

新编中等职业学校电子类专业基础课程通用系列教材

模拟电路技术基础

课程教学 · 学法指导 · 例题解析 · 同步练习 · 模拟试题

主 编 欧小东 龚建辉 肖慧君

副主编 刘 粤 罗照真 张月鹏 周鑫寿

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书分主册和附册两部分。主册包括理论教学模块和实训项目教学模块。理论教学模块以章、节为单元，在综合和紧扣全国多个省份职教高考考试大纲的基础上，按知识讲解与实践应用、经典例题解析、同步练习 3 个环节对知识进行分解和阐述，达到系统学习+学法指导+巩固练习三位一体的目的。实训项目教学模块包含元器件的识别与检测、单元电路的安装与检测和功能性电路的安装与检测，共计 13 个项目。附册为 7 套单元测试试卷，方便授课教师对学生进行考核检查。

本书内容包括半导体器件、基本放大器、负反馈放大器、直接耦合放大器和集成运算放大器、正弦波振荡器、低频功率放大器、直流稳压电源与晶闸管应用电路。主体内容为 39 个单元的知识系统学习与同步指导、近 100 例的经典例题解析示范、每章的同步练习题，以及 7 套单元测试试卷。

本书是为电子类专业学生对口升学考试量身编写的集教学、教辅功能于一体的创新教材，也可作为大中专院校电子类、机电类专业的学习指导用书和相关专业教师的教学参考用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

模拟电路技术基础 / 欧小东，龚建辉，肖慧君主编. —北京：电子工业出版社，2023.5

ISBN 978-7-121-45550-6

I. ①模… II. ①欧… ②龚… ③肖… III. ①模拟电路—职业教育—教材 IV. ①TN710

中国国家版本馆 CIP 数据核字（2023）第 080488 号

责任编辑：蒲 玥 特约编辑：田学清

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：880×1 230 1/16 印张：22.5 字数：654 千字 插页：32

版 次：2023 年 5 月第 1 版

印 次：2023 年 5 月第 1 次印刷

定 价：66.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：
(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：(010) 88254485；puyue@phei.com.cn。

前言

伴随着我国从制造业大国向制造业强国的转型，职教高考必将在全国各地不断升温。《国家职业教育改革实施方案》强调，全力提高中等职业教育发展水平，建立职教高考制度，大力推进高等职业教育高质量发展，推动具备条件的普通本科高校向应用型高校进行转变，开展本科层次职业教育试点，持续完善高层次应用型人才培养体系。职业教育将迎来发展的春天。

职业学校广大教师和应考生在教与学的过程中，深感手边的教学资料非常有限，匹配的专业课程教材和复习资料更是匮乏。现有的教材存在知识点分解不细、解题示范太少等缺陷，不适合职业高中层次的学生进行自主学习。因此急需一套针对学生实际情况，以课程教学为表现形式，知识点全面且有层次，学法指导通俗易懂，例题选取全面，紧扣新考试大纲，集课程教学、学法指导和复习于一体的教学用书。

26年来，编者一直从事对口升学“电工技术基础”“电子技术基础”等高考科目的教学和考前辅导工作，拥有丰富的教学指导和辅导经验及系统完备的专业资料。应新职教高考升学复习的需要，现将编者的“模拟电路”课程教学资料科学、系统地整理成册，编成本书，奉献给同行教师和莘莘学子。

本书的特点如下。

(1) 适用人群定位准确：目前，一线教师普遍认为现行中职电子专业使用的专业课程教材存在“一刀切”的现象，教材内容与培养目标的定位几乎都存在不匹配问题。不匹配的表现：用于技能班的教学内容偏深、偏难，教材中实训方面的内容不系统且偏少，无法体现“理论够用为度，强化技能训练”的原则；用于职教高考班的教学内容存在不系统、不全面、内容太浅的问题，教师必须额外补充大量教材中没有的课程内容和练习。本书是为电子类专业学生对口升学考试量身编写的，填补了同类图书的空白。

(2) 广泛的适用性：真正做到有教学理论可依，有解题经验可学。本书参考了湖南、湖北、广东、江苏、北京等多个省市的考纲和部分考题，具有广泛的适用性。

(3) 学习要求明确：充分体现了能力本位的特色，根据教育部颁发的教学大纲，综合参考了多省市考纲后提出明确的学习要求。

(4) 知识同步指导：将全书知识化整为零，对每节的知识点进行指导分析和学法说明，并在内容选取上对教材和考纲做了前瞻性的预测，在深度和广度上做了适度的拓展，确保内容的长效性。

(5) 经典例题解析：通过大量典型的例题解析，帮助学生理解和巩固基本概念，提高解题能力。本书对精选的例题做到了翔实全面的讲解，注重理论联系实际，不但阐述了解题的过程，突出了解题的思路、方法和技巧，而且对学生易出错处加以点评，很适合学生自学。

(6) 同步练习题和单元测试试卷相结合：这是一个将全书知识点化零为整、融会贯通的



环节。本书选择了大量适合中等职业教育的题目，供学生练习、巩固和提高；题目难度符合普通学生学习，还适当选择了一些具有相当难度的题目，可以进一步提高学生的解题能力，因此也更适合对口升学学生进行备考复习；书中附有各章节同步练习题与单元测试试卷的参考答案，以方便查验。

(7) 内容完整全面：理论教学模块和实训项目教学模块内容系统、翔实。同步练习题、单元测试试卷从不同形式、不同层面帮助学生巩固知识、融合知识和运用知识，全面检查学生的学习及复习备考情况。题材选取上围绕课程的重点、难点和考点，翔实、系统且全面。

本书由欧小东、龚建辉、肖慧君任主编，刘粤、罗照真、张月鹏、周鑫寿任副主编。本书在编写过程中得到了湖南师范大学工学院孙红英、杨小钨两位教授的悉心指导，以及郴州综合职业中专学校领导和同事的大力支持。在此，一并向他们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中难免有不妥之处，敬请专家和读者批评指正。

编 者

电子工业出版社版权所有
盗版必究

目 录

理论教学模块

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体及其特性	1
1.1.2 本征半导体	2
1.1.3 掺杂半导体	3
知识小结	4
1.2 PN 结的形成及特性	5
1.2.1 PN 结的形成过程	5
1.2.2 PN 结的单向导电性	7
知识小结	8
1.3 半导体二极管	8
1.3.1 二极管的结构与类型	8
1.3.2 二极管的特性和主要参数	9
1.3.3 二极管应用电路	12
1.3.4 二极管的简易检测方法	17
知识小结	19
1.4 特种二极管及其应用	19
1.4.1 稳压二极管	19
1.4.2 发光二极管	21
1.4.3 光电二极管	23
1.4.4 变容二极管	24
知识小结	25
1.5 半导体三极管	25
1.5.1 三极管的基本结构和类型	25
1.5.2 三极管的伏安特性曲线	29
1.5.3 三极管的主要参数	33
1.5.4 特种三极管及其应用	36
1.5.5 三极管的判别与质量估测	39
知识小结	41



1.6 场效应管	42
1.6.1 结型场效应管	42
1.6.2 绝缘栅场效应管	46
知识小结	52
1.7 半导体器件同步练习题	52
第2章 基本放大器	63
2.1 基本放大器的组成及工作原理	63
2.1.1 基本放大器的基础知识	63
2.1.2 基本放大器的组成	67
2.1.3 基本放大器的直流通路和交流通路	67
知识小结	71
2.2 图解法	71
2.2.1 图解法静态分析	72
2.2.2 图解法动态分析	74
2.2.3 非线性失真及消除	76
知识小结	79
2.3 微变等效电路法	79
知识小结	83
2.4 稳定静态工作点的放大电路	83
2.4.1 温度对静态工作点的影响	83
2.4.2 分压式电流负反馈偏置电路	84
2.4.3 集电极-基极电压负反馈偏置电路	88
知识小结	90
2.5 共集电极和共基极放大器	90
2.5.1 共集电极放大器	90
2.5.2 共基极放大器	94
知识小结	95
2.6 调谐放大器	95
2.6.1 调谐放大器的工作原理	95
2.6.2 调谐放大器的类型	97
知识小结	98
2.7 多级放大器	98
2.7.1 多级放大器的组成和耦合方式	98
2.7.2 阻容耦合放大器	99
2.7.3 其他耦合放大器	102
知识小结	103
2.8 场效应管放大器	103
2.8.1 共源极放大器	103



2.8.2 共漏极放大器	107
知识小结	108
2.9 基本放大器同步练习题	108
第 3 章 负反馈放大器	120
3.1 反馈的概念与基本类型	120
3.1.1 反馈的概念	120
3.1.2 反馈的基本类型	121
知识小结	126
3.2 负反馈放大器放大倍数的一般表达式	126
3.2.1 闭环放大倍数的一般表达式	126
3.2.2 深度负反馈条件下的近似计算	128
知识小结	129
3.3 负反馈对放大器性能的影响	129
3.3.1 提高放大倍数的稳定性	129
3.3.2 减小非线性失真	130
3.3.3 展宽频带	131
3.3.4 改变输入和输出电阻	131
3.3.5 降低放大器的内部噪声	132
知识小结	133
3.4 负反馈放大器同步练习题	133
第 4 章 直接耦合放大器和集成运算放大器	138
4.1 直流放大器的特殊问题	138
4.1.1 直流放大器的幅频特性	138
4.1.2 直流放大器在应用中需要解决的问题	139
知识小结	142
4.2 差动放大器	142
4.2.1 差模信号与共模信号	142
4.2.2 差动放大器的组成和特点	144
知识小结	150
4.3 集成运算放大器基础知识	150
4.3.1 集成电路概述	150
4.3.2 集成运放的构造与符号	151
4.3.3 常用集成运放简介	152
4.3.4 集成运放的主要参数	154
4.3.5 集成运放的理想特性	155
知识小结	156
4.4 集成运放线性应用电路	156



4.4.1	比例运算电路	156
4.4.2	加法运算（求和）电路	161
4.4.3	减法运算电路	162
4.4.4	积分和微分运算电路	166
4.4.5	集成运放的其他线性应用电路	167
	知识小结	170
4.5	集成运放非线性应用电路	170
4.5.1	单限电压比较器	170
4.5.2	滞回电压比较器	173
4.5.3	非正弦波发生器	175
	知识小结	177
4.6	集成运放使用常识	177
4.6.1	集成运放的保护措施	177
4.6.2	集成运放的选择和常见故障	178
	知识小结	179
4.7	直接耦合放大器和集成运算放大器同步练习题	179
第 5 章	正弦波振荡器	193
5.1	正弦波振荡器的基本原理和类型	193
	知识小结	196
5.2	LC 振荡器	196
5.2.1	变压器反馈式振荡器	196
5.2.2	电感反馈式振荡器	197
5.2.3	电容反馈式振荡器	198
5.2.4	改进型电容反馈式振荡器	200
	知识小结	205
5.3	RC 振荡器	205
5.3.1	RC 桥式振荡器	205
5.3.2	RC 移相式振荡器	208
	知识小结	209
5.4	石英晶体振荡器	209
5.4.1	石英晶体的特性	209
5.4.2	石英晶体振荡电路	210
	知识小结	213
5.5	正弦波振荡器同步练习题	213
第 6 章	低频功率放大器	219
6.1	低频功率放大器概述	219
6.1.1	对功率放大器的要求	219



6.1.2 功率放大器的类型	220
知识小结	222
6.2 有输出变压器功率放大器	222
6.2.1 单管甲类功率放大器	222
6.2.2 推挽功率放大器	224
知识小结	227
6.3 无输出电容功率放大器	227
6.3.1 双电源乙类互补对称 OCL 电路	227
6.3.2 双电源甲乙类互补对称 OCL 电路	229
知识小结	232
6.4 无输出变压器功率放大器	232
6.4.1 单电源乙类互补对称 OTL 电路	232
6.4.2 单电源甲乙类互补对称 OTL 电路	233
知识小结	235
6.5 BTL 功率放大器与集成功率放大器	235
6.5.1 BTL 功率放大器	236
6.5.2 集成功率放大器	237
知识小结	241
6.6 低频功率放大器同步练习题	241
第 7 章 直流稳压电源与晶闸管应用电路	248
7.1 单相整流电路	249
7.1.1 单相半波整流电路	249
7.1.2 单相全波整流电路	250
7.1.3 单相桥式整流电路	251
7.1.4 倍压整流电路	253
知识小结	254
7.2 滤波电路	255
7.2.1 电容滤波电路	255
7.2.2 电感滤波电路	258
7.2.3 复式滤波电路	259
7.2.4 电子滤波电路	260
知识小结	261
7.3 晶体管稳压电路	261
7.3.1 硅稳压二极管稳压电路	262
7.3.2 串联型稳压电路	265
7.3.3 开关型稳压电路	274
知识小结	277
7.4 三端集成稳压器	277



7.4.1	三端固定式集成稳压器	278
7.4.2	三端可调式集成稳压器	282
	知识小结	284
7.5	晶闸管	284
7.5.1	单向晶闸管	284
7.5.2	双向晶闸管	288
	知识小结	289
7.6	晶闸管触发电路	289
7.6.1	单向晶闸管触发电路	290
7.6.2	双向晶闸管触发电路	293
	知识小结	294
7.7	晶闸管应用电路	294
7.7.1	晶闸管可控整流电路	294
7.7.2	晶闸管的其他应用电路	299
	知识小结	300
7.8	直流稳压电源与晶闸管应用电路同步练习题	301

实训项目教学模块

实训项目 1	二极管、三极管、光电耦合器的识别与检测	311
实训项目 2	焊接与布线	317
实训项目 3	单级放大器的安装与检测	321
实训项目 4	多级放大器的安装与检测	324
实训项目 5	负反馈放大器的安装与检测	326
实训项目 6	运算放大器的安装与检测	328
实训项目 7	RC 桥式振荡器的安装与检测	331
实训项目 8	OTL 功率放大器的安装与检测	333
实训项目 9	触摸式电子防盗报警器的安装与检测	336
实训项目 10	LED 显示器的安装与检测	339
实训项目 11	串联可调稳压电源的安装与检测	341
实训项目 12	家用调光台灯的安装与调试	344
实训项目 13	声光双控节能灯的安装与调试	347

理论教学模块

第1章 半导体器件

✓ 本章学习要求

- (1) 了解半导体的基本知识, 理解本征半导体和掺杂半导体的导电特性, 掌握 PN 结的单向导电性。
- (2) 理解半导体二极管的伏安特性和主要参数, 以及限幅和钳位原理与应用电路。
- (3) 掌握稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管的特性、应用与检测方法等。
- (4) 掌握半导体三极管的结构、工作电压、基本连接方式和电流分配关系。
- (5) 熟练掌握半导体三极管的放大作用, 共发射极电路的输入、输出特性曲线, 主要参数及温度对参数的影响。
- (6) 了解绝缘栅场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数。

本章简单介绍本征半导体和掺杂半导体的导电特性, 讨论 PN 结的形成及单向导电性, 在此基础上介绍半导体二极管、半导体三极管和场效应管。

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体及其特性

自然界中物质的导电能力是不同的, 按其导电能力的强弱, 可分为三大类: 导电能力特别强的物质称为导体, 如常见的金属、电解液等, 其电阻率通常为 $10^{-4} \sim 10^{-1} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; 导电能力特别差, 即几乎不导电的物质称为绝缘体, 如陶瓷、橡胶、胶木等, 其电阻率通常为 $10^{13} \sim 10^{26} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; 而导电能力介于导体和绝缘体之间且导电性能奇特的物质称为半导体, 如硅、锗、硒与一些金属氧化物和硫化物等, 其电阻率通常为 $10^1 \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

半导体的特性如下。

(1) 热敏性: 当环境温度变化时, 金属导体的电阻率变化很小, 但半导体的电阻率会显著下降 (温度每升高 10°C , 半导体的电阻率会降至原来的二分之一左右), 导电能力大大增强。对温度变化非常敏感的特性称为半导体的热敏性。热敏性会降低半导体器件的工作性能,



但也可以利用热敏性制成各种热敏元器件，如热敏电阻等。

(2) 光敏性：当光照变化时，金属导体的电阻率几乎不变，但半导体的电阻率会显著下降（例如，对于硫化镉，一般在灯光照射环境下，它的电阻率是移去灯光后的几十分之一），导电能力大大增强。对光照变化非常敏感的特性称为半导体的光敏性。利用半导体的光敏性可以制成各种光敏元器件，如光敏电阻和光电二极管等。

(3) 杂敏性：在金属导体中，即使掺入千分之一的杂质，其电阻率的变化也是微不足道的；而在半导体硅中，只要掺入亿分之一的硼，其电阻率就会下降为原来的几万分之一。对杂质异常敏感的特性称为半导体的杂敏性，这是半导体最突出、最显著的特性。利用杂敏性，通过控制掺杂的方法可以制造出二极管、三极管等各种不同用途和功能的半导体器件。

为了能够理解上述特性，必须了解半导体的结构和导电特性。

1.1.2 本征半导体

1. 半导体的共价键结构

在电子元器件中，用得最多的半导体材料是硅（Si）和锗（Ge）。硅和锗的原子都是单晶体晶格结构构成的晶体，因此半导体管也叫晶体管。硅和锗都是4价元素，原子的最外层轨道上有4个价电子，价电子带4个单位的负电荷，原子核带4个单位的正电荷，故原子呈电中性，如图1-1（a）所示；邻近原子组成共价键结构，如图1-1（b）所示。共价键结构中的每个价电子同时受到相邻两个原子核的束缚，维持一种相对稳定的平衡状态，故它既不像导体中那样容易挣脱，又不像绝缘体中那样被束缚得很紧，因此半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

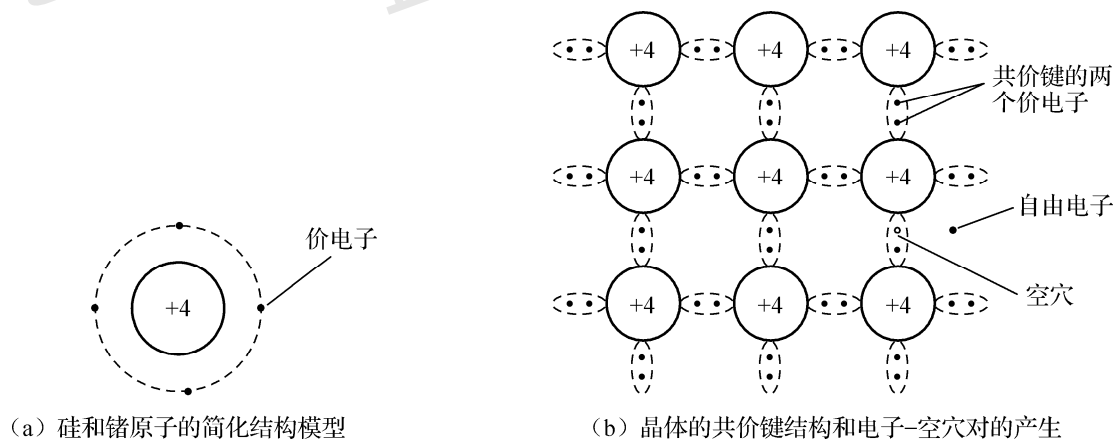


图 1-1 硅、锗原子结构模型及共价键结构示意图

2. 本征半导体的特性

完全纯净的、结构完整的半导体称为本征半导体。

(1) 本征半导体的本征激发与复合。

在一定温度或一定强度的光照下，本征半导体的硅和锗中的极少数价电子获得足够的能量后，就能挣脱共价键结构的束缚，成为带单位负电荷的自由电子，同时原来的键位上留下相同数量的带单位正电荷的空位（俗称空穴，空穴的出现是半导体导电区别于导体导电的



一个主要特征), 这种现象称为本征激发。由于自由电子与空穴总是相伴而生、成对出现的, 所以也称自由电子-空穴对, 如图 1-1 (b) 所示。有的自由电子因能量不足而再与空穴相遇时, 又会重新被俘获, 重新结合, 使自由电子-空穴对消失, 这种现象称为复合。自由电子-空穴对永远处在既激发又复合的动态运动中, 但在一定的温度条件下, 自由电子-空穴对的数量相对稳定, 达到动态平衡。

动态平衡的本征半导体中自由电子-空穴对的浓度随温度或光照的升高(增强)而急剧升高, 相应的导电能力也越强。

(2) 本征半导体的导电特性。

自由电子-空穴对能形成定向运动。例如, 在外加电场的作用下, 邻近原子的价电子能够跳过来填补这个空穴, 这时空穴就转移到邻近的那个原子上了, 这个新产生的空穴又会被其邻近原子的价电子填补。这样依次递补, 形成带负电荷的价电子依次填补空穴的运动, 称为价电子填补空穴的运动。空穴的运动方向与价电子的运动方向相反。

我们把能够运载电荷的粒子称为载流子。金属导体中只有一种载流子, 即自由电子。在本征半导体中, 自由电子带单位负电荷, 空穴带单位正电荷, 因此本征半导体中有两种载流子, 即自由电子和空穴。尽管本征半导体中有两种载流子, 但这两种载流子的浓度之和仍远远低于金属导体中自由电子的浓度, 因此本征半导体的导电能力远远弱于金属导体。

两种导电方式: 如图 1-2 所示, 在本征半导体的两端加上电压, 就会有电流产生。该电流由两部分组成, 即逆外电场方向运动的自由电子产生的电子电流和顺外电场方向运动的空穴产生的空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷的极性相反, 它们的运动方向也相反, 因此形成的电流方向是一致的, 即总电流为二者之和。

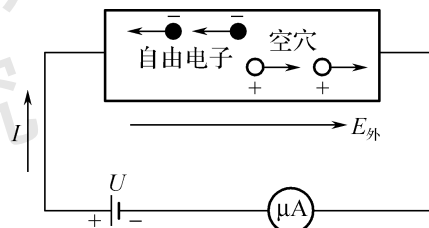


图 1-2 本征半导体的两种导电方式

1.1.3 掺杂半导体

本征半导体中虽有两种载流子, 但本征激发的载流子数目极其有限, 导电能力很弱且导电能力的强弱也不好控制。实际的半导体器件都是通过在本征半导体中掺入微量的杂质来弥补上述不足的。在本征半导体中, 两种载流子的浓度相等, 但掺入微量的杂质后, 两种载流子的浓度就不再相等了。根据掺入杂质的不同, 增加的载流子或者是空穴, 或者是自由电子, 因而掺杂半导体有空穴型(P 型)和电子型(N 型)之分。

1. P 型半导体

在本征硅的晶体内掺入微量的 3 价元素硼(B)时, 未改变硅单晶的共价键结构, 只使某些晶格结点的硅原子被硼原子取代, 如图 1-3 (a) 所示。每掺入一个硼原子, 就能额外获得一个空穴。虽然此时本征激发仍然存在, 如图 1-3 (b) 所示, 但微量硼元素产生的空穴数量相比于自由电子-空穴对在数量上的优势是巨大的, 空穴的浓度远远高于自由电子的浓度。也就是说, 在 P 型半导体中, 空穴为多数载流子(简称多子), 自由电子为少数载流子(简称少子)。

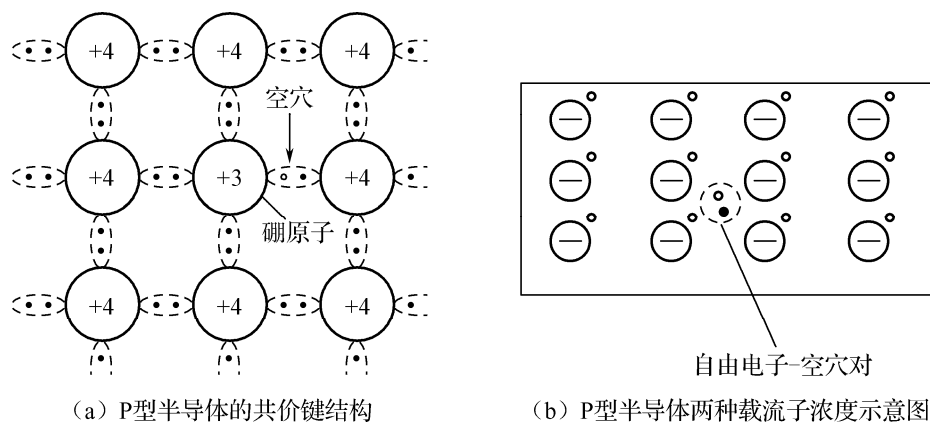


图 1-3 P 型半导体的共价键结构和载流子浓度示意图

P 型半导体的导电以空穴为主，形成的电流主要是空穴电流，故称空穴型半导体。

2. N 型半导体

在本征硅的晶体内掺入微量的 5 价元素磷 (P) 时，便会发生另一种情况。每掺入一个磷原子，就能额外获得一个自由电子，如图 1-4 (a) 所示。同理，自由电子的浓度也将远远高于空穴的浓度，如图 1-4 (b) 所示。也就是说，在 N 型半导体中，自由电子为多数载流子，空穴为少数载流子。

由于 N 型半导体的导电以自由电子为主，形成的电流主要是电子电流，所以称电子型半导体。

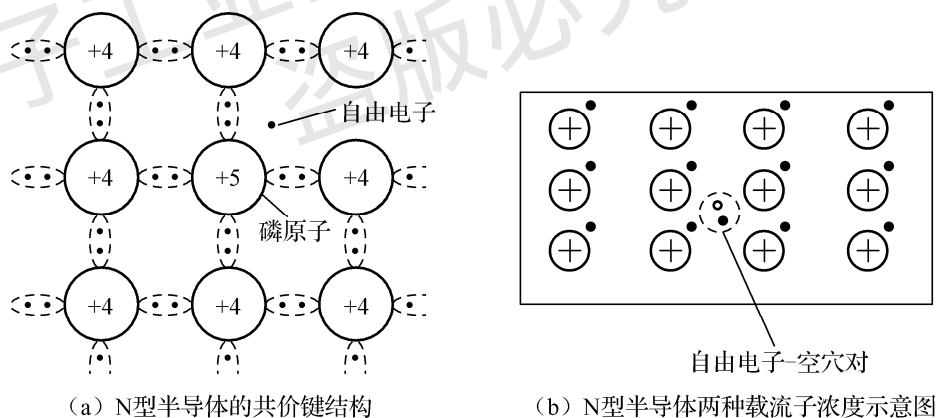


图 1-4 N 型半导体的共价键结构和载流子浓度示意图

还需要强调的是，在掺杂半导体中，本征激发虽然存在，但由本征激发产生的载流子浓度远远低于掺杂所带来的载流子浓度。另外，无论是 P 型半导体还是 N 型半导体，就整块半导体而言，掺杂并未破坏整块半导体的正、负电荷的平衡状态，它仍是呈电中性的，即对外是不带电的。只有在掺杂半导体的两端加上电压时，才有电流产生，才能反映出其导电特性。

知识小结

- (1) 热敏性、光敏性、杂敏性是半导体的三大特性。
- (2) 在本征半导体中，自由电子和空穴相伴产生，数目相同，当温度升高时，所激发的自由电子-空穴对的数目增加，半导体的导电能力增强。



(3) 半导体中存在两种载流子，一种是带负电荷的自由电子，另一种是带正电荷的空穴，它们都可以运载电荷形成电流。

(4) 掺杂半导体分为以下两种。

① P 型半导体：在本征硅（或锗）中掺入少量硼元素（3 价）所形成的半导体。其中，多数载流子为空穴，少数载流子为自由电子。

② N 型半导体：在本征硅（或锗）中掺入少量磷元素（5 价）所形成的半导体。其中，多数载流子为自由电子，少数载流子为空穴。

1.2 PN 结的形成及特性

在一块完整的晶片上，通过掺杂工艺，可以一边形成 P 型半导体，另一边形成 N 型半导体。在 P 型和 N 型半导体结合面的两侧会因物理过程形成一个特殊的带电薄层，这个带电薄层称为 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、三极管、场效应管、可控硅和半导体集成电路等元器件的基础，其最基本的特性是单向导电性。

1.2.1 PN 结的形成过程

1. 扩散运动建立内电场

P 型半导体的多数载流子——空穴的浓度远高于 N 型半导体，N 型半导体的多数载流子——自由电子的浓度远高于 P 型半导体。因为存在浓度差，所以多数载流子必将从浓度高的区域向浓度低的区域运动，即 P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的自由电子向 P 区扩散，这种多数载流子因浓度上的差异而形成的定向运动称为扩散运动。

通常，扩散是从浓度差最大的交界面开始的，扩散的过程是：P 区的空穴进入 N 区后，便与 N 区的自由电子复合；N 区的自由电子进入 P 区后，便与 P 区的空穴复合，如图 1-5 (a) 所示。扩散的结果是 P 区和 N 区交界处原来呈现的电中性遭到破坏。P 区一侧失去空穴，留下了带负电荷的杂质离子层；N 区一侧失去电子，留下了带正电荷的杂质离子层。杂质离子层虽然也带电，但由于物质结构，它们并不能移动，所以不能参与导电。因此，扩散的结果是在交界的两侧形成了一个带异性电荷的薄层（厚度：0.5~0.75mm），此薄层称为空间电荷区，即所谓的 PN 结，如图 1-5 (b) 所示。在空间电荷区，多数载流子已经扩散到对方并被复合掉了，或者说消耗尽了，因此又称空间电荷区为耗尽层。空间电荷区中的正、负离子层形成一个空间电场，称为内电场，用 E_0 表示。空间电荷区中的正、负离子层产生的电位差称为接触电位差或势垒电位差（硅材料： $E_0=0.6\sim0.7V$ ；锗材料： $E_0=0.2\sim0.3V$ ）。空间电荷区以外的 P 区和 N 区仍是电中性的。

2. 内电场对载流子的作用

(1) 阻碍多数载流子继续扩散。

多数载流子（空穴和自由电子）的扩散运动形成的电流分别称为空穴扩散电流和电子扩



散电流。二者扩散运动方向相反，形成的扩散电流方向却是一致的，总扩散电流为空穴扩散电流与电子扩散电流之和。内电场因多数载流子的扩散运动而形成，但扩散运动的方向与内电场的方向相反，因此内电场的建立反过来会阻碍多数载流子继续扩散，从而阻碍空间电荷区进一步变厚，如图 1-6 (a) 所示。

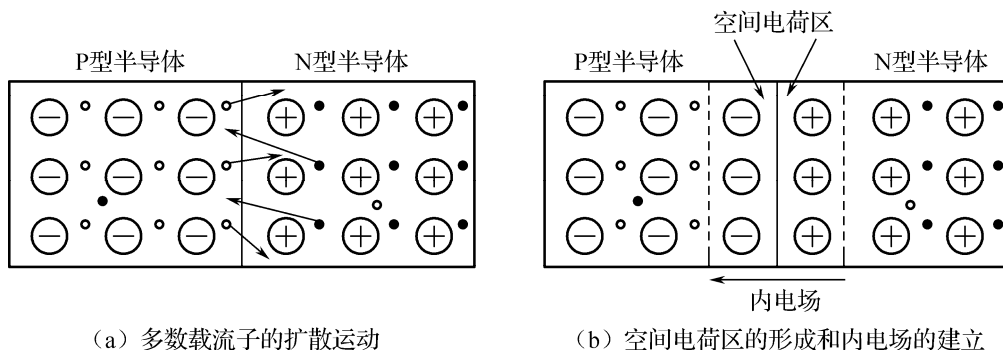


图 1-5 PN 结的形成过程

(2) 帮助少数载流子漂移。

P 区的少数载流子（自由电子）和 N 区的少数载流子（空穴）一旦到达空间电荷区的边缘，就被内电场拉向对方，形成与扩散运动相反的运动，少数载流子在内电场作用下的这种定向运动称为漂移运动。因为漂移运动的方向与内电场对少数载流子的作用力的方向一致，所以内电场会帮助少数载流子漂移，使空间电荷区进一步变薄，如图 1-6 (b) 所示。漂移运动形成的电流称为漂移电流。P 区和 N 区的漂移运动方向相反，但由于载流子的带电性质也相反，所以形成的漂移电流方向是一致的，总漂移电流为电子漂移电流与空穴漂移电流之和。

综上所述，PN 结同时存在着机理不同、方向相反的两种电流——多数载流子的扩散电流（缘于多数载流子浓度不均）和少数载流子的漂移电流（缘于内电场），PN 结的宏观电流为二者之差。

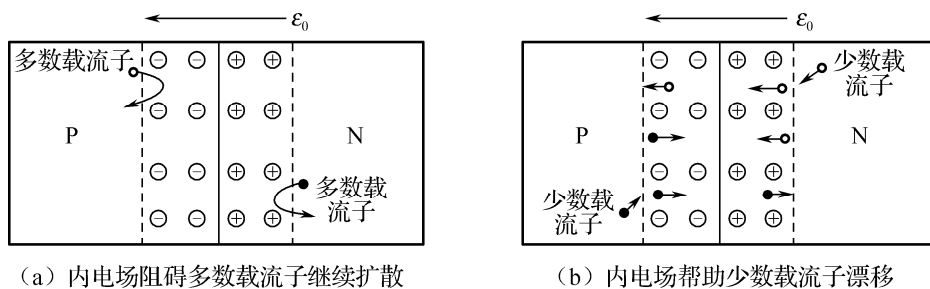


图 1-6 内电场对载流子的作用

(3) PN 结的形成过程。

PN 结的内电场阻碍多数载流子继续扩散，使扩散电流不断减小；帮助少数载流子加强漂移，使漂移电流不断增大。当扩散电流的减小与漂移电流的增大达到大小相等、方向相反而互相抵消，即处在动态平衡状态时（称平衡 PN 结），交界面处再无电流，PN 结的厚度也处于稳定状态，PN 结便形成了。

必须强调说明的是，当温度升高时，PN 结的接触电位差 ε_0 会减小，其温度系数约为 $-2.5\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，这是半导体的热敏性的体现，是由半导体对温度敏感所致的。



1.2.2 PN 结的单向导电性

通过前面的分析可知,在无外加电场时,通过PN结的扩散电流等于漂移电流,PN结中无电流流过,PN结的厚度保持一定而处于稳定状态。但如果打破动态平衡,在PN结两端加上极性不同的电压,那么PN结会呈现正向导通、反向截止的单向导电性。

1. PN 结正向偏置

在PN结两端外加电压,称给PN结加偏置。当给PN结的P端接高电位、N端接低电位时,称PN结外加正向电压或PN结正向偏置,简称正偏,如图1-7(a)所示。

当PN结正向偏置时,外电场与内电场方向相反,从而削弱了内电场。内电场的削弱打破了PN结的动态平衡:多数载流子的扩散运动大于少数载流子的漂移运动,多数载流子的扩散电流大于少数载流子的漂移电流,空间电荷区变薄。此时,PN结中形成了以扩散电流为主的正向电流,又因为扩散电流是由高浓度的多数载流子形成的,所以正向电流 I 较大,PN结呈现的电阻较小,称PN结为导通状态。

正向电压的稍微升高会造成PN结接触电位差的微小减小,导致PN结的正向电流急剧增大,为防止PN结过流烧毁,电路中必须串接限流电阻 R 。

2. PN 结反向偏置

当给PN结的P端接低电位、N端接高电位时,称PN结外加反向电压或PN结反向偏置,简称反偏,如图1-7(b)所示。

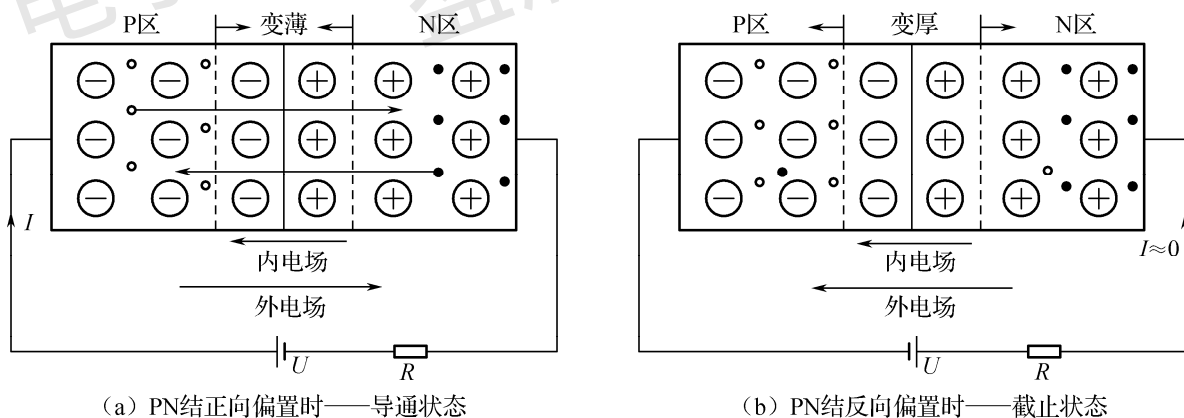


图 1-7 PN 结的单向导电性

当PN结反向偏置时,外电场与内电场方向相同,从而增强了内电场。内电场的增强打破了PN结的动态平衡:多数载流子的扩散运动小于少数载流子的漂移运动,多数载流子的扩散电流小于少数载流子的漂移电流,空间电荷区变厚。此时,PN结中形成了以漂移电流为主的反向电流(扩散电流趋于零),又因为漂移电流是由浓度极低的少数载流子形成的,所以反向电流 I 极小(在常温下,锗管为 μA 级、硅管为 nA 级),PN结呈现的电阻很大,几乎不导电,称PN结为截止状态。

反向电流实质是少数载流子的漂移电流。在一定的温度条件下,少数载流子浓度低且非常稳定,因此在反向偏压大于一定数值且小于反向击穿电压数值的范围内,反向电流基本保



持不变,因而又称反向电流为反向饱和电流。反向电流受温度的影响很大,温度越高,反向电流越大。

我们把 PN 结正向偏置时导通、反向偏置时截止的特性称为 PN 结的单向导电性。

知识小结

(1) 半导体中的载流子有扩散和漂移两种运动方式。多数载流子因浓度上的差异而形成的运动称为扩散运动,少数载流子在内电场作用下的定向运动称为漂移运动。

(2) PN 结是构成半导体二极管、三极管、场效应管、可控硅和半导体集成电路等元器件的基础,其最基本的特性是单向导电性。

(3) PN 结的单向导电性是指 PN 结正向偏置时处于导通状态、反向偏置时处于截止状态。

1.3 半导体二极管

首先在 PN 结两侧的中性区各引出一条金属电极引线,然后进行封装,就构成最简单的半导体二极管。本节介绍二极管的结构与类型、伏安特性、主要参数、应用电路和质量检测方法。

1.3.1 二极管的结构与类型

半导体二极管简称二极管,其结构的核心就是一个 PN 结,其常见的外形如图 1-8 (a) 所示,通常由管芯、管壳和电极 3 部分组成。二极管的电路符号及其等效如图 1-8 (b) 所示,文字符号用“VD”表示。它有两个电极:接 P 区的为正极 (A),接 N 区的为负极 (K)。

二极管的分类如下。

(1) 按制造材料:可分为硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管等。

(2) 按用途:可分为整流二极管、稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等,如图 1-9 所示。

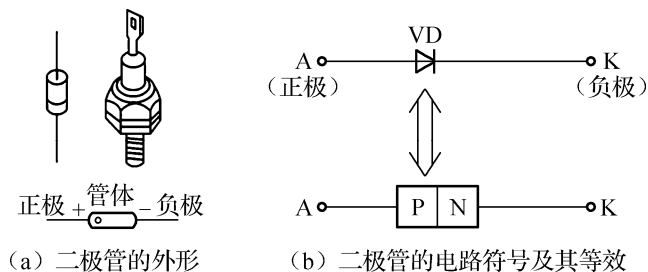


图 1-8 二极管的结构和符号

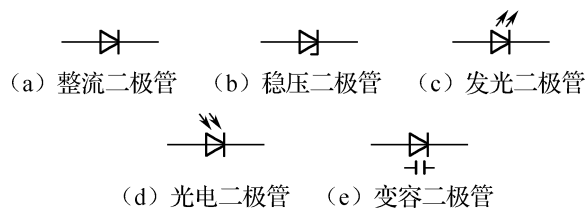


图 1-9 几种常用二极管及其符号

(3) 按管芯结构:可分为点接触型二极管、面接触型二极管、平面型二极管,如图 1-10 所示。

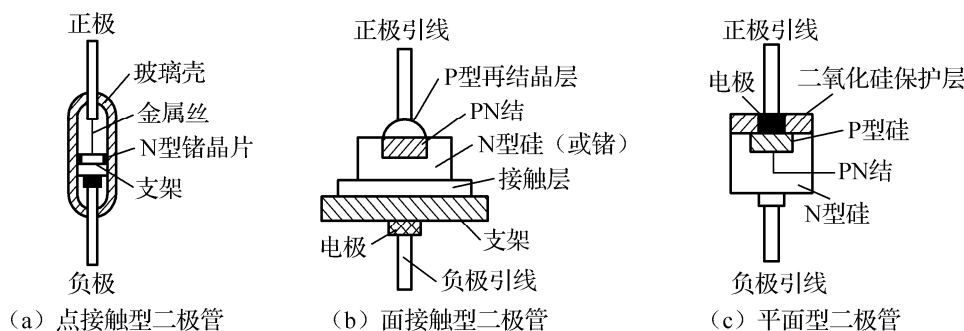


图 1-10 二极管的几种管芯结构类型

点接触型二极管的特点: PN 结面积很小, 故极间电容很小, 适用于小电流整流和高频的检波、调制, 以及数字系统中的开关电路。例如, 2AP1 是点接触型锗二极管, 其最大整流电流为 16mA、最高工作频率为 150MHz。但点接触型二极管不能通过大电流和承受较高的反向电压。

面接触型二极管的特点: PN 结面积大, 极间电容很大, 故能通过较大的电流, 不宜用于高频电路中, 主要用于低频整流电路中。例如, 2CP1 是面接触型硅二极管, 其最大整流电流为 400mA、最高工作频率仅为 3kHz。

平面型二极管的特点: PN 结面积和极间电容均有大有小, 当 PN 结面积较大时, 适用于大功率整流; 当 PN 结面积较小时, 适用于数字系统中的开关电路。例如, 2CZ20 是大功率整流二极管, 其最大整流电流为 20A、最高工作频率只有 3kHz。又如, 2CK72 是硅材料的开关二极管。

1.3.2 二极管的特性和主要参数

1. 伏安特性曲线

所谓二极管的伏安特性曲线, 就是指二极管两端所加电压与流过二极管的电流之间的关系曲线。图 1-11 所示为两种不同偏置下的二极管的伏安特性曲线测试电路, 测绘得到的硅和锗二极管的伏安特性曲线如图 1-12 所示。由伏安特性曲线可知, 二极管属于非线性器件。下面以图 1-12 中硅二极管 (AOB 曲线) 的正向特性和反向特性来分析曲线各部分的物理意义。

(1) 正向特性。

说明: 测试电路是直流, 实际应从交直流共存的工作环境考虑, 故在分析和特性曲线的标注上, 电压和电流均是小写字母加大写下标的形式。以后遇到相似问题时同理。

如图 1-12 所示, 正向特性可分为正向死区 (Oa 段), 正向非线性区 (aa' 段) 和正向线性区 ($a'A$ 段)。

正向死区: 当外加正向电压低于 U_{th} 时, 外电场不足以克服内电场对多数载流子扩散的阻力, PN 结仍处于截止状态, 正向电流 $i_F \approx 0$ 。 U_{th} 称为死区电压或阈值电压 (硅管: $U_{th}=0.5V$; 锗管: $U_{th}=0.1V$)。

正向非线性区: 外加正向电压高于死区电压后, 正向电流将随着正向电压的升高按指数规律同步增大。此区域相应的电压值: 硅管为 $0.5 \sim 0.6V$, 锗管为 $0.1 \sim 0.2V$ 。

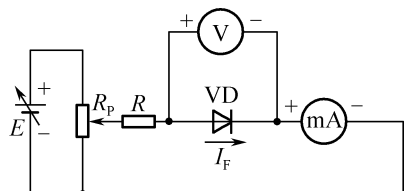
正向线性区: 正向电流与正向电压呈陡峭的线性关系, 由于此时二极管的正向电阻变得很小, 正向电压稍微升高就会导致 PN 结的正向电流急剧增大, 为防止 PN 结过流烧毁, 电



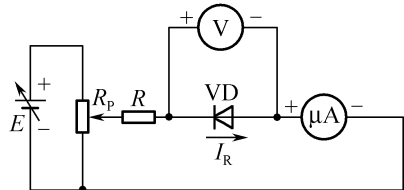
路必须有限流措施, 限制电流在 A 点数值以内。此区域相应的电压值: 硅管为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$, 锗管为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

(2) 反向特性。

当给二极管外加反向电压时, 电流和电压的关系称为二极管的反向特性, 测试电路如图 1-11 (b) 所示。反向特性分为反向截止区 (Ob 段) 和反向击穿区 (bB 段)。



(a) 测正向伏安特性



(b) 测反向伏安特性

图 1-11 两种不同偏置下的二极管的伏安特性曲线测试电路

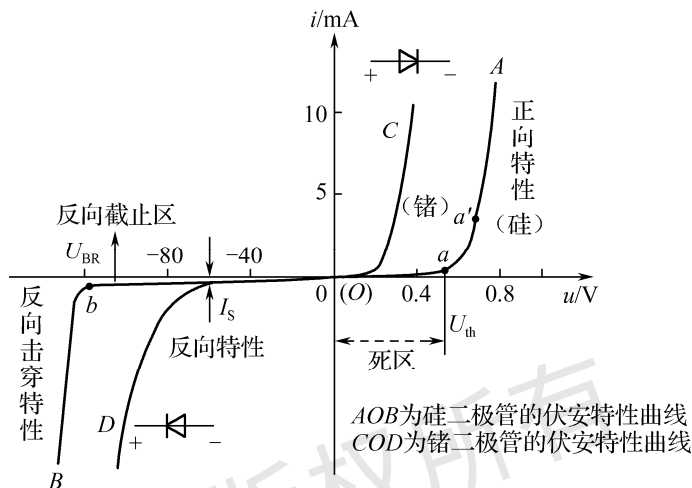


图 1-12 硅和锗二极管的伏安特性曲线

反向截止区: 当给二极管外加反向电压时, 反向电流很小 ($I_R \approx -I_S \approx 0$), 而且在相当宽 (Ob 段) 的反向电压范围内, 反向电流几乎不变。 I_S 称为二极管的反向饱和电流。工作于此区域的二极管呈现出很大的反向电阻, 在电路中相当于断开的开关。

反向击穿区: 当反向电压的值增大到 U_{BR} 时, 反向电压稍有升高, 反向电流就会急剧增大, 此现象称为反向击穿。我们把电击穿对应的阈值电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。各类二极管的反向击穿电压差异很大, 通常为几伏到几百伏。

反向击穿的类型有电击穿和热击穿。根据物理过程的不同, 电击穿又分为齐纳击穿和雪崩击穿。电击穿是可逆击穿, 当反向电压降低后, 管子仍可恢复正常。稳压二极管同时兼有两种电击穿类型, 它就是利用二极管的反向击穿特性来实现稳压的。但一般的二极管不允许工作在反向击穿区。

齐纳击穿指外电场增大到一定数值后, 可以把大量的价电子直接从共价键中拉出来, 形成大量的自由电子-空穴对而参与导电, 使反向电流急剧增大。

在雪崩击穿中, 自由电子-空穴对获得足够的动能后, 撞击其他原子, 产生更多的自由电子-空穴对, 撞出来的载流子再撞击其他原子, 如同高山雪崩一样, 导致反向电流急剧增大。一般整流二极管的电击穿类型多为雪崩击穿。

如果反向电流与反向电压的乘积超出了二极管的容许耗散功率, 就会引起热击穿, 此过程是不可逆的, 将导致二极管永久性损坏。

2. 二极管的温度特性

二极管对温度非常敏感。实验表明, 随着温度的升高, 二极管的正向压降会减小, 正向伏安特性左移, 即二极管的正向压降具有负的温度系数 (约为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$); 温度升高, 反向饱



和电流会增大,反向伏安特性下移。温度每升高 10°C ,反向饱和电流大约增大为原来的 2 倍。

3. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_{FM} 。

最大整流电流指二极管长时间工作时允许通过的最大正向电流的平均值。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。

最高反向工作电压指二极管长时间工作时能承受的最高反向工作电压。此值一般为反向击穿电压 U_{BR} 的 $1/2 \sim 2/3$ 。使用中,二极管两端的反向电压不得超过 U_{RM} ,否则可能会击穿二极管。

(3) 反向饱和电流 I_{S} 。

反向饱和电流指管子没有击穿时的反向电流值。 I_{S} 受温度的影响很大,在同等条件下,其值越小,说明二极管的单向导电性越好。

(4) 最高工作频率 (f_{max})。

最高工作频率指二极管长时间工作时允许的最高工作频率。当二极管的工作频率高于 f_{max} 时,二极管的单向导电性将受损。 f_{max} 主要取决于 PN 结电容的大小,结电容越小, f_{max} 的值越大。

(5) 二极管的直流电阻和交流电阻。

① 直流电阻 R_{D} (也称静态电阻)。

直流电阻 R_{D} 是指二极管两端的电压与流过二极管的电流之比,即

$$R_{\text{D}} = \frac{U_{\text{D}}}{I_{\text{D}}}$$

如图 1-13 (a) 所示,当二极管工作于 Q 点时, $U_{\text{DQ}}=0.7\text{V}$, $I_{\text{DQ}}=15\text{mA}$, 因此

$$R_{\text{D}} = \frac{U_{\text{D}}}{I_{\text{D}}} = \frac{0.7\text{V}}{15\text{mA}} \approx 47\Omega$$

必须指出的是,二极管的直流电阻随着二极管工作点的改变而改变。直流电阻的大小与 Q 点的斜率成反比,即 $R_{\text{D}} = \frac{1}{\tan \theta}$ 。在用万用表测量二极管的正向直流电阻时,由于不同挡位的内阻(挡位越大,对应的内阻值越大)不同,所以二极管工作的 Q 点的斜率也不同,所测出的正向直流电阻也不同。通常二极管的正向直流电阻在几欧到几千欧之间。在测量二极管的反向直流电阻时,由于斜率近乎为零,所以 R_{D} 很大,通常在几百千欧以上。

② 交流电阻 r_{d} (也称动态电阻)。

交流电阻 r_{d} 是指在 Q 点附近,二极管两端的电压的变化量与电流的变化量之比,即

$$r_{\text{d}} = \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{1}{\tan \theta'}$$

如图 1-13 (b) 所示,当二极管工作于 Q 点附近时, $\Delta u \approx 0.3\text{V}$, $\Delta i \approx 25\text{mA}$, 因此

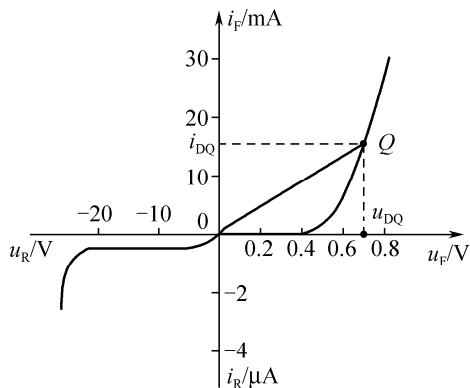
$$r_{\text{d}} = \frac{1}{\tan \theta'} = \frac{\Delta u}{\Delta i} \approx \frac{0.3\text{V}}{25\text{mA}} = 12\Omega$$

如果要求 Q 点的交流电阻,则可依据公式 $r_{\text{d}} \approx \frac{U_{\text{T}}}{I_{\text{DQ}}}$ 求取,其中 U_{T} 为 PN 结电压的数值。

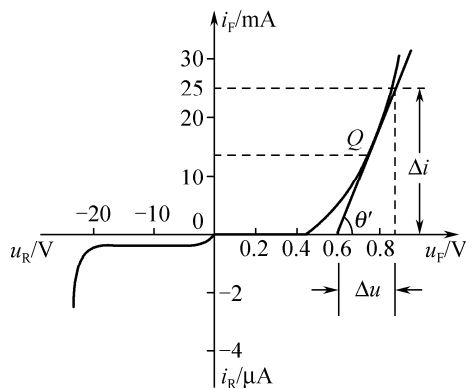
必须指出的是,二极管的交流电阻的大小与 Q 点的选择有关, I_{DQ} 越小,对应的斜率越



小, r_d 越大。通常二极管的正向交流电阻很小, 在几 Ω 到几十 Ω 之间; 反向交流电阻很大, 在几百 $k\Omega$ 以上。



(a) 二极管直流电阻的求法



(b) 二极管交流电阻的求法

图 1-13 图解二极管的直流电阻和交流电阻

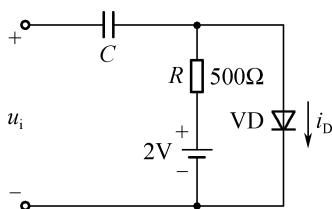


图 1-14 例 1 图

【例 1】 如图 1-14 所示, 二极管的导通电压 $U_D=0.7V$, 常温下 PN 结电压 $U_T \approx 26mV$, 电容 C 对交流信号可视为短路; 输入 u_i 为正弦波, 有效值为 $10mV$ 。试求二极管中的静态电流和交流 (动态) 电流的有效值分别为多少?

【解答】 流过二极管的静态电流 I_{DQ} 为

$$I_{DQ} = \frac{2V - U_D}{R} = \frac{2V - 0.7V}{500\Omega} = 2.6mA$$

其动态电阻 r_d 为

$$r_d \approx \frac{U_T}{I_{DQ}} \approx \frac{26mV}{2.6mA} = 10\Omega$$

故动态电流的有效值 I_d 为

$$I_d = \frac{U_i}{r_d} = \frac{10mV}{10\Omega} = 1mA$$

1.3.3 二极管应用电路

利用二极管的单向导电性, 在模拟电路中, 可以对交流信号进行整流、限幅和钳位; 在数字电路中, 可以对脉冲信号进行波形整形或波形变换。本节对二极管的限幅和钳位应用电路进行介绍, 整流应用电路将在第 7 章中介绍。

关于理想二极管的说明: 理想二极管的正向电阻为零, 正向压降为零, 相当于闭合的开关; 反向电阻为无穷大, 反向电流为零, 相当于断开的开关。理想二极管实际上并不存在, 仅是为分析计算方便, 对二极管进行理想化处理后的电路模型而已。如果没有特殊说明, 书中提到的二极管均要考虑二极管的正向压降和反向电流等因素。

1. 二极管限幅电路

限幅电路的功能是将输入波形中不需要的部分削掉, 因此也称削波电路。通常利用二极管和三极管的非线性构成二极管限幅电路与三极管限幅电路。根据二极管与负载的连接关系,



二极管限幅电路可分为串联限幅电路和并联限幅电路；根据限幅的方向，可分为上限幅电路、下限幅电路和双向限幅电路。二极管限幅电路的5种基本类型的组成结构如图1-15所示。具体说明如下。

在图1-15(a)中，二极管与负载并联且输出信号正半周被限幅，属并联上限幅电路。

在图1-15(b)中，二极管与负载并联且输出信号负半周被限幅，属并联下限幅电路。

在图1-15(c)中，二极管与负载串联且输出信号正半周被限幅，属串联上限幅电路。

在图1-15(d)中，二极管与负载串联且输出信号负半周被限幅，属串联下限幅电路。

在图1-15(e)中，两个二极管与负载反向并联，因此输出信号的正、负半周均被限幅，属双向限幅电路。

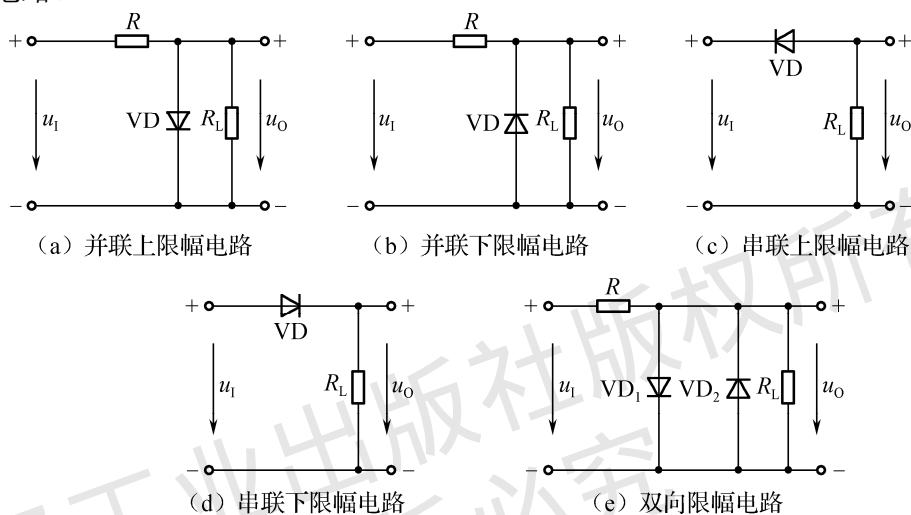


图1-15 二极管限幅电路的5种基本类型的组成结构

【例2】 由理想二极管构成的限幅电路和输入信号波形分别如图1-16(a)、(b)所示，分析限幅电路的类型，并根据输入信号波形画出输出信号波形。

【解析】 由于理想二极管（正向压降为零，反向电流为零）与负载串联，在输入信号的正半周，二极管截止，所以该电路是限幅电平为零的串联上限幅电路。 R 为泄放电阻，为电路中可能接入的电容提供放电回路。

【解答】 串联限幅电路是利用二极管截止起限幅作用的。在输入信号正半周， $u_i > 0 \rightarrow \text{VD}$ 截止 $\rightarrow u_o = 0$ ；在输入信号负半周， $u_i \leq 0 \rightarrow \text{VD}$ 导通 $\rightarrow u_o = u_i$ 。画出的输出信号波形如图1-16(c)所示。

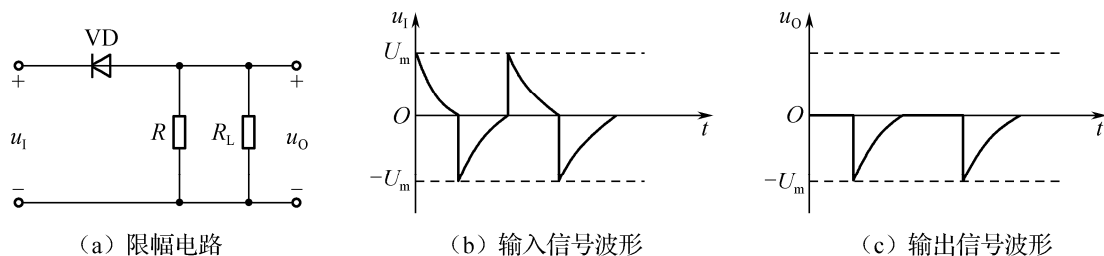


图1-16 例2图

【例3】 由理想二极管构成的限幅电路如图1-17(a)所示，已知 $E=5\text{V}$ ， $u_i = 10\sin\omega t$ (V)。试分析该限幅电路的类型，画出 u_o 的波形并标出幅值。

【解答】 根据组成结构可知，该电路是限幅电平为5V的串联下限幅电路。

输出与输入的关系分析：当 $u_i > 5\text{V}$ 时，二极管导通，此时 $u_o = u_i$ ；当 $u_i \leq 5\text{V}$ 时，二极管



截止, 此时回路无电流, $u_O=5\text{V}$ 。定性画出的 u_O 的波形如图 1-17 (b) 所示。

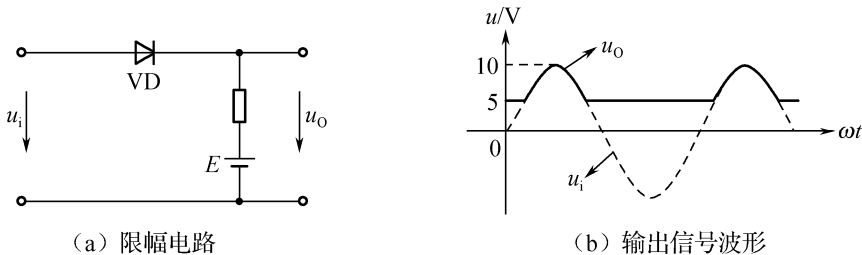


图 1-17 例 3 图

【例 4】 由理想二极管构成的限幅电路和输入信号波形分别如图 1-18 (a)、(b) 所示, 分析该限幅电路的类型, 并根据输入信号波形画出输出信号波形。

【解析】 由于理想二极管与负载 (未画出) 并联, 且当 $u_i \leq E$ 时二极管导通, 实现输出限幅, 所以该电路是限幅电平为 E 的并联下限幅电路。

【解答】 并联限幅电路是利用二极管导通起限幅作用的: 输入信号 $u_i > E \rightarrow \text{VD}$ 截止 $\rightarrow u_O = u_i$; 输入信号 $u_i \leq E \rightarrow \text{VD}$ 导通 $\rightarrow u_O = E$ 。画出的输出信号波形如图 1-18 (c) 所示。

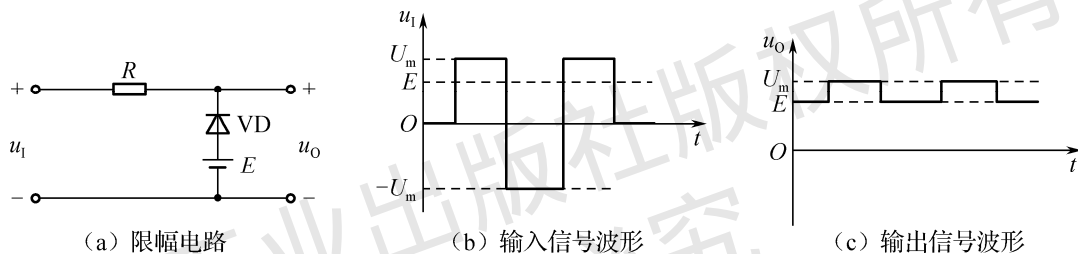


图 1-18 例 4 图

【例 5】 由硅管构成的限幅电路如图 1-19 (a) 所示。已知 $u_i = 5\sin\omega t$ (V), 二极管导通电压 $U_D = 0.7\text{V}$ 。试分析该限幅电路的类型, 画出 u_i 与 u_O 的波形, 并标出幅值。

【解答】 电路类型是限幅电平为 $\pm 3.7\text{V}$ 的双向限幅电路。当输入信号 $u_i \geq 3.7\text{V}$ 时, VD_1 导通 $\rightarrow u_O = 3.7\text{V}$; 当输入信号 $u_i \leq -3.7\text{V}$ 时, VD_2 导通 $\rightarrow u_O = -3.7\text{V}$; 当输入信号为 $-3.7\text{V} \leq u_i \leq 3.7\text{V}$ 时, $u_O = u_i$ 。画出的输出信号波形如图 1-19 (b) 所示。

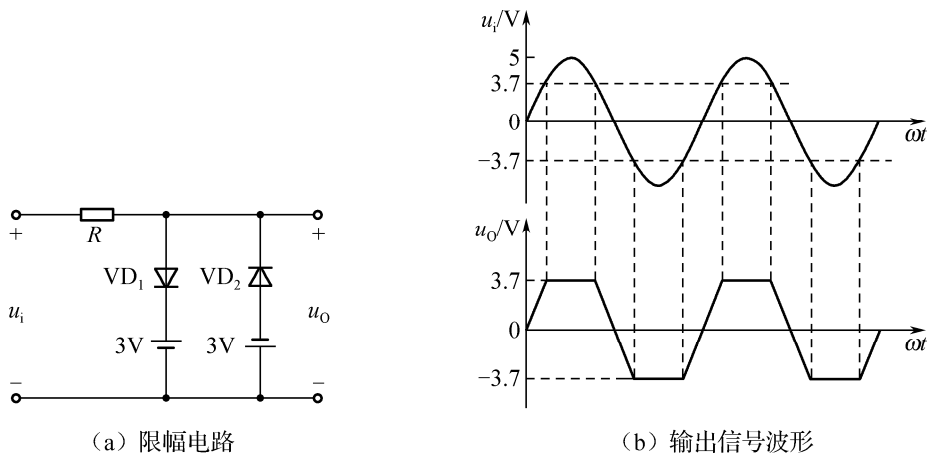


图 1-19 例 5 图

【例 6】 由理想二极管构成的电路和输入信号波形分别如图 1-20 (a)、(b) 所示。在 $0\text{ms} < t < 5\text{ms}$ 的时间间隔内, 试绘出 u_O 的波形。



【解答】当 $u_i < 6\text{V}$ 时, VD 截止, $u_o = 6\text{V}$; 当 $u_i \geq 6\text{V}$ 时, VD 导通, 输出电压 u_o 取决于 u_i , 以及 R_1 和 R_2 的分压, 即

$$u_o = \frac{u_i - 6\text{V}}{R_1 + R_2} R_2 + 6\text{V} = \left(\frac{u_i - 6}{200 + 200} \times 200 + 6 \right) \text{V} = \left(\frac{1}{2} u_i + 3 \right) \text{V}$$

画出的输出信号波形如图 1-20 (c) 所示。

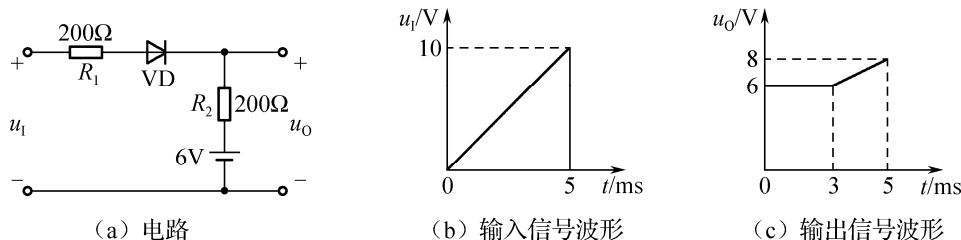


图 1-20 例 6 图

2. 二极管钳位电路

将电路中某点的电位钳制在固定的数值上, 或者把输入信号的底部或顶部钳制在规定电平上的电路称为钳位电路。下面通过具体电路对二极管的钳位原理予以说明。

【例 7】由理想二极管构成的电路如图 1-21 所示, 试判断各分图中的二极管是导通状态还是截止状态, 并求出 AB 两端的电压 U_{AB} 。

【解析】可运用戴维南定理的思路来判断各二极管是导通状态还是截止状态。先假定二极管内部的 PN 结开路, 再分别计算二极管阳极和阴极的开路电位差 U_{AK} 。若 U_{AK} 满足导通条件, 则说明二极管是导通状态, 其管压降为零 (理想二极管) 或 U_D (实际二极管); 若 U_{AK} 不满足导通条件, 则说明二极管是截止状态, 二极管两端的电压可依据基尔霍夫定律通过外围电路求得。

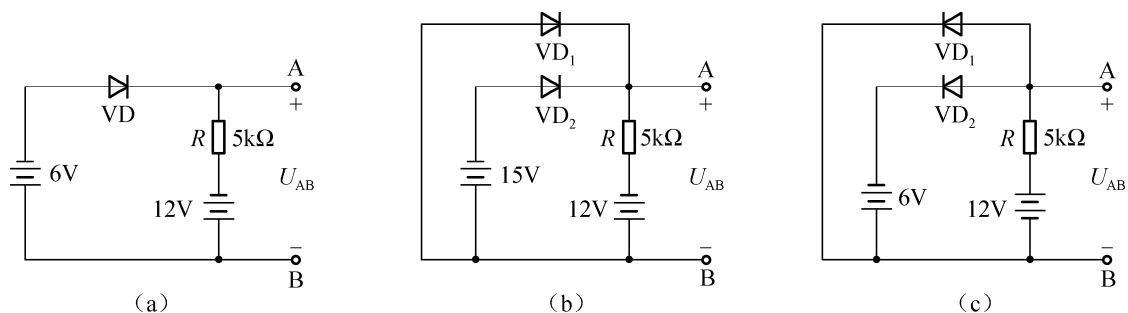


图 1-21 例 7 图

【解答】在图 1-21 (a) 中: 将 VD 的 PN 结开路, 以 B 端为电位参考点, 则 VD 的阳极电位为 -6V , 阴极电位为 -12V , $U_{AK} = 6\text{V}$, 因高于死区电压, 所以判定 VD 正向导通, 对导通后的 VD 做短路线处理, 故 $U_{AB} = -6\text{V}$ (U_{AB} 被钳位在 -6V 上)。

在图 1-21 (b) 中: 用相同的方法处理后, VD_1 的阳极电位为 0 , 阴极电位为 -12V , $U_{AK1} = 12\text{V}$, 故 VD_1 导通; VD_2 的阴极电位为 -12V , 而其阳极电位为 -15V , $U_{AK2} = -3\text{V}$, 故 VD_2 反向截止。将 VD_1 、 VD_2 分别做短路线和开路线处理后可得 $U_{AB} = 0$ (U_{AB} 被钳位在 0 上)。

在图 1-21 (c) 中: 用相同的方法处理后, VD_1 的阳极电位为 12V , 阴极电位为 0 , $U_{AK1} = 12\text{V}$; VD_2 的阳极电位为 12V , 阴极电位为 -6V , $U_{AK2} = 18\text{V}$ 。两管单独作用时都具备导通条件, 但



共同作用时属于并联关系,这必然涉及优先导通与钳位的问题。因为 $U_{AK2} > U_{AK1}$, 所以 VD_2 优先导通, VD_2 导通后, A 端电位被钳位在 $V_A = -6V$ 上, 使 VD_1 反偏而截止。将 VD_1 、 VD_2 分别做开路线和短路线处理后可得 $U_{AB} = -6V$ (U_{AB} 被钳位在 $-6V$ 上)。

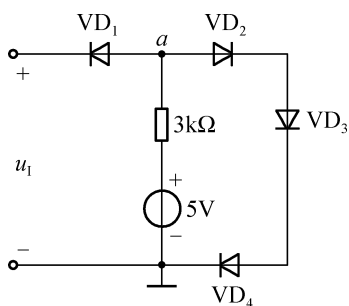


图 1-22 例 8 图

【例 8】 如图 1-22 所示, 试分析当 $u_1 = 3V$ 时, 哪些二极管导通? 当 $u_1 = 0$ 时, 哪些二极管导通? (设二极管的正向压降为 $0.7V$)。

【解析】 本题考察的是二极管的优先导通与钳位。

【解答】 当 $u_1 = 3V$ 时, 二极管 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 外加正向电压而导通, a 点电位被二极管 VD_2 、 VD_3 、 VD_4 优先导通而钳位 (限幅) 在 $2.1V$ 上; 二极管 VD_1 因承受反向电压而截止。

当 $u_1 = 0$ 时, 二极管 VD_1 导通, a 点电位被二极管 VD_1 优先导通而钳位在 $0.7V$ 上; 不足以使二极管 VD_2 、 VD_3 和 VD_4 导通, 故二极管 VD_2 、 VD_3 和 VD_4 截止。

【例 9】 如图 1-23 (a) 所示, 其输入电压 u_{11} 和 u_{12} 的波形如图 1-23 (b) 所示, 二极管的导通电压 $U_D = 0.7V$ 。试画出输出电压 u_O 的波形, 并标出幅值。

【解答】 u_{11} 和 u_{12} 只要有一个为 $0.3V$, 因优先导通与钳位作用, u_O 就都为 $1V$; 只有在 u_{11} 和 u_{12} 都为 $3V$ 时, u_O 才为 $3.7V$ 。画出的输出电压 u_O 的波形如图 1-23 (c) 所示。

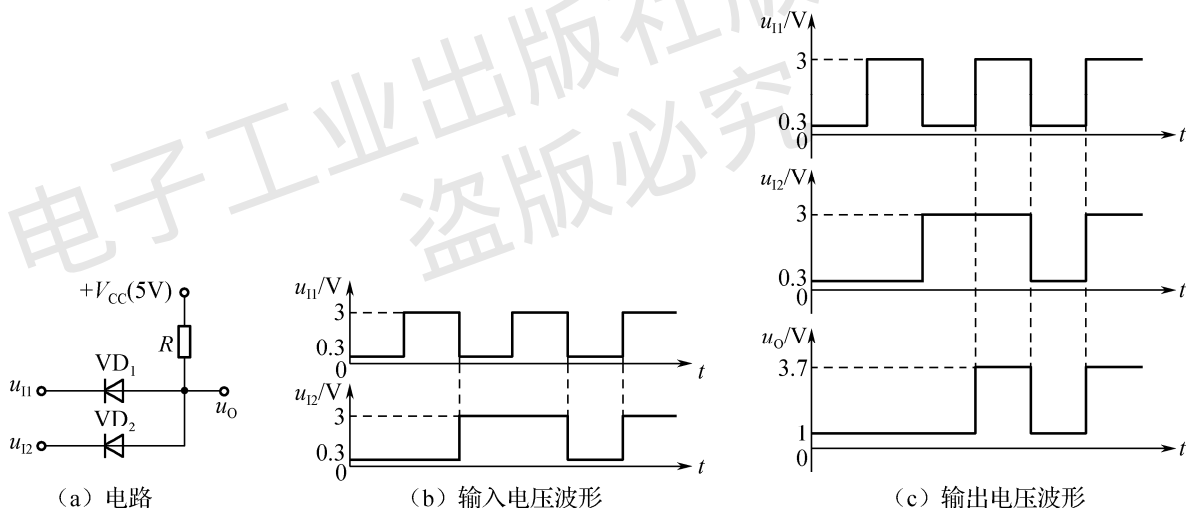


图 1-23 例 9 图

【例 10】 如图 1-24 所示, 已知各二极管的导通电压均为 $0.7V$, 分别求: ①当 $U_A = U_B = 0$ 时的 U_O 、 I_D ; ②当 $U_A = U_B = 3V$ 时的 U_O 、 I_D 。

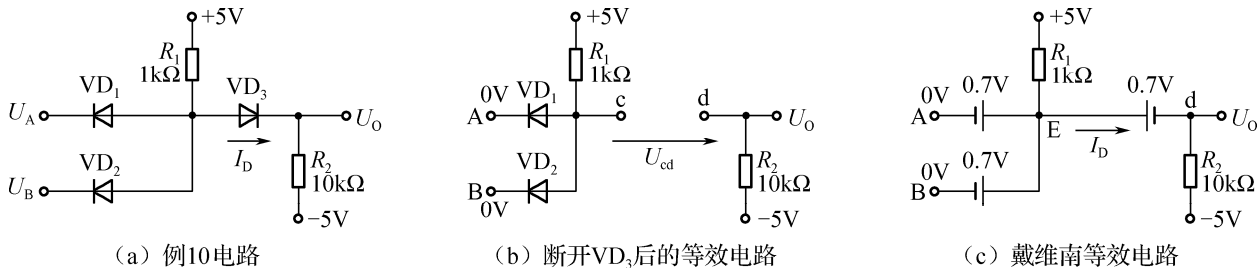


图 1-24 例 10 图

【解析】 此类型题通常运用戴维南定理的方法来求解, 即先断开待求支路 (VD_3), 判断



二极管 VD_3 可能的导通情况, 只有这样才能进行下一步的分析和计算。

【解答】 ① 当 $U_A=U_B=0$ 时, 如图 1-24 (b) 所示, 断开二极管 VD_3 , 求二极管断开点之间的电压 U_{cd} 。

显然, 二极管 VD_1 、 VD_2 均导通, c 端电位被 VD_1 、 VD_2 钳位在 $0.7V$ 上, 又因为 R_2 上无电流路径, 所以 d 端电位为 $-5V$ 。由此得开路电压 $U_{cd}=5.7V$, 因为高于导通电压 $0.7V$, 所以 VD_3 导通。接入 VD_3 , 画出相应的戴维南等效电路, 如图 1-24 (c) 所示。根据等效电路得

$$U_O = V_E - U_{D3} = 0.7V - 0.7V = 0, \quad I_D = I_{R2} = \frac{V_d - (-5V)}{R_2} = \frac{5V}{10k\Omega} = 0.5mA$$

② 同上, 当 $U_A=U_B=3V$ 时, 二极管 VD_1 、 VD_2 仍导通, c 端电位被 VD_1 、 VD_2 钳位在 $3.7V$ 上, 因为 R_2 上无电流路径, 故 d 端电位为 $-5V$, 则开路电压 $U_{cd}=8.7V$, 因为高于导通电压 $0.7V$, 所以 VD_3 导通。故有

$$U_O = V_E - U_{D3} = 3.7V - 0.7V = 3V, \quad I_D = I_{R2} = \frac{V_d - (-5V)}{R_2} = \frac{8V}{10k\Omega} = 0.8mA$$

【例 11】 如图 1-25 (a) 所示, 其输入方波如图 1-25 (b) 所示, 设二极管的正向电阻为 r_D 、反向电阻为 R_D , 且电路满足 $R_D \gg R \gg r_D$, 充电时间常数 $\tau_{充} = r_D C \leq t_p$, 放电时间常数 $\tau_{放} = R_D C \gg t_p$ 。试定性画出输出信号 u_O 的波形, 并分析电路的功能。

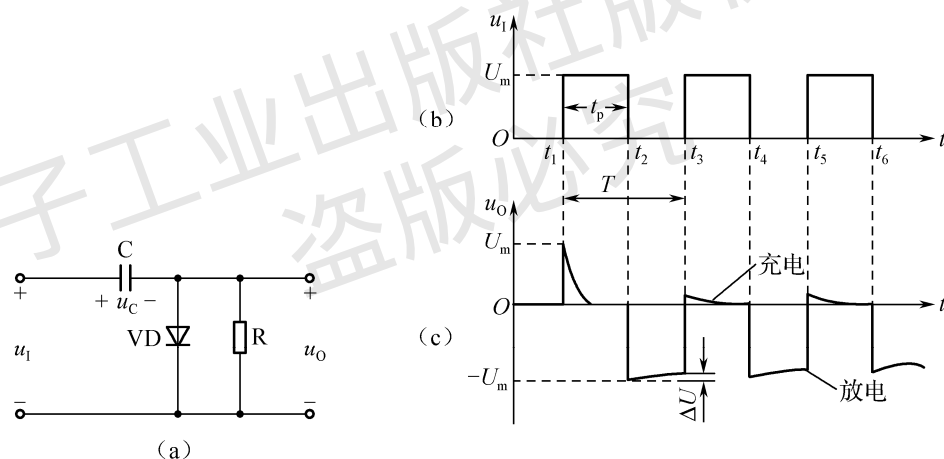


图 1-25 例 11 图

【解答】 电容 C 与二极管 VD 和电阻 R 组成的并联电路相串联, 在输入脉冲信号的作用下, 形成对电容 C 的充放电过程。通过给定条件可知充电时间常数很小, 即充电极快; 放电时间常数很大, 即放电极慢; 且任何时刻均满足 $u_1 = u_C + u_O$ 。定性画出的输出信号 u_O 的波形如图 1-25 (c) 所示。

观察输出信号 u_O 的波形, 输出信号与输入信号的波形几乎一致, 但波形的顶部都被固定在零电平附近了。因此, 这是一个顶部钳位电路, 其功能就是将输入信号的顶部对齐。如果将二极管接反, 那么功能就变成了将输入信号的底部对齐, 即底部钳位电路。

1.3.4 二极管的简易检测方法

在使用二极管时, 除了注意它的极性不能接错, 还得确保管子型号和质量没有问题。二极管最基本的特性是单向导电性。在实际应用中, 通常利用万用表来测定二极管的极性, 并



根据正/反向电阻的测量数值来判定其性能的好坏。图 1-26 (a) 所示为指针式万用表欧姆挡等效电路。由图 1-26 (a) 可知, 黑表笔与欧姆挡内置电池的正极相连, 是高电位端; 红表笔与欧姆挡内置电池的负极相连, 是低电位端。

检测内容和方法如下。

步骤 1: 二极管极性的判定。

万用表测试条件: 挡位选择 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡, 表笔插接无误, 并进行电气调零。

如图 1-26 (b)、(c) 所示, 将红、黑表笔分别接二极管的两个电极, 若测得的阻值很小 (几千欧以下), 则黑表笔所接电极为二极管的正极、红表笔所接电极为二极管的负极; 若测得的阻值很大 (几百千欧以上), 则黑表笔所接电极为二极管的负极、红表笔所接电极为二极管的正极。

步骤 2: 二极管性能好坏的判定。

万用表测试条件: 挡位选择 $R \times 1k\Omega$ 挡, 表笔插接无误, 并进行电气调零。

(1) 若测得的反向电阻很大 (几百千欧以上)、正向电阻很小 (几千欧以下, 且挡位越大, 阻值越小), 则表明二极管性能良好。

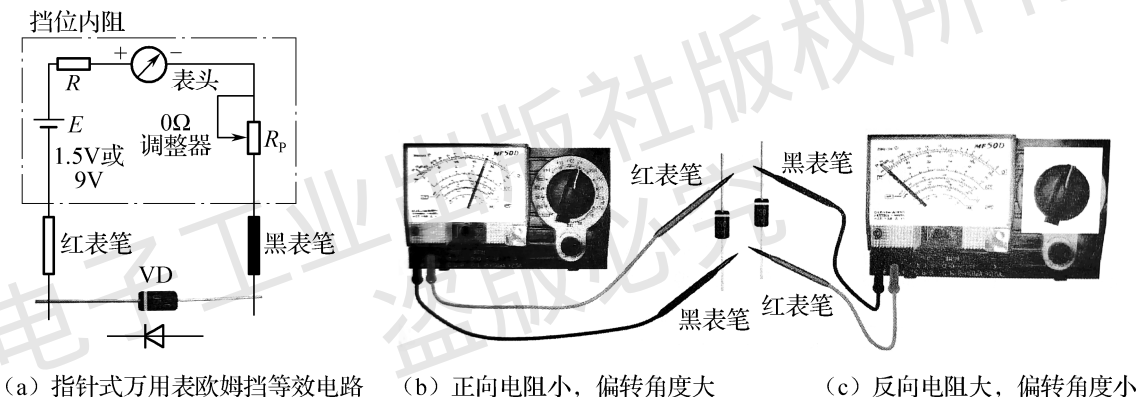


图 1-26 指针式万用表欧姆挡等效电路和用万用表检测二极管的原理

(2) 若测得的反向电阻和正向电阻都很小, 则表明二极管短路, 已损坏。

(3) 若测得的反向电阻和正向电阻都很大, 则表明二极管断路, 已损坏。

(4) 若正向电阻为几千欧至几十千欧、反向电阻为几百千欧, 即正、反向电阻差异不大, 单向导电性能差, 则说明二极管质量不佳。

知识拓展

用数字式万用表检测二极管

数字式万用表的红表笔接触内部电池的正极、黑表笔接触内部电池的负极, 这与指针式万用表欧姆挡内部电池的接法正好相反。

(1) 极性与质量的判别。

将数字式万用表的红表笔插入 $V\Omega$ 孔、黑表笔插入 COM 孔并置于二极管测量挡($\rightarrow$), 两表笔分别接二极管的两个电极, 若显示“1”以下的数字, 则说明二极管正向导通, 红表笔接的是正极、黑表笔接的是负极。此时显示的数字为二极管的正向压降, 单位为 V。若显示的数字为“1”, 则说明二极管处于反向截止状态, 红表笔接的是负极、黑表笔接的是正极。如果两次测量都显示“001”或“000”并且蜂鸣器响, 则说明二极管已经击穿; 如果两次测



量的正、反向电阻值均为“1”，则说明二极管开路；如果两次测量的数值相近，则说明管子质量很差。

(2) 硅管与锗管的判别。

将万用表置于二极管测量挡($\nabla \rightarrow$), 红表笔接二极管的正极、黑表笔接二极管的负极, 若显示电压为 0.5~0.7V, 则说明被测管是硅管; 若显示电压为 0.1~0.3V, 则说明被测管是锗管。

知识小结

(1) 二极管内有一个 PN 结, 因此它具有单向导电性。

(2) 二极管按制造材料分为硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管等; 按用途分为整流二极管、稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等; 按管芯结构分为点接触型二极管、面接触型二极管、平面型二极管。

(3) 二极管因伏安特性是非线性的, 所以是非线性器件。二极管的阈值电压: 硅管约为 0.5V, 锗管约为 0.2V; 导通时的正向压降: 硅管约为 0.7V, 锗管约为 0.3V。

(4) 二极管的反向击穿有电击穿和热击穿两种。

(5) 二极管的主要参数有最大整流电流 I_F 、最高反向工作电压 U_{RM} 、反向饱和电流 I_S 、最高工作频率 f_{max} 、直流电阻和交流电阻。

(6) 二极管限幅电路的功能是将输入波形中不需要的部分削掉, 因此也称削波电路。

1.4 特种二极管及其应用

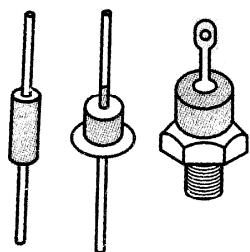
二极管的类型很多, 除前面讨论的普通二极管外, 还有多种具备各种用途的二极管, 如稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等。

1.4.1 稳压二极管

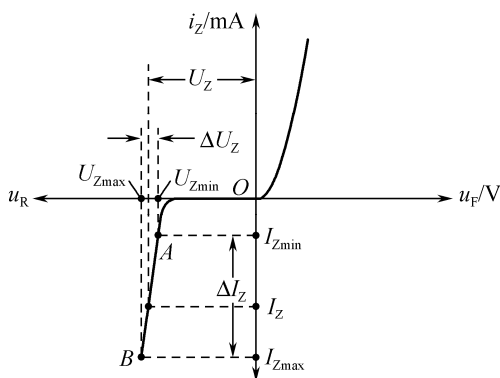
稳压二极管均为硅管, 是一种能长期工作在反向击穿状态下, 具有很陡峭的反向击穿特性, 能稳定两端电压的二极管。

1. 稳压二极管的符号和伏安特性

稳压二极管主要有 2CW、2DW 系列。它的文字符号为 VZ, 其外形和电路符号如图 1-27 (a) 所示。图 1-27 (b) 所示为稳压二极管的伏安特性曲线。它的正向特性曲线与普通二极管相似, 反向击穿特性曲线却要比普通二极管更为陡峭。稳压二极管微小的 ΔU_Z 变化, 就能引起很大的 ΔI_Z 变化, 我们正是利用其反向电流在很大范围内变化时两端电压基本不变的原理来实现稳压的。通过限流电阻的限流, 使其功率消耗不超过额定值, 稳压二极管就能长期安全地工作。必须说明的是, 普通二极管的正向线性区和反向击穿区也具有稳压特性, 只是反向击穿特性曲线的陡峭程度远不及通过特殊工艺处理后的稳压二极管。



(a) 外形和电路符号



(b) 伏安特性曲线

图 1-27 稳压二极管

2. 稳压二极管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z 。

稳定电压 U_Z 也叫击穿电压, 是稳压二极管正常工作状态下管子两端的电压值。不同型号的稳压二极管, 该值一般不同, 即便是同一型号的稳压二极管, 稳定电压值也有微小偏差。稳定电压的值为 $3\sim 300\text{V}$ 。

(2) 稳定电流 I_Z 。

稳定电流有最大稳定电流 $I_{Z\max}$ 、最小稳定电流 $I_{Z\min}$ 和稳定电流 I_Z 。

最大稳定电流 $I_{Z\max}$: 稳压二极管正常工作时允许通过的最大电流。工作中, 实际的稳定电流不得超过此值, 否则会损坏稳压二极管。

最小稳定电流 $I_{Z\min}$: 稳压二极管正常工作时必须达到的最小电流。工作中, 实际的稳定电流不得小于此值, 否则稳压二极管进入不了反向击穿状态。

稳定电流 I_Z : 稳压二极管正常工作时稳定电流的参考值, 要求 $I_{Z\min} < I_Z < I_{Z\max}$ 。

(3) 最大耗散功率 $P_{Z\max}$ 。

最大耗散功率 $P_{Z\max}$ 指稳压二极管正常工作时所能承受的最大耗散功率。稳压二极管工作时的耗散功率 P_Z 等于稳定电压 U_Z 与稳定电流 I_Z 的乘积, 即 $P_Z = U_Z I_Z$ 。使用中, 要求 P_Z 必须小于 $P_{Z\max}$, 若超过这个数值, 则稳压二极管将被烧毁。常见的稳压二极管的最大耗散功率 $P_{Z\max}$ 多为 0.5W 或 1W 。

(4) 动态电阻 r_z 。

动态电阻 r_z 指稳压二极管击穿后, 其两端电压变化量与电流变化量的比值, 即

$$r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

r_z 的大小表征了反向击穿特性曲线的陡峭程度, 其值越小, 反向击穿特性曲线越陡峭, 稳压二极管的稳压性能越好。

(5) 温度系数 K 。

温度系数 K 指温度变化 1°C 所引起的稳定电压的相对变化量, 即

$$K = \frac{\Delta U_Z}{U_Z} / \Delta T (\% / ^\circ\text{C})$$

温度对稳压二极管的特性有影响。 U_Z 小于 5V 的稳压二极管是齐纳击穿, U_Z 为负温度系数; U_Z 大于 8V 的稳压二极管是雪崩击穿, U_Z 为正温度系数; U_Z 在 6V 左右的稳压二极管,



两种击穿兼而有之，其温度系数最小，因此受温度的影响最小。在实际应用中，要对稳压二极管进行温度补偿，常将正温度系数和负温度系数的两种稳压二极管串联使用。

3. 稳压二极管的检测

稳压二极管的检测与普通二极管相同，只是其正向电阻比普通二极管大，可通过检测单向导电性判断其好坏。用万用表直接测稳压二极管的稳定电压值很困难，误差也大，通常先模拟稳压二极管的在路正常工作状态，然后测其端电压，从而得到其稳定电压值。

稳压二极管的应用将在第7章中介绍。

1.4.2 发光二极管

1. 发光二极管(LED)的结构、符号和外形

LED是一种能将电能转化成光能的半导体器件。LED通常用砷化镓、磷化镓等材料制成。当LED中采用特殊工艺的PN结通入正向电流时，在自由电子与空穴直接复合的过程中，过剩的能量以一定波长的光释放出来。发光颜色由半导体的材料决定，常见的有红光、绿光、黄光（红光与绿光混色后呈现出的光色）、蓝光、白光及人眼看不见的红外光。LED的文字符号为VL，其电路符号和外形如图1-28(a)所示。其中，BS205是双色LED，1、3之间通入正向电流时发红光，2、3之间通入正向电流时发绿光，1、3和2、3之间均通入正向电流时发混色光即黄光。LED常用于直观显示电路的通、断及工作状态，也可以用于照明和进行信息变换。

2. LED的伏安特性曲线

LED的正向特性与普通二极管相似，但正向管压降比普通二极管高，为1.6~3V，正向电流在几mA至几十mA之间；反向击穿特性曲线比普通二极管更为陡峭，反向击穿电压一般也比普通二极管低，约5V。使用LED时必须注意的是，管压降不同的LED不允许并联，否则将导致管压降高的LED不能正常发光。LED的伏安特性曲线如图1-28(b)所示。

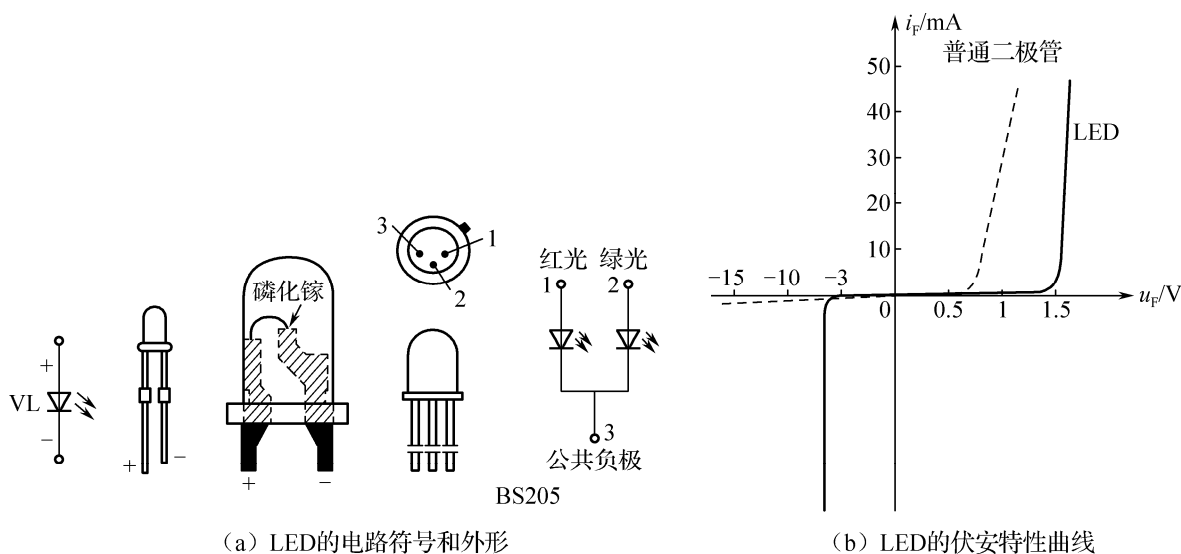


图 1-28 LED



3. LED 的特性参数

LED 的特性参数主要包括电性能参数和光性能参数，请参阅有关的半导体手册。

4. LED 应用电路

(1) LED 驱动电路。

为 LED 正常发光提供偏置的电路称为 LED 驱动电路。图 1-29 所示为 LED 驱动电路的几种类型。可见，LED 的数目可以是一个或多个，联结方式也可以多种多样。LED 驱动电路中各器件的参数应根据具体情况灵活调整。例如，设图 1-29 (c) 中的 LED 为同一型号，正常发光时的管压降为 U_F ，电流为 I ，则限流电阻为

$$R = \frac{V_{CC} - 3U_F}{I}$$

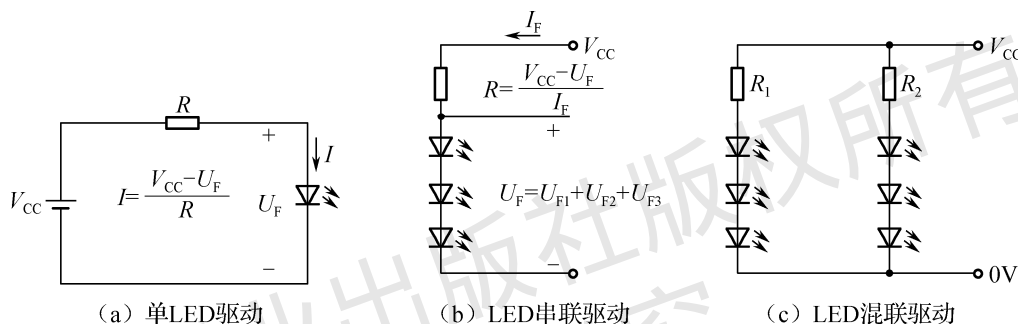


图 1-29 LED 驱动电路的几种类型

(2) LED 的光电耦合应用。

LED 的重要用途之一是光电耦合。光电耦合是以光作为媒介来实施信号的传输的（也称耦合）。在以光缆为信号传输媒介的系统中，可利用 LED 将电信号转变为光信号，通过光缆传输至接收端，接收端的光电二极管将光信号恢复为电信号。如图 1-30 所示，发送端的一个 $0 \sim 5V$ 的脉冲信号通过 500Ω 的电阻作用于 LED，这个驱动电路可使 LED 产生一串光信号（LED 的亮与灭），并作用于光缆；在接收端，光缆中的光照射在光电二极管上，可以在接收电路的输出端恢复出原 $0 \sim 5V$ 的脉冲信号。

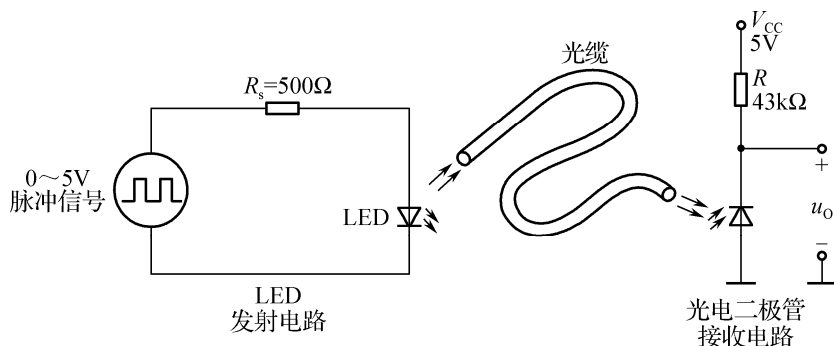


图 1-30 光电耦合系统中的 LED

由于发送端与接收端只有光的联系，没有电的联系，所以光电耦合方式可以解决两电路间的电气隔离问题。



5. LED 的检测

LED 的检测与普通二极管相似, 只需检测单向导电性便可判断其好坏。但 LED 的正向管压降为 $1.6\sim 3\text{V}$, 因此挡位选择通常为 $R\times 1\Omega$ 挡 (适用于低管压降 LED, 能提供较大的驱动电流) 或 $R\times 10\text{k}\Omega$ 挡 (适用于高管压降 LED, 能提供较高的偏置电压)。性能正常的 LED 在被检测时会发出弱光, 肉眼即可观察到。

1.4.3 光电二极管

1. 光电二极管的外形、符号及工作原理

光电二极管也称光敏二极管, 是一种利用光电效应将光信号转换成电信号的半导体器件。光电二极管也具有和普通二极管一样的单向导电性, 但它的 PN 结比较特殊, 其 P 区要比 N 区薄得多。为了获取光线, 在它的管壳上设有光线射入的玻璃窗口, 也有的干脆将管壳采用透明材料封装, 这样, 光线可直接照射管芯。

光电二极管主要有 2AU、2CU、2DU 系列。它的文字符号为 VL, 其外形和电路符号如图 1-31 (a) 所示。

光电二极管工作在反向偏置状态下。在反向偏置状态下, 当无光照射时, 它呈现出很大的反向电阻, 因而反向电流极小 ($\leq 0.1\mu\text{A}$); 当管芯受到光照时, 光能被 PN 结吸收, 能激发出大量的自由电子-空穴对, 这些载流子参与导电的结果是反向电流激增。这种因光照而形成的电流称为光电流, 它的大小与光照的强度和光的波长有关。光电二极管典型应用电路如图 1-31 (b) 所示, u_o 正比于流过光电二极管的电流。可见, 光电二极管能将光的变化转换为电的变化, 实现光电信号的转换。

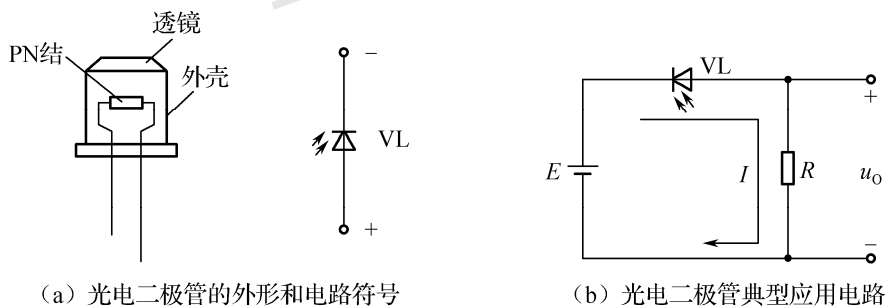


图 1-31 光电二极管

2. 光电二极管的主要参数

(1) 最高工作电压 U_{RM} 。

最高工作电压指光电二极管在无光照条件下, 反向电流不超过 $0.1\mu\text{A}$ 时所能承受的最高反向电压。 U_{RM} 的值越大, 说明管子的性能越好。

(2) 暗电流 I_D 。

暗电流指光电二极管在无光照时, 在最高反向工作电压作用下所测得的反向电流。 I_D 越小, 说明管子对光的敏感度越高, 管子性能就越好。

(3) 光电流 I_L 。

光电流指光电二极管在光照时产生的光电流。在同等光照条件下, I_L 越大, 说明管子



的性能越好。

3. 光电二极管的应用

光电二极管广泛用于制造光电传感器、光电耦合器和光电控制器等。在如图 1-31 (b) 所示的电路中, 光的变化引起光电二极管电流的变化, 该电流流经取样电阻 R 后产生正比于光照的输出电压 u_O 。

4. 光电二极管的使用与检测

在使用光电二极管时, 尽量选用暗电流小、光电流大的产品, 安装时注意极性不能接反。可采用对比法进行光电二极管的质量检测, 只需检测单向导电性便可判断其正、负极。

光电二极管正、负极的检测与普通二极管相似, 挡位选择 $R \times 1k\Omega$ 挡。性能好坏的检测可采用对比法, 即在有光照和无光照 (遮光处理) 两种情况下检测光电二极管的反向电阻的阻值差异, 阻值差异越大, 说明管子的性能越好。

1.4.4 变容二极管

PN 结结电容的大小除了与制造工艺和本身的结构尺寸有关, 还与外加电压的高低有关。随着反向电压的升高, 普通二极管的结电容变化不大, 但经特殊工艺制造的变容二极管的结电容会显著减小, 利用该特性工作的变容二极管本质上是一个受反向电压控制的可变电容器。

变容二极管主要有 2AC、2CC、2EU 系列。它的文字符号为 VD, 其电路符号、外形, 以及结电容与反向电压的关系如图 1-32 所示。

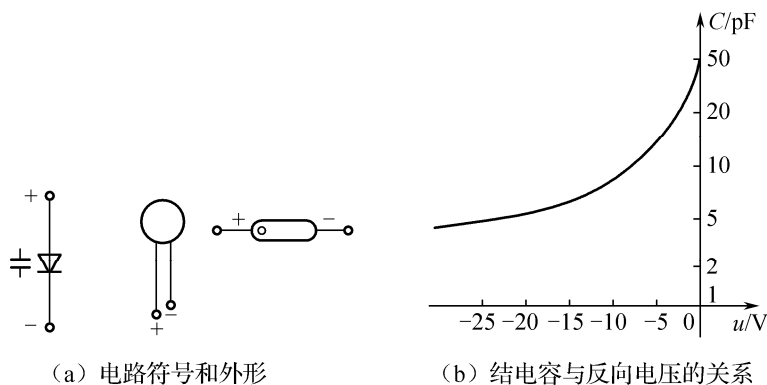


图 1-32 变容二极管

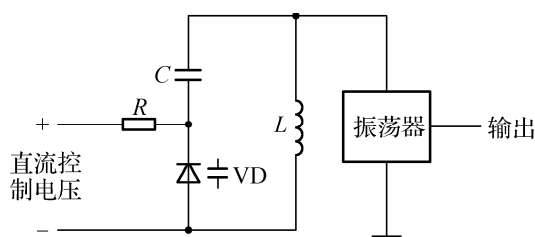


图 1-33 变容二极管在调谐中的应用

变容二极管广泛应用于电子调谐、直接调频、自动频率控制、调相和倍频等高频电子电路中。在图 1-33 中, 振荡器的选频电路由电感、电容和变容二极管共同构成, 改变直流控制电压, 就改变了变容二极管的反向电压与结电容, 从而改变振荡器的振荡频率。



知识小结

- (1) 稳压二极管、光电二极管、变容二极管工作在反向偏置状态, 发光二极管(LED)工作在正向偏置状态。
- (2) 稳压二极管均为硅管, 是具有很陡峭的反向击穿特性曲线, 能稳定两端电压的二极管。
- (3) 发光二极管是一种能将电能转化成光能的半导体器件, 通常用砷化镓、磷化镓等材料制成。
- (4) 光电二极管是一种将光信号转变成电信号的半导体器件, 广泛用于制造光电传感器、光电耦合器和光电控制器等。
- (5) 变容二极管的结电容会随反向电压的升高而显著减小, 本质上是一个受反向电压控制的可变电容器。

1.5 半导体三极管

半导体三极管也称双极型晶体三极管, 简称三极管。它是通过一定的制作工艺将两个 PN 结结合在一起的器件, 两个 PN 结的相互作用和内部结构的特点使其拥有电流放大作用和开关作用, 可以用来放大微弱的信号和作为无触点开关, 因而广泛应用于放大电路和数字电路中。可以说, 正是因为三极管的出现, 才促使了电子技术质的飞跃。本节围绕三极管的电流放大作用这个核心问题来讨论它的基本结构、工作原理、伏安特性曲线及主要参数。

1.5.1 三极管的基本结构和类型

1. 三极管的构造特点和分类

三极管是由两个背靠背的 PN 结构成的, 在工作过程中, 两种载流子(自由电子和空穴)都参与导电, 故称为双极型晶体三极管。两个 PN 结把半导体分成 3 个区域。根据 3 个区域排列的不同, 三极管的类型也不同, 分为 NPN 和 PNP 两种类型。

无论是 NPN 型还是 PNP 型三极管, 都分为 3 个区, 分别称为发射区、基区和集电区; 由 3 个区各引出一个电极(对于高频管和开关管, 可能另有一个接地, 起屏蔽作用), 分别称为发射极(E 或 e)、基极(B 或 b)和集电极(C 或 c); 发射区和基区之间的 PN 结称为发射结, 集电区和基区之间的 PN 结称为集电结, 如图 1-34 所示, 其中发射极箭头所示方向表示发射极电流的流向。在电路中, 三极管用文字符号 VT 表示。

三极管的种类很多, 按半导体基片材料可分为 NPN 型和 PNP 型, 按功率的大小可分为小功率管($\leq 1\text{W}$)和大功率管($> 1\text{W}$), 按工作频率的高低可分为分低频管(300kHz 以下)、中频管(300kHz~3MHz)、高频管(3~30MHz)和超高频管(30MHz 以上), 按管芯所用半导体材料可分为锗管和硅管, 按制造结构和工艺可分为合金管与平面管, 按用途可分为放



大管和开关管。由于功率大小不同，因而三极管的体积和封装形式也不同。三极管常见的有金属、玻璃、塑料等封装形式。常见三极管的外形及封装如图 1-35 所示。

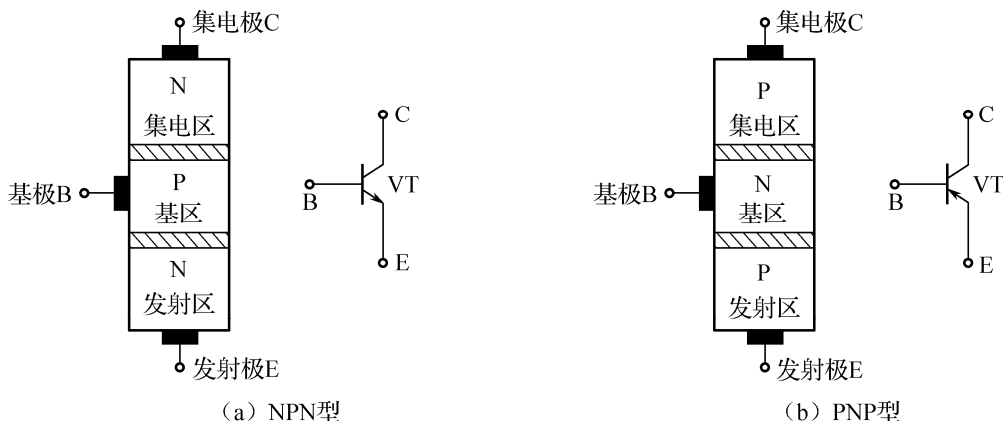


图 1-34 两类三极管的结构示意图及电路符号

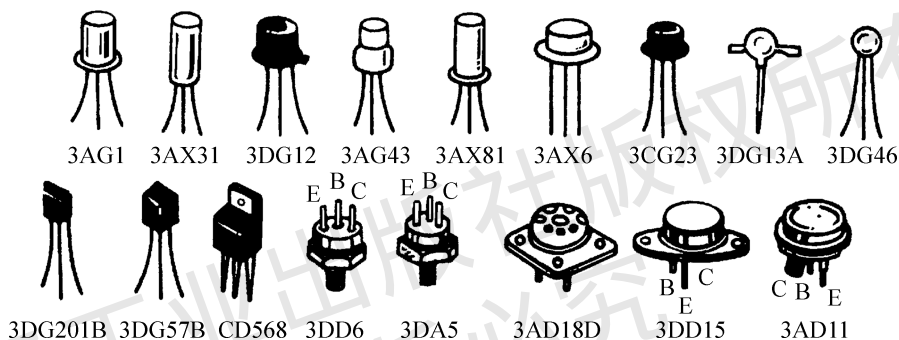


图 1-35 常见三极管的外形及封装

具有电流放大作用的三极管的内部结构必须具备如下条件。

- (1) 发射区掺杂浓度远高于基区掺杂浓度，以便有足够的载流子供“发射”。
- (2) 基区很薄，掺杂浓度很低，以减少载流子在基区的复合机会。
- (3) 集电结的面积比发射结的面积大，以便收集载流子。

2. 三极管的电流分配关系和放大作用

上面介绍了三极管具有电流放大作用的内部结构必须具备条件。为实现三极管的电流放大作用，还必须具有一定的外部条件，就是要给三极管的发射结加上正向偏置电压，给集电结加上反向偏置电压。下面以 NPN 管为例，通过实验测试的数据来说明三极管各极间电流的分配关系和电流放大作用。

NPN 管电流的分配关系和放大作用测试电路如图 1-36 (a) 所示。其中， V_{BB} 为基极电源，与基极电阻 R_B 和三极管的基极 B、发射极 E 组成基极-发射极回路（称为输入回路）， V_{BB} 使发射结正偏； V_{CC} 为集电极电源，与集电极电阻 R_C 和三极管的集电极 C、发射极 E 组成集电极-发射极回路（称为输出回路）， V_{CC} 使集电结反偏。在图 1-36 (a) 中，发射极 E 是输入回路和输出回路的公共端，因此称这种接法为共发射极放大电路。

电路接通后，调节可变电阻 R_B 的阻值，可以改变基极偏置电压，从而改变基极电流。调节 R_B 分别取 I_B 为 $0\mu A$ 、 $10\mu A$ 、 $20\mu A$ 、 $30\mu A$ 、 $40\mu A$ 、 $50\mu A$ ，读取相对应的集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E ，以及断开发射极后的 I_B 、 I_C 、 I_E 的数值，并填入表 1-1 中。



表 1-1 三极管各极电流测试数据

$I_B/\mu\text{A}$	-10	0	10	20	30	40	50
I_C/mA	0.01	0.01	0.56	1.14	1.74	2.33	2.91
I_E/mA	0	0.01	0.57	1.16	1.77	2.37	2.96

从实验结果中可得如下几条重要规律。

(1) 电流分配关系：三极管的发射极电流等于基极电流与集电极电流之和，符合基尔霍夫节点电流定律，用公式表示为

$$I_E = I_B + I_C$$

另外，从表 1-1 中还可以看出， I_E 和 I_C 几乎相等，都远远大于基极电流 I_B 。

(2) 直流电流放大作用：当改变基极电流时，集电极电流也随之改变，但集电极电流与基极电流的比值近乎为一个常数。我们把这种特性称为三极管的直流电流放大作用。 I_C 与 I_B 的比叫作三极管的直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ ，用公式表示为

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

可见，集电极电流受控于基极电流。基极电流的微小变化可以控制集电极电流的较大变化，这就是三极管的电流放大原理。因此，三极管是电流控制器件。

例如，从表 1-1 的第 4 列和第 5 列的实验数据可知，此时 I_C 与 I_B 的比值分别为

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.14\text{mA}}{20\mu\text{A}} = 57 \quad \bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.74\text{mA}}{30\mu\text{A}} = 58$$

(3) 交流电流放大作用：当基极电流有一个较小的变化量 ΔI_B 时，集电极电流就会有一个较大的变化量 ΔI_C 与之对应，且它们的比值近乎为一个常数。我们把这种特性称为三极管的交流电流放大作用。 ΔI_C 与 ΔI_B 的比叫作三极管的交流电流放大系数 β ，用公式表示为

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}, \text{ 或者是 } \beta = \frac{\Delta i_c}{\Delta i_b}, \text{ 两式的物理意义不同，但结果相同。}$$

例如，从表 1-1 的第 4 列和第 5 列的实验数据可知，此阶段内 ΔI_C 与 ΔI_B 的比值分别为

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{I_{C5} - I_{C4}}{I_{B5} - I_{B4}} = \frac{(1.74 - 1.14)\text{mA}}{(30 - 20)\mu\text{A}} = \frac{0.6\text{mA}}{10\mu\text{A}} = 60$$

强调：

① 三极管的 $\bar{\beta}$ 与 β 的物理意义是有严格区别的。 $\bar{\beta}$ 衡量三极管对静态（直流）电流的放大作用， β 衡量三极管对动态（交流）电流的放大作用。它们的共同之处是通过很小的基极电流控制很大的集电极电流。一般情况下， $\beta > \bar{\beta}$ ；在频率较低时，二者在数值上基本相等，无须严格区分。

② 当 $I_E = 0$ 时， $I_C = -I_B = I_{CBO}$ 。

I_{CBO} 称为集电极-基极反向饱和电流，与温度有关，数值一般很小。

③ 当 $I_B = 0$ 时， $I_C = I_E = I_{CEO}$ 。

I_{CEO} 称为集电极-发射极反向饱和电流，又叫穿透电流。 I_{CEO} 越小，三极管的温度稳定性越好。通常硅管的温度稳定性比锗管好。

④ 当 $I_B \neq 0$ 时， $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$ ， $I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO}$ 。

通过如图 1-36 (b) 所示的放大状态下三极管内部载流子的运动规律和传输过程可进一



步理解三极管的电流放大原理。

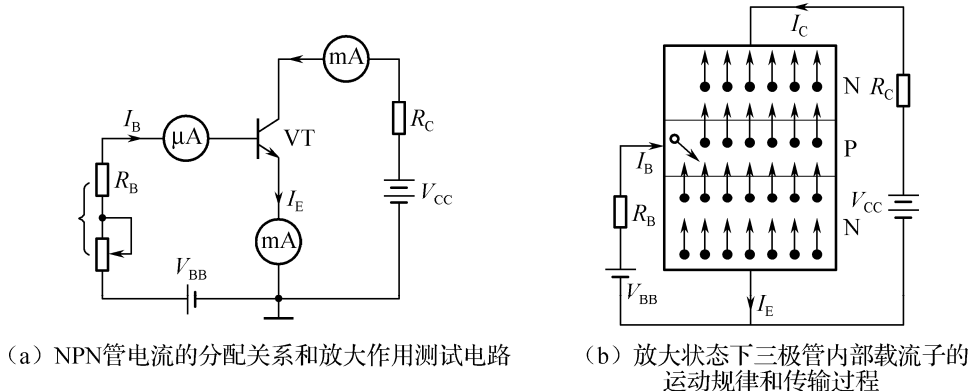


图 1-36 三极管测试电路和载流子的传输演示图

三极管内部载流子的传输过程（以 NPN 管为例）如下。

(1) 发射区向基区注入自由电子的过程。

由于发射结为正向偏置，所以 N 区的多数载流子——自由电子很容易越过发射结扩散到基区，从而形成发射极电流 I_E 。

(2) 电子在基区的扩散与复合过程。

由于基区很薄，掺杂浓度很低，所以从发射区扩散到基区的自由电子因有极少数与基区的空穴复合而形成基极电流 I_B ，基区被复合掉的空穴由电源补充。大部分未被复合掉的自由电子因电场力被吸引到集电结的边缘。基区的厚度与掺杂浓度决定了在基区被复合掉的自由电子数和被集电结收集的自由电子数的比例，从而决定了电流放大倍数的高低。

(3) 集电区收集扩散过来的自由电子的过程。

由于集电结加有较高的反向偏置电压，所以聚集到集电结边缘的大量自由电子在反向偏置电压的作用下顺利通过集电结进入集电区，并被集电区收集，形成集电极电流 I_C 。

在应用中，可以通过外电路控制基极电流 I_B 的大小，这就控制了基区被复合掉的自由电子数；扩散与复合的比例关系又决定了集电区收集的自由电子数，从而决定了集电极电流 I_C 的大小。这就是三极管电流放大作用的实质。前面提到，三极管要具有电流放大作用，还必须满足外部工作条件，即发射结正偏、集电结反偏。对于 NPN 管，必须满足 $V_C > V_B > V_E$ 的偏置条件；对于 PNP 管，必须满足 $V_C < V_B < V_E$ 的偏置条件。

3. 三极管放大器的基本连接方法

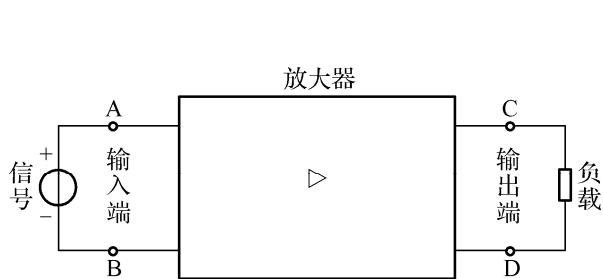


图 1-37 三极管放大器方框图

利用三极管的电流放大作用可以构成放大器。所谓放大器，就是指把微弱的电信号（电压或电流）放大到所需的程度，以满足负载的要求。根据基尔霍夫电流定律，产生电流的前提是闭合回路，因此信号源将信号输入放大器，经放大后输出给负载，必须有两个输入端和两个输出端，故放大器是一个四端网络，其方框图如图 1-37 所示。

三极管只有 3 个电极（3 端），那么，如何将三极管接成一个四端网络的放大器呢？解决



的方法是公用，即用三极管的第1个极作为“输入端”，第2个极作为“输出端”，第3个极作为输入回路和输出回路的“公共端”。在命名时，哪个极作为公共端就称共哪个极接法。这样，三极管放大器就有了3种接法（或称3种组态），即共发射极接法、共集电极接法和共基极接法，如图1-38所示。

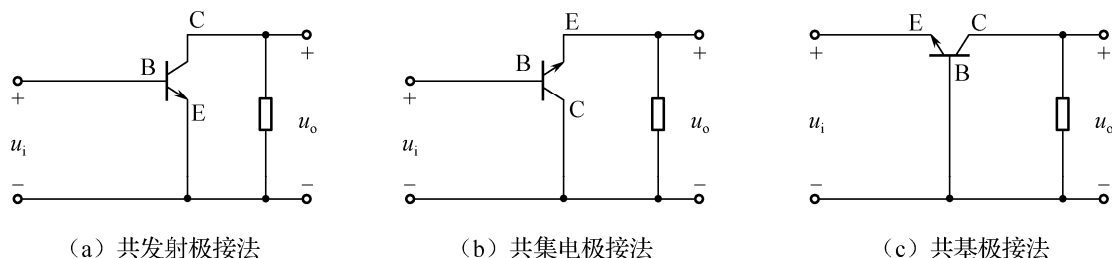


图1-38 三极管放大器的3种接法

共发射极接法：基极作为输入端，集电极作为输出端，发射极作为输入回路和输出回路的公共端，如图1-38(a)所示。这种接法应用最为普遍，是后期学习的重点。

共集电极接法：基极作为输入端，发射极作为输出端，集电极作为输入回路和输出回路的公共端，如图1-38(b)所示。这种接法也称射极输出器，具有电流放大倍数高、阻抗匹配性能好的特点。

共基极接法：发射极作为输入端，集电极作为输出端，基极作为输入回路和输出回路的公共端，如图1-38(c)所示。这种接法的高频特性好。

1.5.2 三极管的伏安特性曲线

三极管的伏安特性曲线是用来表示各个电极间的电压和电流之间的相互关系的，它反映出三极管的性能，是分析放大电路的重要依据。三极管的伏安特性曲线可由实验测得，也可在三极管图示仪上直观地显示出来。三极管放大器有输入和输出两个回路，相应地，有输入和输出两种伏安特性曲线，下面以共发射极接法的NPN管为例，对三极管的伏安特性曲线予以分析。

1. 输入特性曲线

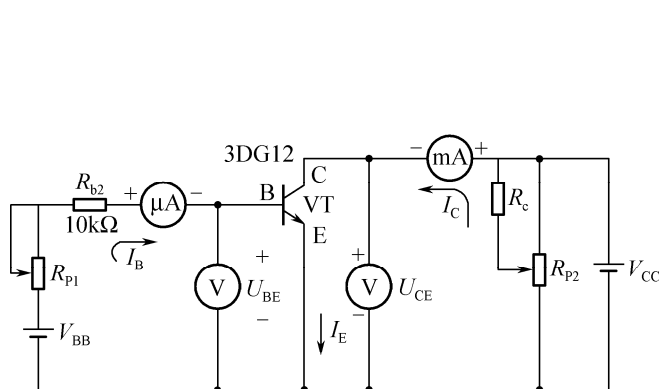
三极管的输入特性曲线是指当 u_{CE} 为一定值时，加在三极管基极与发射极之间的电压 u_{BE} 和它产生的基极电流 i_B 之间的关系曲线，可用函数关系式表示为 $i_B = f(u_{BE})|_{u_{CE}=\text{常数}}$ 。

(1) 输入特性曲线的制作。

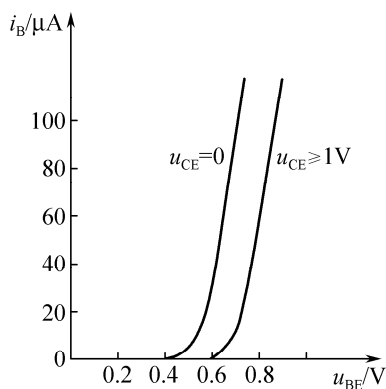
三极管输入特性曲线的测试电路如图1-39(a)所示。

测试时，先调节 R_{P2} ，使 $u_{CE}=0$ ；然后调节 R_{P1} ，让 u_{BE} 从零开始逐渐升高，记录 u_{BE} 和 i_B 的对应值，并在以 u_{BE} 为横轴、 i_B 为纵轴的直角坐标系中对测试数据进行描点和连线，将各组数据连成平滑的曲线，即 $u_{CE}=0$ 时该三极管的输入特性曲线，如图1-39(b)所示。

通过给定一个不同的 u_{CE} 值（如0.5V、1V、1.5V、2V等），便可得到一条不同的输入特性曲线，方法与过程同前。因此，三极管的输入特性曲线有无数条。



(a) 三极管输入特性曲线的测试电路



(b) 输入特性曲线

图 1-39 三极管共发射极输入特性

(2) 输入特性曲线的分析。

① 当 $u_{CE}=0$ 时, 三极管的输入特性曲线和二极管的正向伏安特性曲线形状一样, 也有死区、非线性区和线性区。这是因为集电结实质上就是一个 PN 结, 情况如两个二极管的正向并联。

硅管的死区电压 U_T 约为 $0.5V$, 发射结导通电压 U_{BE} 为 $0.6\sim 0.7V$; 锗管的死区电压 U_T 约为 $0.1V$, 导通电压 U_{BE} 为 $0.2\sim 0.3V$ 。

② $u_{CE}=1V$ 时的输入特性曲线与 $u_{CE}=0$ 时的输入特性曲线形状一样, 只是曲线向右平移了一段距离。原因是当 $u_{CE}=1V$ 时, 三极管已经导通, 从发射区向基区注入的自由电子大部分被集电结收集并形成 i_C ; 只有少数自由电子与基区的空穴复合形成 i_B 。故在相同的 u_{BE} 的作用下, $u_{CE}=1V$ 时的 i_C 值小于 $u_{CE}=0$ 时的 i_C 值, 导致输入特性曲向右平移。

③ 当 $u_{CE}<1V$ 时, 输入特性曲线只在 $u_{CE}=1V$ 的曲线左侧平移。

④ 当 $u_{CE}>1V$ 以后, 各条曲线几乎与 $u_{CE}=1V$ 时的输入特性曲线重合。这是因为三极管导通后, i_C 只受控于 i_B , 几乎与 u_{CE} 无关。

当三极管工作在放大状态时, u_{CE} 总是高于 $1V$ 的 (集电结反偏)。因此, 在实际应用中, 一般只作 $u_{CE}=1V$ 的这条输入特性曲线即可, 在运用图解法分析三极管放大器时, 也只需对 $u_{CE}=1V$ 的输入特性曲线展开分析即可。

2. 输出特性曲线

三极管的输出特性曲线是指当 i_B 为一定值时, 输出回路中集电极和发射极之间的电压 u_{CE} 与集电极电流 i_C 之间的关系曲线, 可用函数关系式表示为 $i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$ 。

(1) 输出特性曲线的制作。

三极管输出特性曲线的测试电路如图 1-40 (a) 所示。

测试时, 先调节 R_{P1} , 使 $i_B=0$; 然后调节 R_{P2} , 让 u_{CE} 从零开始逐渐升高, 记录 u_{CE} 和 i_C 的对应值, 并在以 u_{CE} 为横轴、 i_C 为纵轴的直角坐标系中对测试数据进行描点和连线, 将各组数据连成平滑的曲线, 即 $i_B=0$ 时该三极管的输出特性曲线, 如图 1-40 (b) 所示。

通过给定一个不同的 i_B 值 (如 $20\mu A$ 、 $40\mu A$ 、 $60\mu A$ 、 $80\mu A$ 等), 便可得到一条不同的输出特性曲线, 方法与过程同前。因此, 三极管的输出特性曲线也有无数条, 它们共同组成一组曲线族, 如图 1-40 (b) 所示。

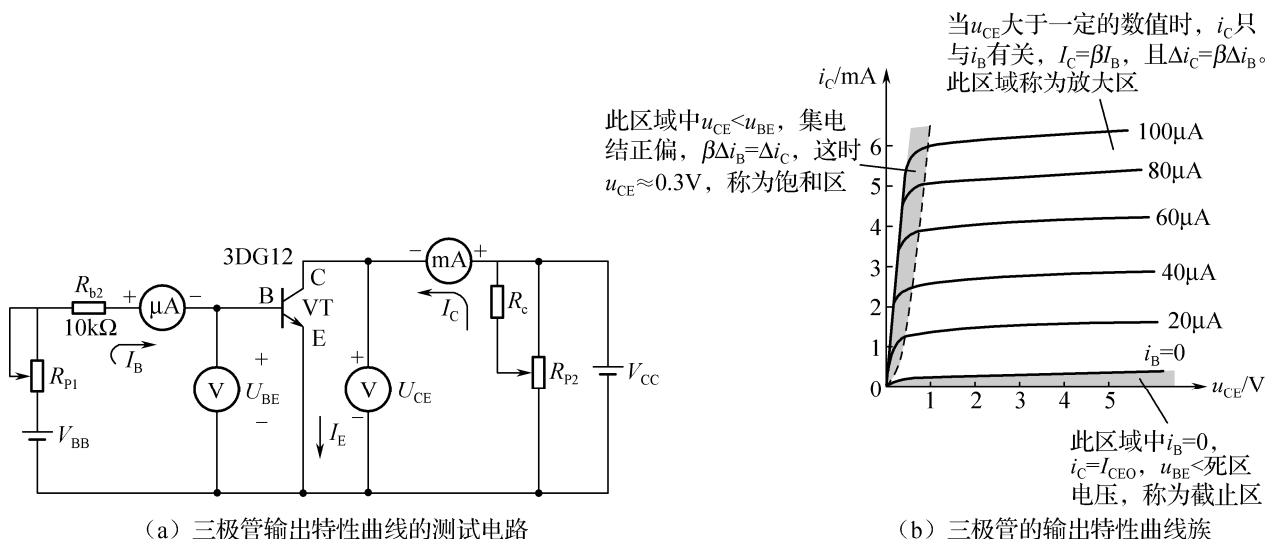


图 1-40 三极管的输出特性

(2) 输出特性曲线的分析。

① 当 u_{CE} 从零开始升高时, i_C 随着 u_{CE} 的升高而迅速增大; 当 $u_{CE} \approx u_{BE}$ 时, 曲线增长速度减缓。这是因为当 $u_{CE} < u_{BE}$ 时, 集电结处于正偏状态, 收集自由电子的能力很弱, 故 i_C 很小; 随着 u_{CE} 的升高, 集电结收集自由电子的能力迅速增强, 故 i_C 迅速增大, i_C 受 u_{CE} 的影响很大。

② 当 $u_{CE} > u_{BE}$ 以后, 输出特性曲线基本与 u_{CE} 轴平行, i_C 不再跟随 u_{CE} 的升高而增大, 基本保持为一个恒定值。究其原因, 即当 $u_{CE} > u_{BE}$ 以后, 集电结处于反偏状态, 三极管已进入放大状态, i_C 只受控于 i_B , 因此在 i_B 保持不变的情况下, 输出特性曲线基本与 u_{CE} 轴平行。

(3) 输出特性曲线的 3 个工作区。

如图 1-40 (b) 所示, 我们把输出特性曲线分成 3 个工作区, 即截止区、放大区和饱和区。它们分别对应三极管的截止状态、放大状态和饱和状态。下面分析 3 个工作区各自的特点。

① 截止区: $i_B = 0$ 的特性曲线以下所包含的区域。在这个区域中, 集电结反偏; $u_{BE} \leq 0$, 发射结零偏或反偏, 即 $v_C > v_E \geq v_B$; 电流 i_C 很小, 为集电极-发射极反向饱和电流 I_{CEO} 。三极管工作在截止区时, 集电极、发射极之间相当于一个断开的开关。

② 饱和区: 各条特性曲线的 $u_{BE} = u_{CE}$ 的点的集合线 [见图 1-40 (b) 中的虚线, 也称临界饱和线] 左侧与 i_C 线性增长段所包含的区域 [见图 1-40 (b) 中的阴影部分]。在饱和区, $u_{CE} < u_{BE}$, 发射结、集电结均处于正偏状态, 即 $v_B > v_C > v_E$, 集电结没有收集载流子的能力, 各 i_B 值所对应的特性曲线几乎重合在一起。当 u_{CE} 升高时, i_C 随之增大; 而当 i_B 变化时, i_C 却基本不变。因此, 工作在饱和区的三极管失去了电流放大作用。

规定: $u_{CE} = u_{BE}$ 即 $u_{CB} = 0$ 时的状态称为临界饱和状态。此时, u_{CE} 称为临界饱和电压, 用 U_{CES} 表示; i_C 称为集电极临界饱和电流, 用 I_{CS} 表示; i_B 称为基极临界饱和电流, 用 I_{BS} 表示。两电流的关系式为 $I_{CS} = \beta I_{BS}$; 当 $u_{CE} < u_{BE}$ 时为深饱和状态, 此时的 $i_C < \beta I_{BS}$ 。我们把三极管饱和状态时的 u_{CE} 称为饱和压降, 由于饱和压降与临界饱和电压的数值很接近, 所以习惯上也用 U_{CES} 表示。

因此, 当集电极电流 $i_C \geq I_{CS}$ 时, 认为管子已处于饱和状态; 当 $i_C < I_{CS}$ 时, 说明管子处于放大状态。当管子深度饱和时, 硅管的 u_{CE} 约为 0.3V, 锗管约为 0.1V。由于深度饱和时 $u_{CE} \approx 0$,



所以集电极和发射极之间相当于一个闭合的开关。

③ 放大区：由各条输出特性曲线近似平坦部分所组成的区域。放大区的三极管满足发射结正偏、集电结反偏，即 $v_C > v_B > v_E$ 。在放大区， i_C 几乎不变，其大小只受 i_B 的控制。当 i_B 有微小变化时， i_C 就有 β 倍的变化与之对应，即 $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$ 。此时，三极管具有电流放大作用。在放大区， β 约等于常数， i_C 几乎按一定比例等距离平行变化。由于 i_C 只受 i_B 的控制，几乎与 u_{CE} 无关，所以三极管可看作集电极电流受基极电流控制的受控电流源，具有恒流特性。

综上所述，三极管工作在截止区时，发射结零偏或反偏、集电结反偏，集电极和发射极之间相当于一个断开的开关；工作在饱和区时，发射结和集电结均正偏，集电极和发射极之间相当于一个闭合的开关；工作在放大区时，发射结正偏、集电结反偏，集电极电流受控于基极电流。

【例 12】 用直流电压表测量如图 1-41 所示的三极管放大电路：在图 1-41 (a) 中， VT_1 各电极的对地电位分别为 $V_x = +10V$ 、 $V_y = 0$ 、 $V_z = +0.7V$ ；在图 1-41 (b) 中， VT_2 各电极的对地电位分别为 $V_x = +0$ 、 $V_y = -0.3V$ 、 $V_z = -5V$ 。试判断 VT_1 和 VT_2 各是何类型、何材料的管子？x、y、z 各是何电极？

【解析】 工作在放大区的 NPN 型三极管应满足 $V_C > V_B > V_E$ ，PNP 型三极管应满足 $V_C < V_B < V_E$ 。因此在分析时，应先找出中间电位值的电极，确定为基极；再找出与基极电位差等于二极管导通压降的电极——发射极，剩余电极即集电极；最后根据基极和发射极的电位差值（+0.3V 或 +0.7V）判断管子的材料。

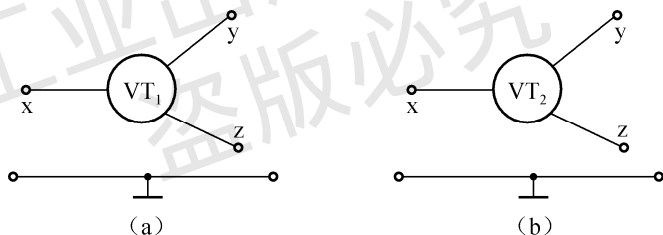


图 1-41 例 12 图

【解答】 在图 1-41 (a) 中，中间电位值电极 z 与 y 的电位差为 0.7V，可确定为硅管；z 为基极、y 为发射极、x 为集电极；且 $V_x > V_z > V_y$ ，满足 $V_C > V_B > V_E$ 的关系，判定管型为 NPN 型。

在图 1-41 (b) 中，中间电位值电极 y 与 x 的电位差为 -0.3V，可确定为锗管；y 为基极、x 为发射极、z 为集电极；且 $V_z < V_y < V_x$ ，满足 $V_C < V_B < V_E$ 的关系，判定管型为 PNP 型。

【例 13】 在如图 1-42 所示的各电路中，已知三极管均为硅管， $\beta = 30$ 。试分析各三极管的工作状态。

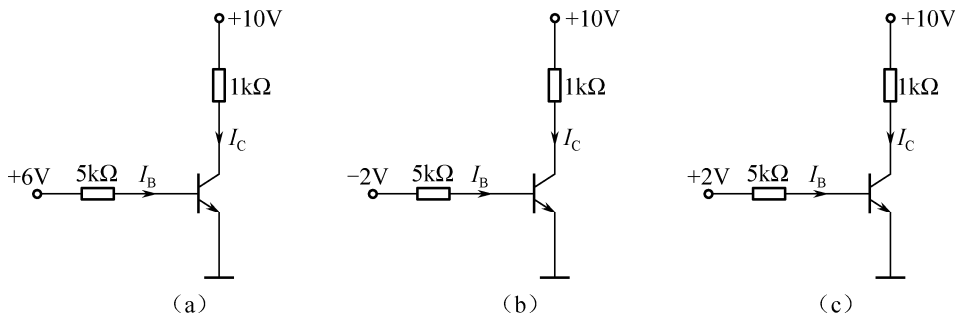


图 1-42 例 13 图



【解答】在图 1-42 (a) 中, 基极偏置电源+6V 高于管子的导通电压, 故管子的发射结正偏, 管子导通, 此时有以下结果。

$$\text{基极电流为 } I_B = \frac{(6-0.7)V}{5k\Omega} = \frac{5.3V}{5k\Omega} = 1.06mA。$$

$$\text{集电极电流为 } I_C = \beta I_B = 30 \times 1.06mA = 31.8mA。$$

$$\text{集电极临界饱和电流为 } I_{CS} = \frac{(10-U_{CES})V}{1k\Omega} = \frac{9.3V}{1k\Omega} = 9.3mA。$$

因为 $I_C > I_{CS}$, 所以管子工作在饱和区。

在图 1-42 (b) 中, 基极偏置电源-2V 低于管子的导通电压, 因为管子的发射结和集电结均反偏, 所以管子工作在截止区。

在图 1-42 (c) 中, 基极偏置电源+2V 高于管子的导通电压, 故管子的发射结正偏, 管子导通, 此时有以下结果。

$$\text{基极电流为 } I_B = \frac{(2-0.7)V}{5k\Omega} = \frac{1.3V}{5k\Omega} = 0.26mA。$$

$$\text{集电极电流为 } I_C = \beta I_B = 30 \times 0.26mA = 7.8mA。$$

$$\text{集电极临界饱和电流为 } I_{CS} = \frac{(10-U_{CES})V}{1k\Omega} = \frac{9.3V}{1k\Omega} = 9.3mA。$$

因为 $I_C < I_{CS}$, 所以管子工作在放大区。

1.5.3 三极管的主要参数

三极管的参数是衡量三极管性能的重要标志, 是评价三极管的优劣和选用三极管的依据, 也是计算和调整三极管放大电路时必不可少的根据。三极管的主要参数分为放大特性参数、直流特性参数、极限参数和频率特性参数 4 类。除此之外, 温度对三极管的参数也有很大的影响。

1. 三极管的放大特性参数

(1) 共射直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 。

$\bar{\beta}$ 表示在一定的集电极-发射极电压下, 集电极电流和基极电流之比, 即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_{CE}=\text{常数}}$$

这个参数表明了三极管对直流电流的放大能力。在三极管手册中, 常用 H_{FE} 表示 $\bar{\beta}$ 。

(2) 共射交流电流放大系数 β 。

β 表示在一定的集电极-发射极电压下, 集电极电流的变化量和基极电流的变化量之比,

$$\text{即 } \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{U_{CE}=\text{常数}} \text{ 或 } \beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Big|_{u_{CE}=\text{常数}}, \text{ 两式的物理意义不同, 但结果相同。}$$

这个参数表明了三极管对交流电流的放大能力。在三极管手册中, 常用 h_{fe} 表示 β 。

上述两个共射电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和 β 的含义虽不同, 但当三极管工作于输出特性曲线的放大区的平坦部分时, 两者差异极小, 故在今后的估算中, 常做 $\bar{\beta} = \beta$ 处理。由于制造工艺上的分散性, 同一类型三极管的 β 值差异很大。常用的小功率三极管的 β 值一般为 20~200。 β 过小, 管子的电



流放大作用小; β 过大, 管子的工作稳定性差。一般选用 β 为 40~100 的管子较为合适。

(3) 共基直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ 。

$\bar{\alpha}$ 表示在一定的集电极-基极电压下, 集电极电流和发射极电流之比, 即

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \Big|_{U_{CB}=\text{常数}}$$

这个参数表明了三极管在共基极接法时的直流电流放大能力。由于 $I_C < I_E$, 所以 $\bar{\alpha} < 1$, 即在共基极接法时, 三极管没有直流电流放大能力。

与之对应的还有共基交流电流放大系数 α , 其定义方法与 β 相同, 此处不再详述。

2. 三极管的直流特性参数

直流特性参数是用于衡量三极管温度特性的重要参数。

(1) 集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO} 。

I_{CBO} 是指发射极开路、集电极与基极之间加反向电压时产生的电流, 也是集电结的反向饱和电流。可以用如图 1-43 所示的电路测量 I_{CBO} 。手册上给出的 I_{CBO} 都是在规定的反向电压之下测出的, 当反向电压改变时, I_{CBO} 的数值可能稍有改变。另外, I_{CBO} 是少数载流子电流, 随着温度的升高而按指数规律上升, 影响三极管工作的稳定性。作为三极管的性能指标, I_{CBO} 越小越好。一般情况下, 硅管的 I_{CBO} 比锗管小得多; 大功率管的 I_{CBO} 较大, 使用时应予以注意。

(2) 集电极-发射极反向饱和电流 I_{CEO} 。

I_{CEO} 是指基极开路、集电极与发射极之间加电压时的集电极电流。由于这个电流由集电极穿过基区流到发射极, 故称为穿透电流。 I_{CEO} 的测量电路如图 1-44 所示。根据三极管的电流分配关系, $I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO}$, 故 I_{CEO} 也要受温度的影响而改变, 且 β 大的三极管的温度稳定性较差。

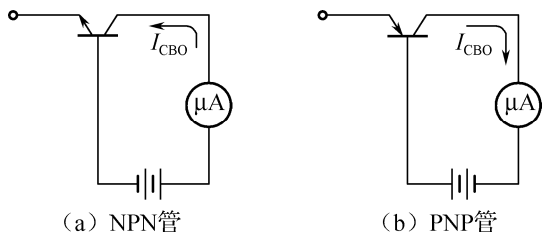


图 1-43 I_{CBO} 的测量电路

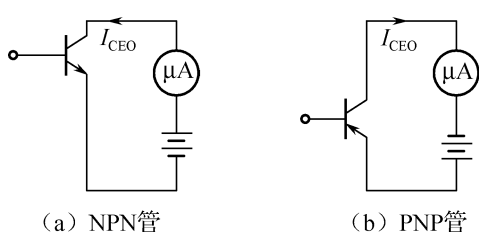


图 1-44 I_{CEO} 的测量电路

3. 三极管的极限参数

极限参数是三极管为了安全而在使用过程中不得超过的限度参数。

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。

I_{CM} 表示 β 值减小到正常值的 2/3 时的集电极电流。通常 i_C 不应超过 I_{CM} , 如果超过了 I_{CM} , 那么三极管的 β 就要显著减小到(表现为输出特性曲线间的间距变小), 甚至可能损坏三极管。

(2) 反向击穿电压。

① 集电极-发射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。

$U_{(BR)CEO}$ 是指基极开路时集电极和发射极之间所能承受的最高反向工作电压。 $U_{(BR)CEO}$ 在几十伏至几百伏之间, 使用时如果超出这个电压, 则将导致集电极电流 i_C 急剧增大, 这种现象称为击穿, 从而造成管子永久性损坏。选择时必须符合电源 $V_{CC} < U_{(BR)CEO}$ 的条件。



② 集电极-基极反向击穿电压 $U_{(BR)CBO}$ 。

$U_{(BR)CBO}$ 是指发射极开路时集电结所能承受的最高反向工作电压。 $U_{(BR)CBO}$ 通常比 $U_{(BR)CEO}$ 要高些, 在几十 V 至几百 V 之间。

③ 发射极-基极反向击穿电压 $U_{(BR)EBO}$ 。

$U_{(BR)EBO}$ 是指集电极开路时发射结所能承受的最高反向工作电压。小功率管的 $U_{(BR)EBO}$ 通常只有几 V。

综上所述, 三极管的 3 个反向击穿电压满足关系式 $U_{(BR)CBO} > U_{(BR)CEO} > U_{(BR)EBO}$ 。

(3) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。

集电结允许的最大功率损耗值称为集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。

三极管的电流 i_C 与电压 u_{CE} 的乘积称为集电极耗散功率 P_C , 这个功率导致集电结发热, 温度升高。而三极管的结温是有一定限度的, 一般硅管的结温为 $100 \sim 150^\circ\text{C}$, 锗管的结温为 $70 \sim 100^\circ\text{C}$, 超过这个限度, 管子的性能就要变坏, 甚至烧毁。因此, 根据管子的允许结温定出了集电极最大允许耗散功率 P_{CM} , 工作时管子的消耗功率必须小于 P_{CM} 。

P_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 和 I_{CM} 这 3 个极限参数决定了三极管的安全工作区。图 1-45 是根据 3DG4 管的 3 个极限参数 ($P_{CM}=300\text{mW}$, $I_{CM}=30\text{mA}$, $U_{(BR)CEO}=30\text{V}$) 在输出特性的坐标系上画出的 $P_{CM}=i_C u_{CE}$ 的曲线, 称为集电极最大允许功率损耗线 (也称允许管耗线)。由图 1-45 可知, 曲线的左下方均满足 $P_C < P_{CM}$, 为安全工作区; 右上方均满足 $P_C > P_{CM}$, 为过损耗区。

4. 三极管的频率特性参数

由于发射结和集电结的电容效应, 三极管在高频工作时的放大性能变差。频率特性参数是用来衡量三极管在高频放大时性能优劣的主要参数。

(1) 共发射极截止频率 f_β 。

三极管的 β 值是随信号频率的升高而减小的。 β 与 f 的特性曲线如图 1-46 所示。低频时, β 基本保持为常数, 用 β_0 表示低频时的 β 值; 当频率升高到一定的值后, β 开始减小, 把 β 减小到 β_0 的 0.707 倍时的频率称为共发射极截止频率 f_β 。应当说明的是, 对于频率为 f_β 或高于 f_β 的信号, 三极管仍然有电流放大作用。

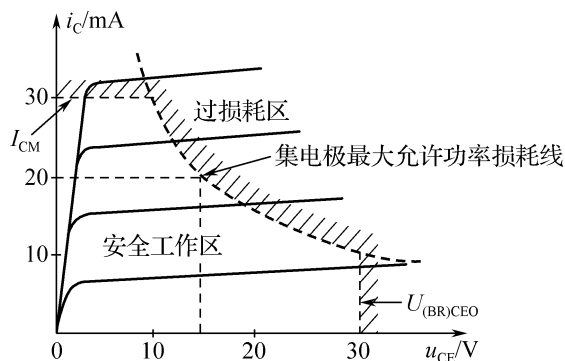


图 1-45 3DG4 的安全工作区和过损耗区

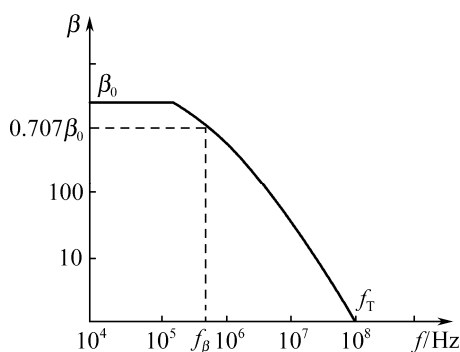


图 1-46 β 与 f 的特性曲线

(2) 特征频率 f_T 。

三极管的 $\beta=1$ 时对应的频率称为特征频率 f_T 。

在高于 f_β 的频率范围内, β 与 f 的乘积是不变的, 近似满足 $f_T = \beta f$ 。因此, 知道了 f_T 就可以近似确定一个 f (当 $f > f_\beta$ 时) 对应的 β 值。通常高频三极管都用 f_T 表征其高频放大特性。



5. 温度对三极管参数的影响

几乎所有三极管的参数都与温度有关,因此温度因素不容忽视。温度对下列 4 个参数的影响最大。

(1) 温度对 I_{CBO} 的影响: I_{CBO} 是由少数载流子形成的,与 PN 结的反向饱和电流一样,受温度的影响很大。无论硅管或锗管,作为工程上的估算,一般都按温度每升高 10°C , I_{CBO} 增大为原来的 2 倍来考虑。

(2) 温度对 β 的影响: 当温度升高时, β 随之增大。实验表明,不同类型的三极管的 β 随温度的增长情况是不同的。一般认为以 25°C 时测得的 β 值为基数,温度每升高 1°C , β 增大 $0.5\%\sim 1\%$ 。

(3) 温度对 i_C 的影响: 因为 $i_C = \beta i_B + (1 + \beta)I_{CBO}$, 而 $I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO}$, 所以温度升高也会使集电极电流 i_C 增大。换言之,集电极电流 i_C 随温度的变化而变化。

(4) 温度对发射结电压 u_{BE} 的影响: 与二极管的正向特性一样,温度每升高 1°C , $|u_{BE}|$ 降低 $2\sim 2.5\text{mV}$, 具有负温度系数特性。

1.5.4 特种三极管及其应用

1. 复合三极管

所谓复合三极管,就是指 2 个(或 3 个)通过达林顿接法的方式连接起来的作为单管使用的三极管。采用复合三极管的意义有两个:其一,复合后可极大地增大三极管的 β 值(适用于单管 β 值过小的场合);其二,在功率放大电路中,便于 NPN 型和 PNP 型大功率三极管的配对(适用于需要改变大功率管的导电型性的场合)。

三极管的复合方法如图 1-47 所示。复合三极管的特征说明如下。

(1) 复合三极管的管型与前管保持一致。

(2) 同型管的正确复合接法可概括为射接基、集相连,即前管的发射极接后管的基极,两管的集电极连在一起。

(3) 异型管的正确复合接法可概括为集接基、射集连,即前管的集电极接后管的基极,前管的发射极与后管的集电极连在一起。

(4) 复合三极管的总电流放大倍数约等于各三极管电流放大倍数的乘积,即 $\beta \approx \beta_1 \beta_2$ 。

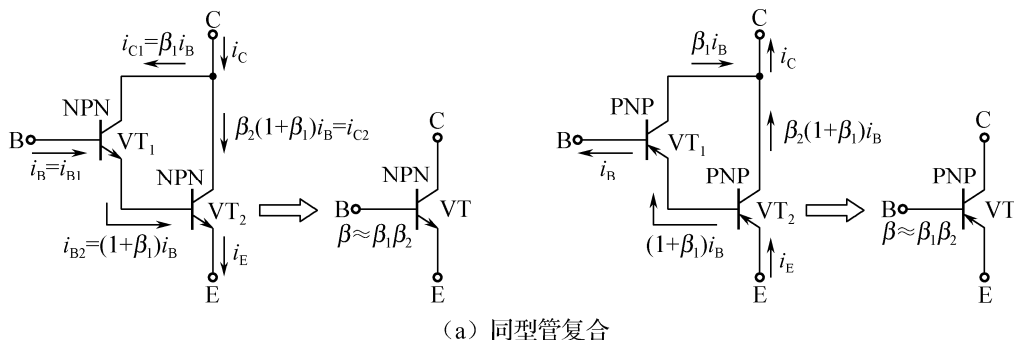


图 1-47 三极管的复合方法

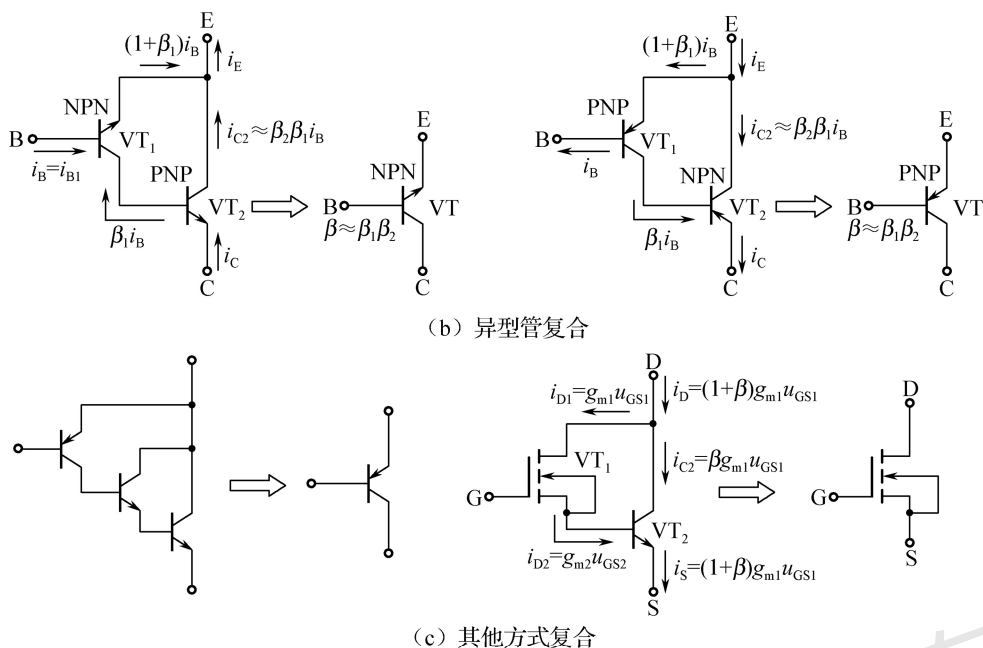


图 1-47 三极管的复合方法 (续)

2. 光电三极管

光电三极管也称光敏三极管，它除具备光电二极管的光电转换特性之外，还能对转换后的电信号进行电流放大。光电三极管一般仅引出集电极和发射极，其外形与发光二极管一样，其实物图、符号和等效电路如图 1-48 所示。

图 1-49 所示为光电三极管的光电转换应用电路。其中电阻 R 的作用是将电流转换为电压，电路的工作原理可简述为：光照 $\uparrow \rightarrow i \uparrow \rightarrow iR \uparrow \rightarrow u_o \uparrow$ 。由于输出 u_o 正比于光照强度，所以实现了光电转换。

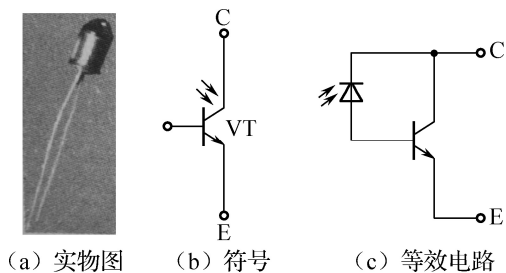


图 1-48 光电三极管

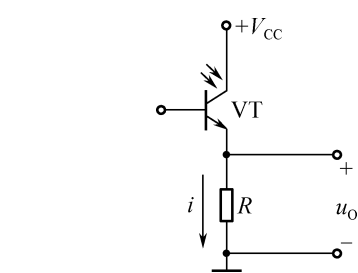


图 1-49 光电三极管的光电转换应用电路

3. 光电耦合三极管

光电耦合器件是一种将发光管与光电管封装在一个固定光路内的光电器件。通过固定的光路将发光管发出的光信号传送给光电二极管或光电三极管，实现光电转换后传送给负载。光电耦合器件的类型有光电耦合二极管和光电耦合三极管，其电路结构如图 1-50 所示。

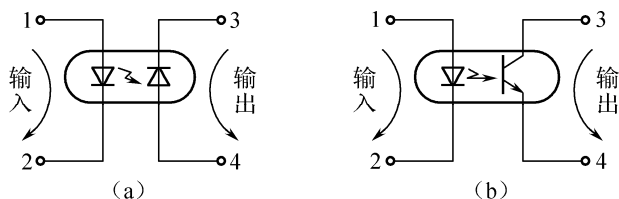


图 1-50 光电耦合器件的电路结构



光电耦合器件的输入回路与输出回路之间只有光的单向传输，并无电的联系，具有抗干扰能力强、电气隔离性能好、信号单向传输的特点。因此在要求电气隔离和信号单向传输的场合，光电耦合器件得到了广泛的应用。

4. 片状三极管简介

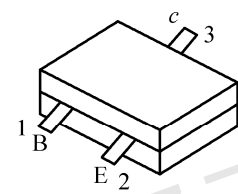
片状三极管是一种外形扁、体积小、贴焊安装于电路板铜箔上的新型器件，广泛应用于彩色电视、计算机和移动通信等电子设备中。

(1) 片状三极管的封装。

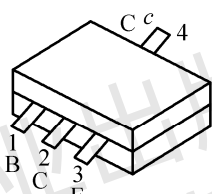
额定功率为 100~200mW 的小功率三极管多为 SOT-23 形式封装，如图 1-51 (a) 所示；额定功率为 1~1.5W 的大功率三极管多为 SOT-89 形式封装，如图 1-51 (b) 所示。

(2) 带阻片状三极管。

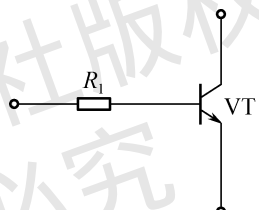
在三极管的管芯内已经配置了一只或两只偏置电阻的片状三极管称为带阻片状三极管，如图 1-52 所示。这种内部配置偏置电阻的方式可减少设计和安装时所需元器件的数量，可进一步促进电子产品的小型化。带不同阻值的带阻片状三极管已发展成熟，成为完整的系列，方便我们灵活选择。部分带阻片状三极管的型号、管型和内偏置电阻参数如表 1-2 所示。



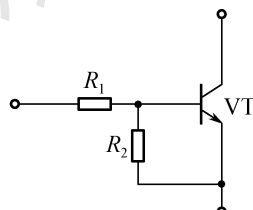
(a) SOT-23形式封装



(b) SOT-89形式封装



(a) 带一只偏置电阻



(a) 带两只偏置电阻

图 1-51 片状三极管的封装

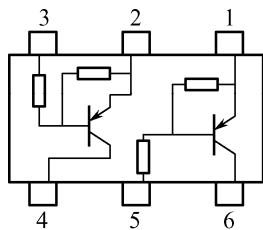
图 1-52 带阻片状三极管

表 1-2 部分带阻片状三极管的型号、管型和内偏置电阻参数

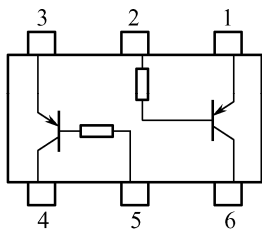
型 号	极 性	R_1/R_2	型 号	极 性	R_1/R_2
DTC114E	NPN	10k Ω /10k Ω	DTC143X	NPN	4.7k Ω /10k Ω
DTC124E	NPN	22k Ω /22k Ω	DTC363E	NPN	6.8k Ω /6.8k Ω
DTC114	NPN	47k Ω /47k Ω	DTA114Y	PNP	10k Ω /47k Ω
DTC114WK	NPN	47k Ω /22k Ω	DTA114E	PNP	100k Ω /100k Ω
DTC114T	NPN	$R_1=10k\Omega$	DTA123Y	PNP	2.2k Ω /2.2k Ω
DTC124T	NPN	$R_1=22k\Omega$	DTA143X	PNP	4.7k Ω /22k Ω

(3) 复合双三极管。

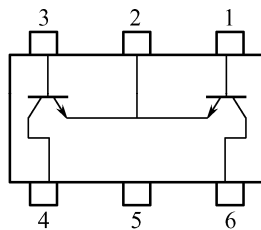
复合双三极管是一种在一个封装内包含两只三极管（带或不带偏置电阻）的新型器件，常见封装形式有 SOT-36、SOT-25、UM-6 等，如图 1-53 所示。



(a) SOT-36



(b) SOT-25



(c) UM-6

图 1-53 复合双三极管的常见封装形式



1.5.5 三极管的判别与质量估测

1. 三极管管型和电极的判别

用万用表判别三极管的管型和电极的步骤为：①找基极，定管型；②判别集电极和发射极。

(1) 基极和管型的判别。

图 1-54 是三极管的结构示意图，对于 PNP 或 NPN 管型，在测量其极间电阻时，均可看成是两个反向串联的 PN 结。显然，PNP 管型的基极是两个 PN 结的公共阴极，NPN 管型的基极是两个 PN 结的公共阳极。

判别过程：万用表挡位选择 $R \times 1k\Omega$ 或 $R \times 100\Omega$ 挡，用红表笔和任一引脚相接（假设它是基极 B），用黑表笔分别和另外两个引脚相接，如果两次测得的阻值都很小，则黑表笔所连接的就是基极，而且是 PNP 型的管子（假如交换表笔，则两次测得的阻值都很大）。同理，如果按上述方法测得的阻值均较大，则黑表笔所连接的是 NPN 管的基极；若两次测得的阻值一大一小，则假设是错误的，需要重新假设并进行测试。

如果按上述方法找不到基极，则说明三极管已损坏（PN 结短路或开路），后续的集电极和发射极的判别已无意义。

(2) 集电极和发射极的判别。

判别原理：NPN 管的偏置条件为 $V_C > V_B > V_E$ ，PNP 管的偏置条件为 $V_C < V_B < V_E$ 。找到基极判定管型后，利用万用表欧姆挡的内置电池充当电源，利用欧姆挡的内阻和人体电阻充当三极管的偏置电阻，根据管型对三极管进行两次对比测量，通过是否符合偏置条件来判别三极管的集电极和发射极。图 1-55 是人体电阻正确接入方式的示意图，即把假设的集电极和基极紧紧捏住，但两引脚不能相碰。

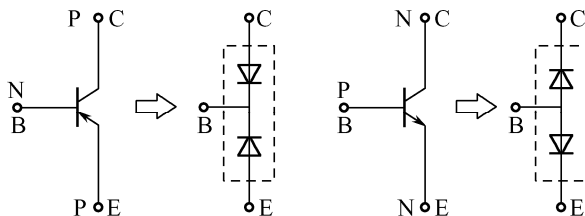


图 1-54 三极管的结构示意图

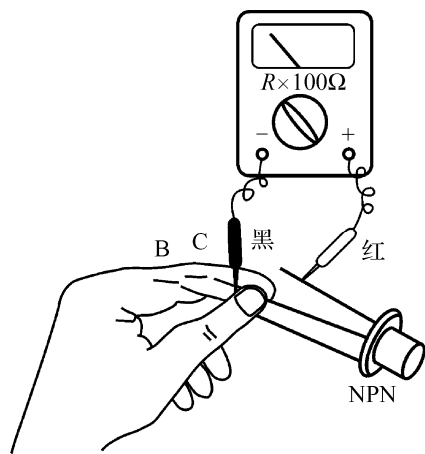


图 1-55 人体电阻正确接入方式的示意图

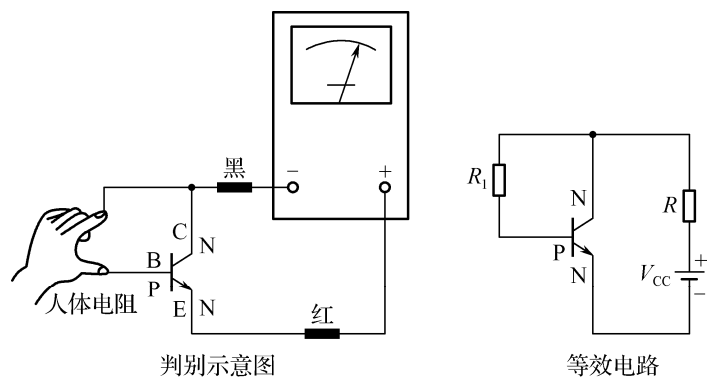
NPN 管集电极和发射极的判别过程如下。

如图 1-56 所示，在两次测量中，一次满足三极管的偏置条件，因此电流大，指针偏转角度大 [见图 1-56 (a)]；另一次不满足三极管的偏置条件，因此电流小，指针偏转角度小 [见图 1-56 (b)]。在两次测量中，对于指针偏转角度大的那一次，黑表笔所接为集电极。

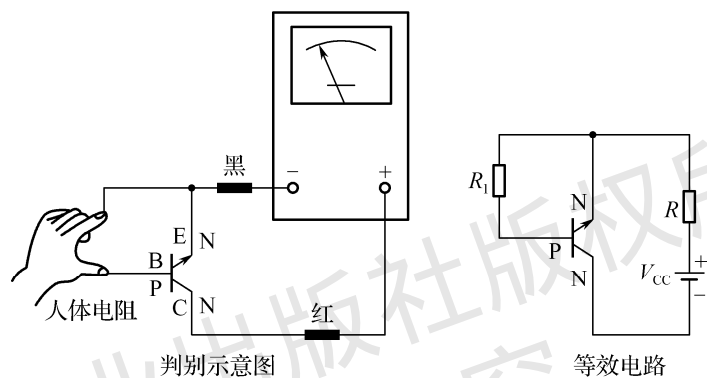
PNP 管集电极和发射极的判别过程如下。



如图 1-57 (a)、(b) 所示, 在两次测量中, 指针偏转角度大的那一次满足三极管的偏置条件, 红表笔所接为集电极。

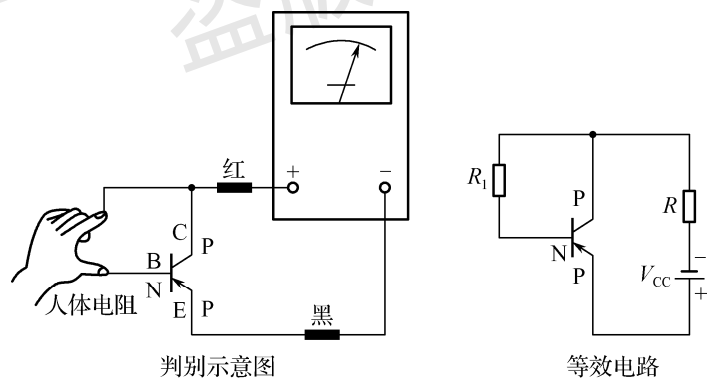


(a) 满足偏置条件, 偏转角度大

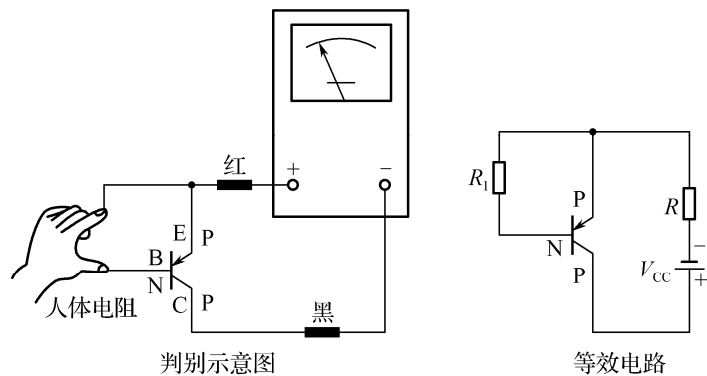


(b) 不满足偏置条件, 偏转角度小

图 1-56 NPN 管集电极和发射极的判别原理



(a) 满足偏置条件, 偏转角度大



(b) 不满足偏置条件, 偏转角度小

图 1-57 PNP 管集电极和发射极的判别原理