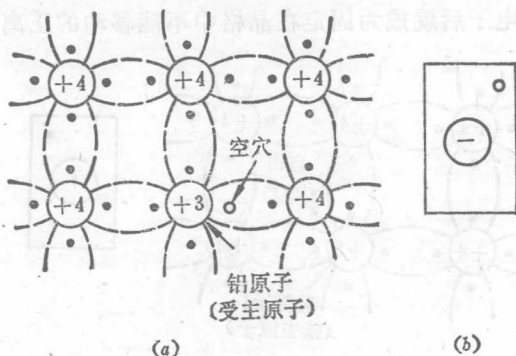


图 8-4 掺杂半导体 (P 型半导体)

(a) P 型半导体结构示意图； (b) P 型半导体符号

## (二) P-N 结

将 P 型半导体与 N 型半导体通过物理、化学的方法有机的结为一体后，在两种半导体的交界处就形成了 P-N 结。P-N 结具有非线性电阻的特性，可以制成整流元件，并且是构成多种半导体器件的基础。

P-N 结的形成与特性如下：当 P 型半导体和 N 型半导体共处一体后，在它们的交界处两边电子、空穴的浓度不同；N 区多电子，P 区多空穴，因此 N 型区内的电子要向 P 型区扩散，P 型区内的空穴要向 N 型区扩散。扩散首先是从界面处开始的，N 型区内的电子扩散到 P 型区后与空穴复合，N 型区减少了电子，因此在 N 型区的一侧出现了带正电的粒子层，这层带正电的粒子就是处于 N 型半导体共价键上失去一个自由电子



的原子，它们是不能移动的正离子。同样，交界面 P 型区一侧要出现带负电的粒子层，随着电子、空穴的扩散，交界面两侧带电层逐渐增厚形成一个空间电荷区，如图 8-5 所示，N 型区带正电，P 型区带负电。

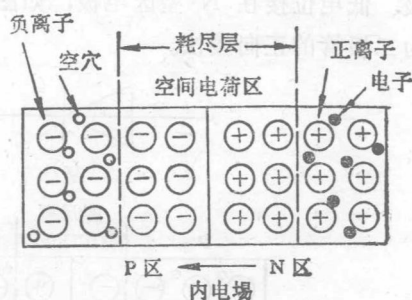


图 8-5 P-N 结

空间电荷区产生后，在半导体内部出现内电场，内电场的方向从 N 区指向 P 区。

内电场的出现使载流子在电场力的作用下要产生漂移运动，内电场使得 P 型区内的电子返回 N 型区。当空间带电区域比较薄时内电场较弱，载流子的扩散运动强于漂移运动，但随着扩散的进行，空间电荷区的厚度增加，内电场加强，使扩散运动减弱，漂移运动加强，最后将导致载流子的扩散运动与漂移运动达到动态平衡，即从 N 型区扩散到 P 型区的电子数目与从 P 型区漂移到 N 型区的电子数相等，通过交界面的净载流子数目为零，这时空间电荷区的宽度不再增加。空间电荷区内已不存在载流子，因而又称这个空间为耗尽层。

在半导体内部出现的空间电荷区产生的内电场阻止多数载流子继续扩散，称这个带电区域为阻挡层或 P-N 结。P-N 结具有单向导电性。

### 8.1.2 半导体二极管及其 V-A 特性

半导体二极管的核心部分是一个 P-N 结。在 P-N 结两端加上电极引线和管壳后就制成了一个半导体二极管。二极管的符号如图 8-6(a) 所示。