

电气工人适用

# 电 工 学

下 册

哈尔滨工业大学电工学教研室

水利电力出版社

电气工人适用

# 电 工 学

下 册

---

哈尔滨工业大学电工学教研室

水利电力出版社

电气工人适用

# 电 工 学

下 册

哈尔滨工业大学电工学教研室

\*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

七二一九工厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 24<sup>3</sup>/<sub>8</sub>印张 537,000字

1979年9月北京第一版 1979年9月甘肃第一次印刷

印数000001—290100册 普及本每册1.90元

书号 15143·3458

## 内 容 提 要

本书下册共二十一章。主要内容有：半导体的基本知识，晶体二极管、三极管，放大电路的基本分析方法，晶体管交、直流放大电路，振荡电路，晶体管的开关特性和脉冲波形的变换，开关电路和门电路，不控整流与稳压电路，可控硅整流及其触发电路等。书后并有《附录》。

本书是具有初中文化程度的发电厂、电力系统工人的专业基础理论自学参考书，也可以作为电力系统新工人的培训教材。对其它工业部门的广大电气工人也有参考价值。

## 符 号 说 明

符 号	意 义	符 号	意 义
BG	晶体管	$I_V$	单结晶体管谷点电流
$BU_{c.c.}$	集-射极击穿电压	$i$	交变电流瞬时值 信号电流瞬时值
D	二极管	K	放大倍数
E	直流电动势	$K_0$	中频段放大倍数 无反馈放大器放大倍数
e	发射极	$K_f$	反馈放大器放大倍数
F	反馈系数	KD	可控硅元件
f	频率	L	电感 自感系数
$f_0$	振荡回路固有频率	M	互感系数
$f_\alpha$	共基极截止频率	N	线圈(绕组)匝数
$f_\beta$	共发射极截止频率	P	功率
I	直流电流 电流的直流分量 交流电流的有效值	$P_{cM}$	最大集电极耗散功率
$\bar{i}$	电流交流分量的有效值	PFV	可控硅正向阻断峰值电压
$I_{b_s}$	基极饱和电流	PRV	可控硅反向阻断峰值电压
$I_{c.b.}$	集电极反向饱和电流	Q	振荡回路的品质因数
$I_{c.c.}$	集-射极反向饱和电流 (穿透电流)	R(r)	电阻
$I_{cM}$	最大集电极电流	$r_b$	晶体管基区电阻
$I_{c_s}$	集电极饱和电流	$r_{b_0}$	晶体管输入电阻(发射结电 阻)
$I_F$	可控硅额定正向平均电流	$r_{c_0}$	放大器输出电阻
$I_g$	可控硅控制极电流	$r_{s_1}$	放大器输入电阻
$I_H$	可控硅维持电流	T	周期
$I_P$	平均电流 单结晶体管峰值电流	$T_s$	PN结结温

符 号	意 义	符 号	意 义
$T_k$	脉冲宽度	$\alpha$	可控硅控制角(移相角)
$t_k$	开通时间	$\beta(h_{te})$	共发射极电流放大系数
$t_g$	关闭时间	$\beta(h_{FE})$	共发射极直流电流放大系 数
$u$	交变电压瞬时值	$\eta$	单结晶体管分压比
	信号电压瞬时值	$\tau$	时间常数
$\bar{u}$	电压交变分量瞬时值	$\theta$	可控硅的导通角
$u_{KD}$	可控硅端电压		

## 下 标

符 号	意 义	举 例
b	基极	$I_b$ 基极电流
be	基-射极, 发射结	$U_{be}$ 发射结压降
c	集电极	$I_c$ 集电极电流
	电容	$U_c$ 电容端电压
e	发射极	$I_e$ 发射极电流
f	反馈	$u_f$ 反馈电压
	放电	$\tau_f$ 放电时间常数
fz	负载	$U_{fz}$ 负载电压
sc	输出	$u_{sc}$ 输出电压
sr	输入	$i_{sr}$ 输入电流

# 目 录

<b>第三十七章 半导体和PN结</b> .....	1
37-1 原子的价电子 .....	1
37-2 半导体的特点 .....	3
37-3 半导体的导电方式 .....	5
37-4 N型半导体和P型半导体.....	9
37-5 什么是PN结.....	12
37-6 PN结的单向导电性.....	18
小结 .....	21
习题和思考题 .....	21
<b>第三十八章 晶体二极管</b> .....	23
38-1 晶体二极管的结构 .....	23
38-2 晶体二极管的伏安特性 .....	25
38-3 晶体二极管的主要参数 .....	27
38-4 用万用电表辨别二极管的极性 .....	28
小结 .....	30
习题和思考题 .....	30
<b>第三十九章 晶体三极管</b> .....	31
39-1 观察晶体管放大作用的实验 .....	32
39-2 晶体管的结构 .....	34
39-3 晶体管中三个电流的关系 .....	36
39-4 晶体管的电流放大作用 .....	40
39-5 晶体管的输入特性 .....	41
39-6 晶体管的输出特性 .....	46
39-7 晶体管的电流放大系数和极间反向电流 .....	49
39-8 温度对晶体管参数的影响 .....	53
39-9 晶体管的极限参数 .....	55

39-10	用万用电表粗测晶体管	58
39-11	使用晶体管时应注意什么问题	62
	小结	63
	习题和思考题	64
<b>第四十章 放大电路的静态工作点和偏置电路</b>		<b>66</b>
40-1	晶体管放大器的基本电路	67
40-2	用图解法分析放大器的静态	69
40-3	偏流有什么用处	76
40-4	放大器的输出电压	84
40-5	电路参数对静态工作点的影响	90
40-6	静态工作点的位置与波形失真的关系	92
40-7	交流负载线	94
40-8	温度对放大器工作点的影响	100
40-9	电压负反馈偏置电路	101
40-10	分压式电流负反馈偏置电路	104
	小结	109
	习题和思考题	111
<b>第四十一章 交流放大器</b>		<b>114</b>
41-1	阻容耦合放大电路	116
41-2	阻容耦合放大器的通频带	120
41-3	放大器的输入电阻和电压放大倍数	126
41-4	放大器的输出电阻和负载能力	130
41-5	晶体管的 $h$ 参数等效电路	133
41-6	阻抗匹配	137
41-7	单管功率放大器	142
41-8	功率放大器的效率	145
41-9	推挽功率放大器	148
41-10	大功率晶体管的散热问题	154
	小结	156
	习题和思考题	157



<b>第四十二章 放大器中的负反馈</b> .....	159
42-1 什么是反馈 .....	159
42-2 放大器中的负反馈类型 .....	162
42-3 负反馈对放大倍数的影响 .....	166
42-4 负反馈为什么能使放大器工作稳定 .....	168
42-5 负反馈对波形失真的改善 .....	171
42-6 负反馈变换输入阻抗和输出阻抗 .....	172
42-7 并联负反馈电路 .....	175
42-8 串联负反馈电路 .....	178
42-9 射极输出器 .....	180
42-10 怎样判断负反馈的类型 .....	184
42-11 反馈放大器的自激振荡 .....	192
小结 .....	197
习题和思考题 .....	198
<b>第四十三章 直流放大器</b> .....	201
43-1 直接耦合放大器 .....	202
43-2 零输入和零输出 .....	206
43-3 直流放大器中的零点漂移 .....	208
43-4 差动式直流放大器的工作原理 .....	211
43-5 差动放大器怎样抑制零点漂移 .....	215
43-6 晶体管恒流源差动电路 .....	219
43-7 差动电路的其它几种接法 .....	223
43-8 调制式直流放大器 .....	227
43-9 JF-12型晶体管放大器 .....	231
43-10 运算放大器的概念 .....	240
小结 .....	243
习题和思考题 .....	244
<b>第四十四章 正弦波振荡电路</b> .....	247
44-1 什么是振荡 .....	248
44-2 怎样使电磁振荡不衰减 .....	252
44-3 从LC选频放大器到LC自激振荡器 .....	256

44-4	振荡器的起振和振幅的稳定	259
44-5	三点式LC自激振荡器	261
44-6	RC移相式振荡器	264
44-7	采用RC选频网络的正弦波振荡器	266
	小结	272
	习题和思考题	273
<b>第四十五章 晶体管的开关特性</b>		<b>277</b>
45-1	开关有什么特点	278
45-2	二极管的开关特性	280
45-3	晶体管的开关特性	282
45-4	晶体管无触点开关——反相器	287
45-5	怎样选择反相器的参数	290
45-6	晶体管开关的开启和关闭过程	294
45-7	晶体管的开关速度	298
	小结	300
	习题和思考题	300
<b>第四十六章 电容器的充放电和脉冲波形的变换</b>		<b>302</b>
46-1	RC电路的充电过程	303
46-2	RC电路的放电过程	307
46-3	延时电路	308
46-4	微分电路	312
46-5	加速电容	317
46-6	积分电路	319
46-7	二极管限幅电路	322
	小结	324
	习题和思考题	325
<b>第四十七章 双稳态电路</b>		<b>327</b>
47-1	集-基极耦合双稳态电路的工作原理	328
47-2	双稳态电路的稳定条件	332
47-3	双稳态电路的输出信号	337
47-4	双稳态电路的触发电路	339

47-5	单边触发	340
47-6	计数触发	342
47-7	双稳态电路的应用举例	348
47-8	发射极耦合双稳态电路	351
47-9	射耦双稳态电路在继电保护装置中的应用	356
	小结	360
	习题和思考题	361
<b>第四十八章 单稳态和无稳态电路</b>		<b>364</b>
48-1	集-基极耦合的单稳态电路	365
48-2	单稳态电路的稳定条件	369
48-3	单稳态电路的触发方式和输出信号	373
48-4	集-基极耦合单稳态电路应用举例	377
48-5	无暂记的单稳态电路	382
48-6	发射极耦合的单稳态电路	387
48-7	射耦单稳态电路的稳定条件和输出信号	389
48-8	无稳态电路——自激多谐振荡器	395
48-9	无稳态电路的输出信号	398
	小结	401
	习题和思考题	402
<b>第四十九章 锯齿波发生器和间歇振荡器</b>		<b>404</b>
49-1	什么是锯齿波	405
49-2	从电子示波器说起	406
49-3	最简单的锯齿波电压发生器	414
49-4	具有补偿电压的锯齿波电路	417
49-5	电容负反馈锯齿波电路	420
49-6	恒流源锯齿波电路	428
49-7	锯齿波电压的同步	431
49-8	间歇振荡器的基本概念	434
49-9	RC定时自激间歇振荡器	439
49-10	单稳态间歇振荡器	445
	小结	449

	习题和思考题 .....	451
<b>第五十章</b>	<b>门电路 .....</b>	<b>452</b>
50-1	什么是门电路 .....	453
50-2	二极管与门电路 .....	454
50-3	二极管或门电路 .....	458
50-4	与非门电路 .....	461
50-5	与门和或门的关系 .....	464
50-6	三极管门电路 .....	467
	小结 .....	474
	习题和思考题 .....	476
<b>第五十一章</b>	<b>单相整流和滤波电路 .....</b>	<b>477</b>
51-1	什么是整流 .....	478
51-2	单相半波整流电路 .....	479
51-3	单相全波整流电路 .....	483
51-4	单相桥式整流电路 .....	486
51-5	电容滤波器 .....	489
51-6	常用的滤波电路 .....	495
51-7	小功率电源变压器的设计 .....	500
	小结 .....	508
	习题和思考题 .....	510
<b>第五十二章</b>	<b>三相及特殊整流电路 .....</b>	<b>513</b>
52-1	三相桥式整流电路 .....	513
52-2	裂相整流电路 .....	518
52-3	倍压整流电路 .....	521
52-4	相敏整流电路 .....	524
52-5	整流元件的串联和并联 .....	529
52-6	整流元件的保护 .....	532
	小结 .....	535
	习题和思考题 .....	535
<b>第五十三章</b>	<b>直流稳压电源 .....</b>	<b>537</b>
53-1	硅稳压二极管 .....	538

53-2	硅稳压管稳压电路	542
53-3	硅稳压管稳压电路的应用	546
53-4	串联式晶体管稳压电路	548
53-5	串联稳压电路举例	553
53-6	并联式晶体管稳压电路	559
	小结	562
	习题和思考题	562
<b>第五十四章</b>	<b>单相可控整流电路</b>	<b>564</b>
54-1	可控硅元件的工作原理	565
54-2	可控硅的伏安特性和控制极特性	571
54-3	可控硅的主要参数	575
54-4	单相半波可控整流电路	578
54-5	电感性负载和续流二极管	582
54-6	全波可控整流电路	587
54-7	单相半控桥式整流电路	593
54-8	具有反电动势负载时的可控整流电路	601
	小结	603
	习题和思考题	604
<b>第五十五章</b>	<b>大功率可控整流电路</b>	<b>606</b>
55-1	三相半波可控整流电路	606
55-2	三相半控桥式整流电路	610
55-3	双反星形可控整流电路	619
55-4	可控硅的串联与并联	623
55-5	可控硅元件的保护	627
	小结	631
	习题和思考题	632
<b>第五十六章</b>	<b>可控硅的触发电路</b>	<b>634</b>
56-1	可控硅对触发电路提出的要求	634
56-2	单结晶体管	636
56-3	单结晶体管自振荡触发电路	640
56-4	单结晶体管触发电路的其它接线方式	646

56-5	使用小可控硅的触发电路	649
56-6	用阻容桥移相的触发电路	652
56-7	正弦波同步信号触发电路	656
56-8	三相半控桥的触发电路	663
	小结	670
	习题和思考题	671
第五十七章 特殊半导体器件		672
57-1	隧道二极管	673
57-2	场效应管	682
57-3	集成电路	691
57-4	特殊可控硅	698
	小结	703
	习题和思考题	704
附录		705
习题解答		748

## 第三十七章 半导体和PN结

世界上第一种半导体器件硒光电池是1876年诞生的，到19世纪末，出现了半导体二极管。本世纪初期，在收音机上已经采用一种半导体矿石作为检波器。但是，1910年发明了真空二极管并且迅速得到了广泛采用，就使得人们暂时忘记了半导体。以后，由于无线电电子学向着高频和超高频的方向发展，真空管的性能日益不能满足要求，人们又重新研究起半导体来。经过大量的实践和理论探索，1948年，世界上第一个晶体三极管试制成功，标志着电工技术领域中的一个新时代的开始。二十多年来，半导体技术有了飞跃的发展。由于半导体器件的种种优点：重量轻、体积小、耗电少、寿命长、工作可靠等等，虽然它的发展历史不长，却得到了广泛的应用，成为当前电子设备小型化和提高工作可靠性的一个重要技术途径。

半导体电子技术在现代工业、现代农业、现代科学技术和现代国防事业中应用愈来愈普遍了。

从这一章开始，我们将要讨论半导体的技术应用。在这一章里，首先讨论半导体的结构特点、导电机构和PN结的原理，作为我们研究各种半导体器件（晶体二极管、三极管等）的基础。

### 37-1 原子的价电子

我们在第一章里，曾经简单地介绍过物质的电结构，我们知道，所有的原子都是由带正电荷的原子核和带负电荷的核外电子组成的，这些核外电子不停地围绕着原子核旋转，就象行星围绕着太阳旋转一样。由于原子核的组成以及核外电子的数目和排列

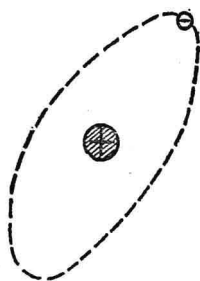


图 37-1 氢原子只有一个核外电子

方式各不相同，因而使得各种原子的性质有很大的差别。

核外电子是怎样排列的呢？

氢原子是结构最简单的原子：它只有一个核外电子(图37-1)。如果原子的核外电子数目比较多，它们在核外就要分层排列。图37-2是三种原子的内部结构平面示意图。

我们曾经讲过，铝原子有13个绕核旋转的电子，它们分成三层排列(见上册第一章1-3节)。最靠近原子核的一层至多能容纳2个电子，第二层能容纳8个电子，剩下的3个电子就在最外层，如图37-2(a)所示。要注意，在同一层内，电子绕核旋转并不在一个平面上。

磷原子有15个电子，按照上面所说的排列规律，最内层有2个电子，第2层有8个电子，最外层就是5个电子，如图37-2(b)所示。锗原子有32个电子，最内层有2个，第二层8个，第三层最多能容纳18个，剩下的4个电子就排列在最外层，如图37-2(c)所示。

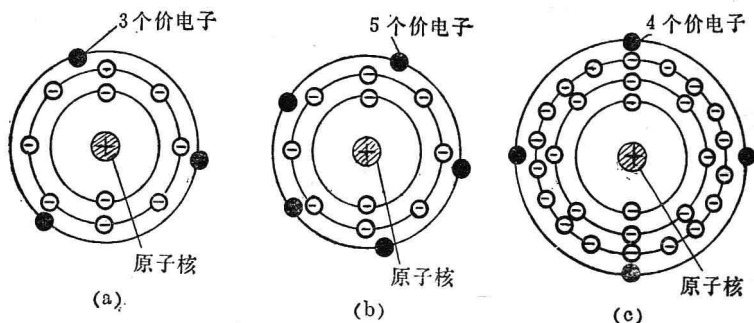


图 37-2 几种原子的结构示意图  
(a)铝Al, (b)磷P, (c)锗Ge



原子最外层的电子数目最多不能超过8个，一般都没有填满到这个数目。我们把最外层的电子叫做价电子，最外层就叫做价电子层。有几个价电子就叫做几价元素，所以铝是三价元素，磷是五价元素，锗是四价元素。由于价电子离原子核最远，它们受到的核引力比较小，所以价电子很容易在外界的影响下脱离原子核的束缚，而成为可以在物质中自由运动的自由电子。

金属的原子核对价电子的束缚力很弱，在一般的环境温度下，价电子就能获得足够的能量挣脱原子核的束缚，而产生大量的自由电子。由于电子带有负电荷，在外电场的作用下，自由电子向同一方向运动，就形成了电流。所以金属是良好的导体，其中又以银、铜和铝的导电性能为最好。

在绝缘体（一般是由几种原子按各种不同规律组成的化合物）中，由于价电子被束缚得很紧，在一般条件下自由电子很少，因此不容易导电。

半导体材料的原子结构比较特殊，它的价电子既不象导体那样很容易挣脱原子核的束缚，又不象绝缘体那样束缚得很紧，这就决定了它的导电特性介于导体和绝缘体之间。这就是半导体名称的由来。

当然，如果半导体仅仅具有这个特点的话，它显然不会引起人们这样大的兴趣，更不会得到这样广泛的应用。实际上，半导体是具有一些特殊性质的。

## 37-2 半导体的特点

和金属的导电性能比较，半导体最大的特点是，如果改变外部条件（例如掺杂质、温度变化、光线照射等），它的导电能力就有很大的改变，这就是半导体技术在短时期内能够得到飞跃发展的根本原因。

1. 杂质对半导体导电能力的影响显著。金属中含有少量杂质