

中等专业学校试用教材

A faint, stylized circuit diagram is visible in the background of the cover. It features two NPN bipolar junction transistors, each represented by a circle with a vertical line and an arrow pointing outwards. The transistors are connected to a common horizontal supply line at the top and a common horizontal ground line at the bottom. Various resistors, represented by rectangles with diagonal lines, are connected to the bases, emitters, and collectors of the transistors. The diagram is drawn with thin white lines on a yellowish-green background.

晶体管电路

周妙英 主编

中国铁道出版社

中等专业学校试用教材

晶体管电路

周妙英 主编

中国铁道出版社

1981年·北京

内 容 简 介

本书共分十章，内容包括：晶体管的基本知识、晶体管低频放大器、负反馈放大器、功率放大器、调谐放大器、晶体管振荡器、调制与解调、直流放大器、晶体管直流稳压电源、运算放大器等。

本书为中等专业学校试用教材，也可供有关专业的技术人员和工人自学参考。

中等专业学校试用教材

晶 体 管 电 路

周妙英 主编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店 经 售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168 $\frac{1}{16}$ 印张：16.25 字数：409 千

1981年4月 第1版 1981年4月 第1次印刷

印数：0001—33,000 定价：1.65元

单
三
金

前 言

本教材是根据铁道部教育局1978年《铁路中等专业学校教学计划试行草案》编写的。

本书主要结合通信和信号的设备，由浅入深、通俗易懂地叙述了晶体管电路的物理概念和部分基本电路的设计及计算。

本书共分十章，第一章至第九章由西安铁路运输学校周妙英执笔并主编全书，第十章由南京铁路运输学校陈升执笔。参加审稿会议的还有：天津铁路工程学校、郑州铁路司机学校。

在编写过程中，得到上海铁道学院刘新翰老师及有关单位的的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中可能会有差错，请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 晶体管的基本知识	1
第一节 半导体的基本知识	1
一、什么是半导体	1
二、半导体的结构	1
三、半导体的导电性能	6
四、N型和P型半导体	8
第二节 P-N结	11
一、P-N结单向导电性实验	11
二、载流子的两种运动形式	12
三、P-N结的单向导电性	14
第三节 晶体二极管	16
一、晶体二极管的结构和分类	16
二、晶体二极管的伏安特性曲线	17
三、晶体二极管的参数及其等效电路	20
四、利用万用表测量晶体二极管	25
五、我国半导体器件型号命名方法	28
第四节 硅稳压管	30
一、硅稳压管的工作原理	30
二、硅稳压管的特性参数	31
第五节 晶体三极管的工作原理	34
一、晶体三极管的基本结构	34
二、晶体三极管内部载流子的运动情况	36
三、晶体三极管的电流分配关系	38
四、晶体三极管的放大作用	40
五、晶体三极管的三种连接方法	47
第六节 晶体三极管的特性曲线	49
一、输入特性曲线	49

二、输出特性曲线	52
三、输出特性曲线的三个区域	54
第七节 晶体三极管的参数	56
一、晶体三极管的放大特性参数	56
二、晶体三极管的频率特性参数	58
三、晶体三极管的直流特性参数	59
四、晶体三极管的极限参数	61
五、噪声系数 N_F	63
六、使用晶体三极管时的注意事项	64
第八节 温度对晶体三极管参数的影响	65
一、温度对 I_{cbo} 的影响	65
二、温度对 I_{ceo} 的影响	66
三、温度对发射结正向压降 V_{be} 的影响	67
四、温度对 β 的影响	67
第九节 使用万用表粗测晶体三极管	68
一、检查晶体三极管的好坏	68
二、检查晶体三极管的性能	68
三、判断基极和管型	72
四、判断发射极和集电极	72
五、判断晶体三极管是硅管还是锗管	72
小 结	73
习 题	74
第二章 晶体管低频放大器	76
第一节 放大器的基本概念	76
一、放大器及其基本任务	76
二、放大器的分类	77
三、放大器的放大倍数	77
四、放大倍数的两种表示法	79
第二节 简单的低频放大电路	80
一、简单的低频放大电路	80

二、信号电压的输入	82
三、静态工作点的设置	84
四、晶体管可等效为一个阻值受 i_b 控制的 可变电阻	89
第三节 晶体管低频放大器的基本分析方法	93
一、图解法	93
二、计算法	108
三、单管低频放大器的设计举例	116
第四节 偏置电路和静态工作点的稳定	119
一、温度对放大器静态工作点的影响	119
二、利用直流负反馈稳定工作点	121
三、利用补偿法来稳定工作点	128
第五节 晶体管 h 参数等效电路	132
一、晶体管的等效电路和等效条件	132
二、晶体管的 h 参数等效电路	134
三、 h 参数的物理意义	137
四、简单的 h 参数等效电路	139
五、应用简单的 h 参数等效电路分析基本放大器	140
第六节 多级放大器	148
一、阻容耦合多级放大器	149
二、变压器耦合多级放大器	154
三、多级放大器的频率特性	160
四、放大器的失真	173
第七节 场效应晶体管放大器	178
一、结型场效应管的基本工作原理	178
二、绝缘栅场效应管的基本工作原理	182
三、简单的场效应管放大电路	186
小 结	187
习 题	191
第三章 负反馈放大器	196

第一节 负反馈放大器的基本概念	196
一、反馈和反馈放大器	196
二、正反馈和负反馈	196
三、反馈极性的判断	196
四、负反馈电路的分类	198
第二节 负反馈对放大器性能的影响	199
一、负反馈使放大器的放大倍数降低	199
二、负反馈使放大倍数的稳定度提高	204
三、负反馈使放大器的非线性失真减小	206
四、负反馈使放大器的噪声减小	208
五、负反馈使放大器的通频带展宽	208
第三节 负反馈对放大器输入和输出阻抗的影响	209
一、负反馈放大器的输入阻抗 r_{if}	209
二、负反馈放大器的输出阻抗 r_{of}	212
三、四种负反馈放大电路的特点	216
第四节 负反馈放大电路的分析	217
一、串联电流负反馈放大电路	217
二、串联电压负反馈放大电路	222
三、并联电压负反馈放大电路	238
四、并联电流负反馈放大电路	244
五、变压器桥式混合负反馈放大电路	244
第五节 放大器中的寄生反馈	254
一、通过直流电源内阻的寄生反馈	254
二、通过地线的寄生反馈	257
三、通过分布电容的寄生反馈	259
小 结	261
习 题	262
第四章 功率放大器	267
第一节 功率放大器的特点	267
一、选择合适的负载电阻	267

二、功率放大器的效率·····	269
三、散热·····	270
四、非线性失真·····	271
第二节 单管功率放大器·····	271
一、直流负载线和静态工作点·····	272
二、交流负载线·····	273
三、输出功率和效率·····	276
第三节 乙类推挽功率放大器·····	280
一、乙类推挽放大电路的组成和工作原理·····	280
二、乙类推挽放大电路的图解分析·····	283
三、推挽功率放大电路实例·····	291
第四节 功率放大器的非线性失真·····	292
一、晶体管的非线性引起的失真·····	292
二、输出变压器“ $B-H$ ”特性的非线性引起的失真·····	296
三、推挽放大器具有较低的非线性失真·····	296
第五节 无变压器功率放大器·····	299
一、概述·····	299
二、无输出变压器功率放大器·····	299
三、辅助对称电路·····	305
小 结·····	312
习 题·····	313
第五章 调谐放大器·····	315
第一节 概述·····	315
一、 LC 并联谐振电路·····	315
二、简单的调谐放大器·····	318
三、具有抽头的并联谐振回路·····	319
第二节 选频放大器·····	323
一、简单的 LC 选频放大器·····	323
二、晶体管输出阻抗对谐振回路的影响·····	324

三、负载电阻 R_L 对谐振回路的影响	326
四、典型的选频放大器电路	327
五、电路举例	330
第三节 中频放大器	331
一、单调谐中频放大器电路	331
二、单调谐中频放大器的指标	332
三、中和电路	334
小 结	335
习 题	335
第六章 晶体管振荡器	337
第一节 振荡器的工作原理	337
一、LC振荡回路	337
二、调谐放大器和振荡器	340
三、振荡条件	341
四、振荡的建立过程	344
五、自动偏压电路	344
第二节 LC振荡器	347
一、变压器耦合振荡器	347
二、电感三点式振荡器	350
三、电容三点式振荡器	354
四、电感三点式振荡回路的改进	356
五、电容三点式振荡回路的改进	357
六、LC振荡器的频率稳定度	358
第三节 石英晶体振荡器	360
一、石英晶体谐振器的压电效应及等效电路	360
二、并联晶体振荡器	363
三、串联晶体振荡器	364
第四节 RC振荡器	366
一、RC移相式振荡器	366
二、文氏电桥振荡器	369

三、电路举例.....	374
小 结.....	375
习 题.....	376
第七章 调制与解调.....	381
第一节 概述.....	381
第二节 调幅的基本原理.....	382
一、非线性元件中电流与电压的关系.....	382
二、调幅的基本原理.....	383
第三节 晶体二极管环形调幅器.....	386
一、当无音频信号输入, 而只有载频信号输入时.....	387
二、当音频信号和载频信号同时输入时.....	388
第四节 晶体三极管调幅器.....	393
一、晶体三极管无源调幅器.....	393
二、晶体三极管有源调幅器.....	398
第五节 调频.....	404
一、调频的基本概念.....	404
二、简单的调频电路.....	406
第六节 检波.....	408
第七节 超外差式收音机简介.....	410
一、超外差式收音机方框图.....	410
二、超外差式收音机电路.....	412
小 结.....	417
习 题.....	418
第八章 直流放大器.....	419
第一节 直流放大器中的新问题.....	419
一、级间耦合问题.....	419
二、零点漂移问题.....	420
第二节 直流放大器的耦合方式.....	420
一、同类型管的直接耦合电路.....	421
二、具有 R_{e2} 的直接耦合电路.....	421

三、用二极管或稳压管代替 R_{e2} 的直接耦合电路	421
四、NPN-PNP型管的直接耦合电路	422
第三节 差动放大器	423
一、差动放大电路抑制零点漂移的基本原理	423
二、差动放大电路的工作原理	424
三、典型的差动放大电路	427
四、具有恒流源的差动放大电路	431
五、其它接法的差动放大电路	432
小 结	434
习 题	435
第九章 晶体管直流稳压电源	437
第一节 整流电路	437
一、单相半波整流电路	437
二、单相全波整流电路	439
三、单相桥式整流电路	441
四、倍压整流电路	444
五、整流元件的串联和并联	446
六、四种小功率整流电路的比较	448
第二节 具有滤波器的整流电路	448
一、具有电容滤波器的整流电路	448
二、具有电感滤波器的整流电路	451
三、具有 Γ 型滤波器的整流电路	453
四、具有 π 型滤波器的整流电路	455
五、几种滤波电路的比较	455
第三节 稳压电源的基本原理	457
一、并联稳压法	458
二、串联稳压法	458
第四节 稳压管稳压电路	459
一、电路中各元件的选择	459
二、稳压原理	462

三、输出电压的稳定性·····	463
第五节 串联型晶体管直流稳压电源·····	463
一、简单的串联型直流稳压电源·····	464
二、具有直流放大器的稳压电源·····	467
三、具有辅助电源的稳压电路·····	470
四、具有差动放大器的稳压电源·····	472
五、稳压电源的过载保护电路·····	474
小 结·····	475
习 题·····	476
第十章 运算放大器·····	480
第一节 运算放大器的基本概念·····	480
一、什么是运算放大器·····	480
二、运算放大器的输出电压与输入电压的关系·····	484
第二节 运算放大器的运算单元电路·····	488
一、比例器·····	488
二、倒相器·····	489
三、加法器·····	489
四、减法器·····	490
五、积分器·····	491
第三节 运算放大器的简单应用·····	492
一、阻抗变换·····	492
二、正弦波振荡器·····	494
三、线性检波电路·····	494
四、限幅电路·····	495
第四节 常用集成运算放大器·····	496
一、8FC1(BG301)运算放大器的工作原理·····	497
二、部分型号的意义·····	499
三、运算放大器的使用方法·····	500
附录 符号说明·····	502

第一章 晶体管的基本知识

晶体管电路中的关键元件是晶体管，所以在学习晶体管电路之前，必须对晶体管的基本特性要有所了解。由于晶体管是用半导体材料做成的，因此要了解晶体管的基本特性，首先又必须了解半导体的特性。

第一节 半导体的基本知识

一、什么是半导体

物质按导电能力的大小可分为导体、半导体和绝缘体三类。如银、铜、铝等金属，具有良好的导电能力，所以叫做导体。金属导体的电阻率在 $10^{-1} \sim 10^{-8}$ 欧·厘米的范围内。塑料、陶瓷、云母、橡胶等导电能力很差或不能导电的物质叫做绝缘体。绝缘体的电阻率一般大于 10^{15} 欧·厘米。硅、锗、砷化镓等导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，叫做半导体。

二、半导体的结构

为什么会出现有的物质容易导电，而有的物质不容易导电这种现象呢？根本原因在于物质内部的原子结构。

（一）半导体材料硅和锗的原子结构

自然界的一切物质，都是由许多叫做分子的微粒组成的。分子又是由原子组成的。而原子则由带正电荷的原子核和分层围绕着原子核旋转的带负电荷的电子所组成。

那么电子是怎样分层的呢？原子核外的每个电子层只能容纳一定数目的电子，例如离核最近的第一电子层最多只能容纳 2 个电子，第二电子层最多能容纳 8 个电子，第三电子层最多能容纳 18 个电子，第 n 电子层最多能容纳 $2n^2$ 个电子。但是，任何原

子的最外电子层（离核最远的）最多只能容纳 8 个电子。当最外层恰好有 8 个电子时，原子就变成了稳定状态。在原子最外层的电子，叫做价电子。每个原子的最外层所含的价电子数目的多少，决定了该元素的化学性能——原子价。

每个电子都带有相同的负电量，其电量为 $-e_0 = -1.6 \times 10^{-19}$ 库伦 (C)；而原子核所带的正电量，与围绕它旋转的电子所带的负电荷的总和相等。因此在正常状态下，原子是不带电的。

由于原子核带正电，电子带负电，在原子核与电子之间存在着吸引力；而吸引力的大小与距离有关，距离越近，吸引力越大；故原子核对离核最近的第一电子层上的电子吸引力最大，而对离核最远的最外层上的价电子吸引力最小。

例如，氢 (H) 的原子核带有 $+e_0$ 的电量 ($+1.6 \times 10^{-19}$ 库伦)，同时有一个电子绕核运转，如图 1—1—1(a) 所示。氦

(He) 的原子核带有 $+2e_0$ 的电量，同时有 2 个电子绕核运转，如图 1—1—1(b) 所示。锂 (Li) 的原子核带有 $+3e_0$ 的电量，同时有 3 个电子绕核运转；第 1、2 两个电子在第一电子层上，第 3 个电子在第二电子层上，如图 1—1—1(c) 所示。锂原子核对离核较近的第一电子层上的两个电子的吸引力是相等的，而对离核较远的第二电子层上的那个电子的吸引力，则要比前两个电子的

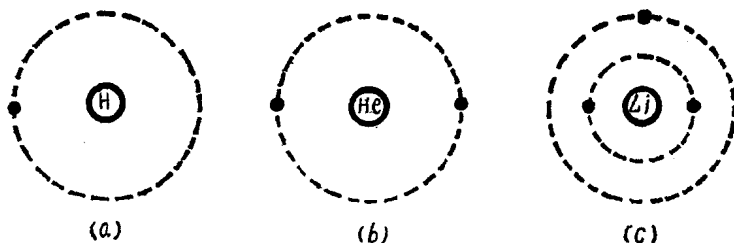


图 1—1—1 氢、氦、锂的原子结构

(a) —— 氢原子的结构模型； (b) —— 氦原子的结构模型； (c) —— 锂原子的结构模型。

吸引力弱得多,故在最外层上的价电子受原子核的束缚力最小。因此在外界条件作用下,最外层的电子很容易脱离原子核的束缚而成为自由电子。

又例如,硅(Si)的原子核带有 $+14e_0$ 的电量,核外有三个电子层;第一电子层有2个电子,第二电子层有8个电子,最外层有4个电子,如图1—1—2(a)所示。离原子核较近的两个电子层上的10个电子,由于受原子核的束缚较大,很难有活动的余地,因此它们和原子核组成一个惯性核。它的净电量是 $+14e_0 - 10e_0 = +4e_0$,即最外层有4个价电子绕惯性核旋转,如图1—1—2(a)所示,这4个价电子受原子核的束缚力较小。因为硅有4个价电子,所以叫做4价元素。

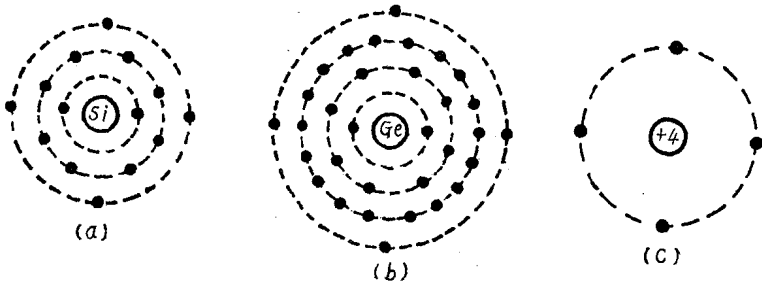


图1—1—2 硅、锗的原子结构

(a) —— 硅原子结构; (b) —— 锗原子结构; (c) —— 惯性核。

锗(Ge)的原子核带有 $+32e_0$ 的电量,核外有4个电子层;第一电子层有2个电子,第二电子层有8个电子,第三电子层有18个电子,最外层上有4个价电子。所以锗也是4价元素,如图1—1—2(b)所示。

由半导体材料硅和锗的原子结构可以看出,它们的特点是最外层电子都是4个,即硅和锗都是4价元素。但是,它们的电子层数不同。硅原子只有三个电子层,而锗原子却有四个电子层。因

此硅原子的4个价电子受原子核的束缚力，要比锗原子的4个价电子大，故后者比前者更容易脱离原子核的束缚而成为自由电子。

(二) 半导体的结构

世界上的一切物质可分为两大类：一类是流体，它包括气体和液体；另一类是固体，它包括晶体和非晶体。

晶体通常具有特殊的外形，它内部的原子按照一定的规律整齐地排列着。非晶体内部原子排列没有一定规则，也没有固定的外形。

硅和锗等半导体材料都是晶体，因此又把半导体管叫做晶体管。

图1—1—3表示了硅晶体的结构图。其中原子之间的距离都是相等的，约为 2.35×10^{-4} 微米。每个硅原子的最外层有4个价电子。硅原子在构成晶体时，每个原子要争夺四周相邻原子的4个价电子来组成稳定状态。也就是说，每个硅原子拿出一个价电子和它的一个邻居共用，而每个邻居也拿出一个价电子与它共用。这样每相邻的两个原子都共用了一对电子，叫做“共有”电子对。电子对中的任何一个电子，一方面围绕自身原子核运动，另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上。这样的组合叫做共价键结构。

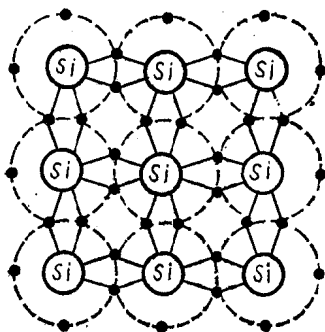


图1—1—3 硅晶体的共价键结构

(三) 本征激发产生电子-空穴对

一块不含杂质的纯净的半导体，叫做本征半导体。本征半导体硅和锗的共价键结构的特点是：外层价电子（共有电子）所受到的束缚力，并不象在绝缘体里那样大，在一定的温度下，由于热能转化为电子的动能，其中少数价电子就可能挣脱原子核的束缚而成为自由电子，同时在原来共价键的位置上，留下了相同数