

73.1
406
2:1

电气工人适用

电 工 学

下 册

哈尔滨工业大学电工学教研室

2428/B

水利电力出版社



符 号 说 明

符 号	意 义
BG	晶体管
BU...	集-射极击穿电压
D	二极管
E	直流电动势
e	发射极
F	反馈系数
f	频率
f_0	振荡回路固有频率
f_a	共基极截止频率
f_β	共发射极截止频率
I	直流电流
	电流的直流分量
	交流电流的有效值
$\tilde{I}$	电流交流分量的有效值
I_{b_1}	基极饱和电流
I_{cbo}	集电极反向饱和电流
I_{ceo}	集-射极反向饱和电流 (穿透电流)
I_{CM}	最大集电极电流
I_{co}	集电极饱和电流
I_F	可控硅额定正向平均电流
I_g	可控硅控制极电流
I_H	可控硅维持电流
I_p	平均电流
	单结晶体管峰值电流
I_V	单结晶体管谷点电流
i	交变电流瞬时值
	信号电流瞬时值

符 号	意 义
K	放大倍数
K_0	中频段放大倍数
	无反馈放大器放大倍数
K_f	反馈放大器放大倍数
KD	可控硅元件
L	电感
	自感系数
M	互感系数
N	线圈(绕组)匝数
P	功率
P_{CM}	最大集电极耗散功率
PFV	可控硅正向阻断峰值电压
PRV	可控硅反向阻断峰值电压
Q	振荡回路的品质因数
$R(r)$	电阻
r_b	晶体管基区电阻
r_{be}	晶体管输入电阻(发射结电阻)
r_{oe}	放大器输出电阻
r_{ie}	放大器输入电阻
T	周期
T_a	PN结结温
T_k	脉冲宽度
t_k	开通时间
t_s	关闭时间
u	交变电压瞬时值
	信号电压瞬时值
$\tilde{u}$	电压交变分量瞬时值
u_{KD}	可控硅端电压
α	可控硅控制角(移相角)
$\beta(h_{fe})$	共发射极电流放大系数
$\bar{\beta}(h_{FE})$	共发射极直流电流放大系数
η	单结晶体管分压比

符 号 意 义

τ	时间常数
θ	可控硅的导通角

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	τ_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

第三十七章 半导体和PN结	1055
37-1 原子的价电子	1056
37-2 半导体的特点	1058
37-3 半导体的导电方式	1059
37-4 N型半导体和P型半导体	1063
37-5 什么是PN结	1066
37-6 PN结的单向导电性	1071
小结	1074
习题和思考题	1075
第三十八章 晶体二极管	1076
38-1 晶体二极管的结构	1076
38-2 晶体二极管的伏安特性	1078
38-3 晶体二极管的主要参数	1080
38-4 用万用电表辨别二极管的极性	1081
小结	1082
习题和思考题	1083
第三十九章 晶体三极管	1084
39-1 观察晶体管放大作用的实验	1085
39-2 晶体管的结构	1087
39-3 晶体管中三个电流的关系	1089
39-4 晶体管的电流放大作用	1093
39-5 晶体管的输入特性	1094
39-6 晶体管的输出特性	1098
39-7 晶体管的电流放大系数和极间反向电流	1102
39-8 温度对晶体管参数的影响	1105
39-9 晶体管的极限参数	1108

33550

39-10	用万用电表粗测晶体管	1111
39-11	使用晶体管时应注意什么问题	1115
	小结	1116
	习题和思考题	1116
第四十章	放大电路的静态工作点和偏置电路	1118
40-1	晶体管放大器的基本电路	1119
40-2	用图解法分析放大器的静态	1121
40-3	偏流有什么用处	1128
40-4	放大器的输出电压	1136
40-5	电路参数对静态工作点的影响	1143
40-6	静态工作点的位置与波形失真的关系	1145
40-7	交流负载线	1147
40-8	温度对放大器工作点的影响	1152
40-9	电压负反馈偏置电路	1154
40-10	分压式电流负反馈偏置电路	1157
	小结	1162
	习题和思考题	1163
第四十一章	交流放大器	1166
41-1	阻容耦合放大电路	1168
41-2	阻容耦合放大器的通频带	1172
41-3	放大器的输入电阻和电压放大倍数	1177
41-4	放大器的输出电阻和负载能力	1182
41-5	晶体管的 h 参数等效电路	1185
41-6	阻抗匹配	1189
41-7	单管功率放大器	1193
41-8	功率放大器的效率	1197
41-9	推挽功率放大器	1200
41-10	大功率晶体管的散热问题	1205
	小结	1207
	习题和思考题	1209
第四十二章	放大器中的负反馈	1210
42-1	什么是反馈	1210
42-2	放大器中的负反馈类型	1213

42-3	负反馈对放大倍数的影响	1217
42-4	负反馈为什么能使放大器工作稳定	1219
42-5	负反馈对波形失真的改善	1221
42-6	负反馈变换输入阻抗和输出阻抗	1222
42-7	并联负反馈电路	1226
42-8	串联负反馈电路	1229
42-9	射极输出器	1231
42-10	怎样判断负反馈的类型	1235
42-11	反馈放大器的自激振荡	1242
	小结	1248
	习题和思考题	1249

第四十三章 直流放大器

43-1	直接耦合放大器	1253
43-2	零输入和零输出	1257
43-3	直流放大器中的零点漂移	1259
43-4	差动式直流放大器的工作原理	1262
43-5	差动放大器怎样抑制零点漂移	1266
43-6	晶体管恒流源差动电路	1270
43-7	差动电路的其它几种接法	1274
43-8	调制式直流放大器	1278
43-9	JF-12型晶体管放大器	1282
43-10	运算放大器的概念	1291
	小结	1295
	习题和思考题	1296

第四十四章 正弦波振荡电路

44-1	什么是振荡	1300
44-2	怎样使电磁振荡不衰减	1304
44-3	从LC选频放大器到LC自激振荡器	1308
44-4	振荡器的起振和振幅的稳定	1311
44-5	三点式LC自激振荡器	1313
44-6	RC移相式振荡器	1316
44-7	采用RC选频网络的正弦波振荡器	1318
	小结	1324

习题和思考题	1325
第四十五章 晶体管的开关特性	1328
45-1 开关有什么特点	1329
45-2 二极管的开关特性	1331
45-3 晶体管的开关特性	1333
45-4 晶体管无触点开关——反相器	1338
45-5 怎样选择反相器的参数	1341
45-6 晶体管开关的开启和关闭过程	1344
45-7 晶体管的开关速度	1348
小结	1350
习题和思考题	1351
第四十六章 电容器的充放电和脉冲波形的变换	1352
46-1 RC电路的充电过程	1353
46-2 RC电路的放电过程	1357
46-3 延时电路	1358
46-4 微分电路	1363
46-5 加速电容	1367
46-6 积分电路	1369
46-7 二极管限幅电路	1372
小结	1375
习题和思考题	1376
第四十七章 双稳态电路	1377
47-1 集-基极耦合双稳态电路的工作原理	1378
47-2 双稳态电路的稳定条件	1382
47-3 双稳态电路的输出信号	1388
47-4 双稳态电路的触发电路	1390
47-5 单边触发	1391
47-6 计数触发	1393
47-7 双稳态电路的应用举例	1399
47-8 发射极耦合双稳态电路	1402
47-9 射耦双稳态电路在继电保护装置中的应用	1407
小结	1411
习题和思考题	1412

第四十八章 单稳态和无稳态电路	1415
48-1 集-基极耦合的单稳态电路	1416
48-2 单稳态电路的稳定条件	1420
48-3 单稳态电路的触发方式和输出信号	1424
48-4 集-基极耦合单稳态电路应用举例	1429
48-5 无暂记的单稳态电路	1434
48-6 发射极耦合的单稳态电路	1439
48-7 射耦单稳态电路的稳定条件和输出信号	1441
48-8 无稳态电路——自激多谐振荡器	1447
48-9 无稳态电路的输出信号	1450
小结	1453
习题和思考题	1454
第四十九章 锯齿波发生器和间歇振荡器	1456
49-1 什么是锯齿波	1457
49-2 从电子示波器说起	1458
49-3 最简单的锯齿波电压发生器	1466
49-4 具有补偿电压的锯齿波电路	1468
49-5 电容负反馈锯齿波电路	1472
49-6 恒流源锯齿波电路	1479
49-7 锯齿波电压的同步	1483
49-8 间歇振荡器的基本概念	1486
49-9 RC 定时自激间歇振荡器	1491
49-10 单稳态间歇振荡器	1497
小结	1501
习题和思考题	1502
第五十章 门电路	1504
50-1 什么是门电路	1505
50-2 二极管与门电路	1506
50-3 二极管或门电路	1510
50-4 与非门电路	1513
50-5 与门和或门的关系	1516
50-6 三极管门电路	1519
小结	1526

习题和思考题	1528
第五十一章 单相整流和滤波电路	1529
51-1 什么是整流	1530
51-2 单相半波整流电路	1531
51-3 单相全波整流电路	1535
51-4 单相桥式整流电路	1538
51-5 电容滤波器	1541
51-6 常用的滤波电路	1548
51-7 小功率电源变压器的设计	1553
小结	1560
习题和思考题	1563
第五十二章 三相及特殊整流电路	1565
52-1 三相桥式整流电路	1565
52-2 裂相整流电路	1570
52-3 倍压整流电路	1573
52-4 相敏整流电路	1576
52-5 整流元件的串联和并联	1582
52-6 整流元件的保护	1585
小结	1587
习题和思考题	1588
第五十三章 直流稳压电源	1590
53-1 硅稳压二极管	1591
53-2 硅稳压管稳压电路	1595
53-3 硅稳压管稳压电路的应用	1599
53-4 串联式晶体管稳压电路	1601
53-5 串联稳压电路举例	1606
53-6 并联式晶体管稳压电路	1612
小结	1615
习题和思考题	1616
第五十四章 单相可控整流电路	1618
54-1 可控硅元件的工作原理	1619
54-2 可控硅的伏安特性和控制极特性	1625
54-3 可控硅的主要参数	1630

54-4	单相半波可控整流电路	1633
54-5	电感性负载和续流二极管	1637
54-6	全波可控整流电路	1642
54-7	单相半控桥式整流电路	1647
54-8	具有反电动势负载时的可控整流电路	1656
	小结	1659
	习题和思考题	1659
第五十五章 大功率可控整流电路		1662
55-1	三相半波可控整流电路	1662
55-2	三相半控桥式整流电路	1667
55-3	双反星形可控整流电路	1677
55-4	可控硅的串联与并联	1681
55-5	可控硅元件的保护	1685
	小结	1690
	习题和思考题	1690
第五十六章 可控硅的触发电路		1693
56-1	可控硅对触发电路提出的要求	1693
56-2	单结晶体管	1695
56-3	单结晶体管自振荡触发电路	1699
56-4	单结晶体管触发电路的其它接线方式	1705
56-5	使用小可控硅的触发电路	1708
56-6	用阻容桥移相的触发电路	1711
56-7	正弦波同步信号触发电路	1715
56-8	三相半控桥的触发电路	1723
	小结	1730
	习题和思考题	1731
第五十七章 特殊半导体器件		1732
57-1	隧道二极管	1733
57-2	场效应管	1742
57-3	集成电路	1751
57-4	特殊可控硅	1758
	小结	1763
	习题和思考题	1764
附 录		1765
习题解答		1808

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，成为当前电子设备微小型化和提高工作可靠性的一个重要技术途径。

1958年，在三面红旗的光辉照耀下，我国工人阶级和技术人员发扬独立自主、自力更生的革命精神，从无到有建立了我国自己的半导体工业。无产阶级文化大革命，粉碎了反革命修正主义路线的破坏和干扰，广大革命群众在工人阶级领导下，全面贯彻执行毛主席提出的“鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义”的总路线和“抓革命，促生产，促工作，促战备”的伟大指示，电子工业更取得了飞速的发展。

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。从半导体收音机和游行、开会用来指挥队伍的手提式扩音机，一直到畅游宇宙、高歌“东方红”的人造卫星，都是半导体施展本领的领域。

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？

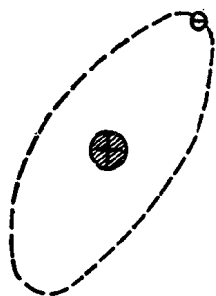


图 37-1 氢原子只有一个核外电子

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

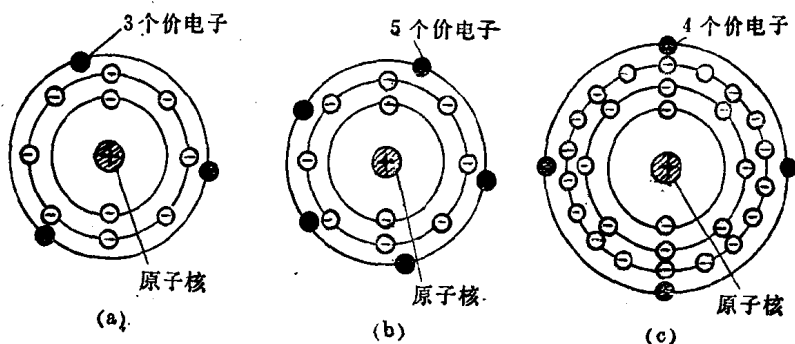


图 37-2 几种原子的结构示意图
(a) 铝Al, (b) 磷P, (c) 锗Ge

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。

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时，看不出导电性能有什么显著的变化。但是微量杂质在半导体里，却可以引起导电性能很大的改变。例如在纯硅中加入百万分之一的硼，硅的电阻率就从 2140000000 欧姆·毫米²/米减小到 4000 欧姆·毫米²/米左右，导电能力增加了几十万倍。这是半导体最显著、最突出的性质。正是因为半导体具有这种特点，人们才用掺杂质的方法制造出各种不同性质、不同用途的半导体器件。

2. 对温度的反应灵敏。当环境温度变化时，金属的电阻率变化比较小，而且随着温度的升高，金属的电阻率增大。例如温度升高 1°C ，铜的电阻率仅增加 0.4% 左右，也就是说温度升高 100°C ，电阻率增加还不到一半。半导体就不同了，它的电阻率随温度的变化很显著，而且随着温度的上升，半导体的电阻率是减小的（即电阻温度系数为负值），也就是导电能力增强了。例如纯锗，温度从 20°C 升高到 30°C ，电阻率就要降低一半左右，也就是导电能力增加了许多。

对温度反应灵敏是半导体一个很重要的特点，对半导体器件的工作性能有很大影响。

3. 光照影响导电能力。金属放在阳光下或者放在暗处，它的导电能力是看不出什么变化的。但是半导体的导电性能却和光照有很大关系。例如，有一种叫做硫化镉（ CdS ）的半导体材料，在一般灯光照射下，它的导电能力比移去灯光后要大几十到几百倍。自动控制中用的光电二极管、光电晶体管和光敏电阻等器件，就是利用半导体的这种特性制成的。

4. 电阻率的数值比金属大。我们知道, 金属的电阻率很小, 只有 $10^{-2} \sim 1$ 欧姆·毫米²/米 (就是长1米、截面积为1毫米²的金属具有0.01~1欧姆的电阻), 例如铜的电阻率是0.0175欧姆·毫米²/米。半导体的电阻率比金属大得多 (也就是半导体的导电能力比金属差得多), 在 $10 \sim 10^{13}$ 欧姆·毫米²/米 (也就是 $10 \sim 10000000000000$ 欧姆·毫米²/米) 的范围内。例如, 室温27℃时, 锑化钢的电阻率是10欧姆·毫米²/米, 纯锗是470000 欧姆·毫米²/米, 纯硅是2140000000 欧姆·毫米²/米。

半导体为什么具有这样特殊的导电性质呢? 唯物辩证法认为外因是变化的条件, 内因是变化的根据, 外因通过内因而起作用。温度、杂质、光照等外部条件对半导体导电性能发生影响的原因, 在于半导体的原子结构和其它材料不大一样, 有它自己的特殊性。下面我们就来讨论这个问题, 看看半导体究竟是怎样导电的。

37-3 半导体的导电方式

锗、硅、砷化镓和大多数的金属氧化物以及金属硫化物都是半导体。锗和硅这两种半导体材料的原子结构见图37-3。前面说过, 原子最外层的电子叫做价电子。我们可以看到, 硅和锗的原

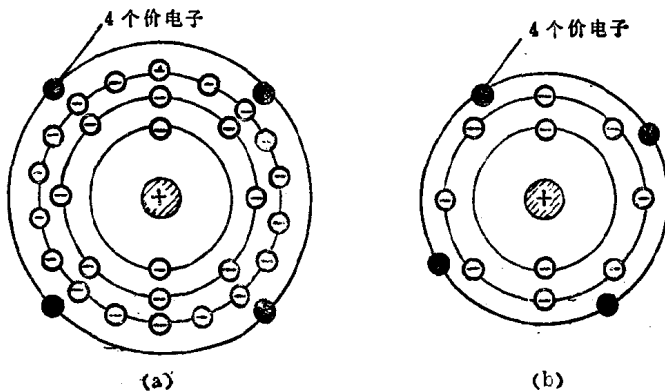


图 37-3 锗和硅的原子结构

(a) 锗 Ge, (b) 硅 Si

子在结构上有一个共同点：它们都有4个价电子，即它们都是四价元素。

自然界里的硅和锗含有许多杂质，首先必须尽量去掉这些无用的杂质，即把硅和锗提纯。然后设法使它们的原子整齐地排列起来，形成单晶体*。这时候，每个原子周围都有四个最靠近的原子做它的邻居（图37-4），而所有的原子之间的距离又都是相等的。由于绝大多数半导体都具有这种晶体结构，所以人们往往把半导体材料叫做晶体材料，这就是晶体管名称的由来，意思是说：用晶体做成的管子。

在单晶硅和单晶锗中，每个原子最外层的四个价电子不仅受自身原子核的束缚，而且还与相邻的四个原子发生联系。以一个原子为中心来看，这个中心原子拿出一个价电子和它的一个邻居原子共用，而这个邻居原子也拿出它的一个价电子和中心原子共用。因此，每两个相邻的原子之间都共有一对价电子。这一对电子中的任何一个电子，一方面围绕自身的原子核转动，另一方面也绕着相邻原子核转动。图37-5用平面图的形式表示了这种情

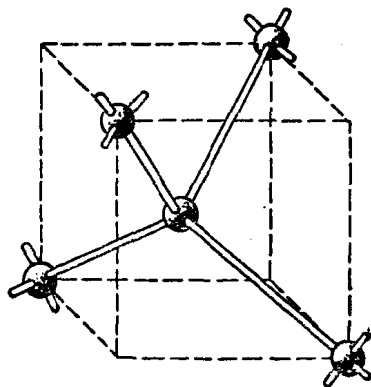


图 37-4 晶体中原子的排列方式

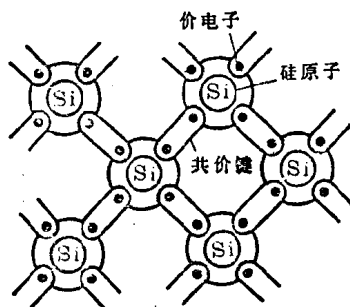


图 37-5 硅单晶中的共价键结构

* 半导体材料提纯以后，成为内部缺陷很多的晶体，叫做多晶体。使多晶体中所有的原子整齐地排列起来成为单晶体的工艺，叫做拉单晶。实际上，单晶体中也存在着缺陷（就是原子排列不规则的地方），但其数量不能超过一定限度。