



普通高等教育“十一五”规划教材

电子技术

李少纲 薛毓强 ◎ 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”规划教材

电子技术

李少纲 薛毓强 编
蔡金锭 主审

机械工业出版社

本书内容包括：半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、正弦波振荡电路、直流稳压电源、数字电路基础、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、模拟信号和数字信号的转换、存储器与可编程逻辑器件等共 10 章。本书叙述简明、概念清楚、通俗易懂、重点突出、注重应用、习题丰富，书后附有习题参考答案。教学参考学时为 60 ~ 80，各校在教学时可根据专业实际情况适当取舍。

本书可供高等理工院校机械类、材料类、化工类、建筑类、经贸管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业教学使用，也可供高职院校相关专业选用和有关工程技术人员阅读。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 Edmond_Yan@sina.com 索取。
Edmond_Yan@hotmail.com

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术/李少纲, 薛毓强编. —北京: 机械工业出版社, 2009. 4
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978-7-111-26368-5

I. 电… II. ①李…②薛… III. 电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 023964 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 贡克勤 版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣
封面设计: 王伟光 责任印制: 邓 博
北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)
2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 15 印张 · 365 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-26368-5
定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379711
封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据教育部电工学课程教学指导小组拟定的“电子技术”课程教学基本要求和培养目标编写的，是机械工业出版社组织编写的“十一五”规划教材。“电子技术”是理工科高等院校非电类专业一门重要的基础课程，通过本课程的学习使学生掌握电子技术必要的基础理论、基本知识和基本技能，为学习后续课程、从事有关的工程技术和科学研究工作打好理论和实践基础。

为适应科学技术发展和教育教学改革的需要，编者根据自己多年的教学经验，总结和吸收了各院校教学和教学改革的有益经验，适度删减分立元件电路、模拟电路的内容，突出重点，增大数字电路的比重，注重介绍集成电路的特点和应用，积极引入工程实例，理论联系实际，突出应用特色，培养学生解决工程实际问题的能力。

全书共分10章，由福州大学李少纲、薛毓强编写，李少纲负责全书的组织、修改和定稿工作，刘伯恕协助校对。

本书由福州大学蔡金锭教授主审，并提出了许多宝贵的意见和建议。在编写过程中还得到福州大学电气工程学院领导和同事的大力支持，对此表示衷心的感谢。在此还要对本书引用的参考文献的作者表示感谢。

由于编者水平和时间所限，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 半导体器件 1

第一节 半导体基本知识 1

一、本征半导体 1

二、P 型半导体和 N 型半导体 1

三、PN 结及其单向导电性 2

第二节 二极管 3

一、基本结构 3

二、伏安特性 3

三、主要参数 4

第三节 特殊二极管 5

一、稳压管 5

二、发光二极管 6

三、光敏二极管 6

第四节 晶体管 7

一、基本结构 7

二、电流分配与放大原理 8

三、特性曲线 10

四、主要参数 12

五、光电晶体管和耦合器件 13

本章小结 14

习题一 14

第二章 基本放大电路 17

第一节 基本放大电路的组成及工作原理 17

一、共发射极放大电路的组成 17

二、放大电路的工作原理 18

第二节 放大电路的静态分析 19

一、直流通路估算法 19

二、图解法 19

第三节 放大电路的动态分析 20

一、微变等效电路法 21

二、图解法 25

第四节 静态工作点的稳定 27

一、静态工作点的漂移 27

二、分压式偏置电路 27

第五节 射极输出器 30

一、射极输出器的静态分析 30

二、射极输出器的动态分析 30

第六节 放大电路的频率特性 32

第七节 多级放大电路及其耦合方式 33

一、级间耦合方式 33

二、放大电路分析 34

第八节 放大电路中的负反馈 36

一、反馈的类型 36

二、反馈类型的判别 36

三、负反馈对放大电路性能的影响 38

第九节 差动放大电路 40

一、差动放大电路的工作原理 40

二、静态分析 42

三、动态分析 42

四、共模抑制比 44

第十节 互补对称功率放大电路 45

一、对功率放大电路的基本要求 45

二、无输出变压器 (OTL) 的互补对称放大电路 46

三、无输出电容 (OCL) 的互补对称放大电路 47

四、集成功率放大电路 47

第十一节 场效应晶体管及其放大电路 48

一、绝缘栅场效应晶体管 48

二、场效应晶体管放大电路 52

本章小结 54

习题二 55

第三章 集成运算放大器 61

第一节 集成运算放大器简介 61

一、集成运算放大器电路特点 61

二、集成运算放大器的符号、引脚 61

三、集成运算放大器的主要参数 62

四、理想运算放大器及其分析依据 62

第二节 集成运算放大器在运算方面的应用 64

一、比例运算 64

二、加法运算 66

三、减法运算 66

四、积分运算	67	四、开关型稳压电路	101
五、微分运算	68	第四节 晶闸管及可控整流电路	102
六、对数运算	68	一、晶闸管	102
七、指数运算	69	二、可控整流电路	105
第三节 集成运算放大器在测量技术中的		三、晶闸管的保护	109
应用	69	四、单结晶体管触发电路	110
一、电压源、电流源	69	本章小结	114
二、电压、电流的测量	70	习题五	114
三、测量放大器	70	第六章 数字电路基础	117
第四节 集成运算放大器在信号处理方面的		第一节 常用的数制和码制	117
应用	72	一、数制	117
一、有源滤波器	72	二、二十进制码	119
二、采样保持电路	75	第二节 脉冲信号	120
三、电压比较器	76	第三节 基本逻辑运算与复合逻辑函数	121
第五节 集成运算放大器实际使用中的一些		一、基本逻辑运算	121
问题	78	二、复合逻辑函数	123
一、调零	78	第四节 逻辑代数	124
二、保护	78	一、逻辑代数运算法则与定律	124
三、扩大输出电流	79	二、逻辑函数的表示方法	125
四、单电源供电	79	第五节 逻辑函数的化简	126
本章小结	80	一、逻辑函数的代数化简法	126
习题三	80	二、逻辑函数的卡诺图化简法	127
第四章 正弦波振荡电路	85	本章小结	131
第一节 自激振荡的基本原理	85	习题六	131
一、自激振荡的条件	85	第七章 门电路和组合逻辑电路	133
二、振荡的建立与稳定	86	第一节 分立元件门电路	133
第二节 RC 振荡电路	86	一、二极管“与”门电路	133
第三节 LC 振荡电路	87	二、二极管“或”门电路	134
本章小结	88	三、晶体管“非”门电路	134
习题四	88	第二节 TTL 集成门电路	135
第五章 直流稳压电源	90	一、TTL“与非”门电路	135
第一节 整流电路	90	二、三态输出 TTL“与非”门电路	138
一、单相半波整流电路	90	三、集电极开路的“与非”门电路	139
二、单相桥式整流电路	91	第三节 CMOS 集成门电路	140
三、三相桥式整流电路	93	一、CMOS“非”门电路	140
第二节 滤波电路	95	二、CMOS“与非”门电路	141
一、电容滤波电路	95	三、CMOS“或非”门电路	141
二、电感滤波电路	97	四、CMOS 传输门电路	141
三、 π 形滤波电路	97	五、三态输出 CMOS 门电路	142
第三节 稳压电路	98	第四节 集成逻辑门电路使用中的几个实际	
一、稳压管稳压电路	98	问题	142
二、串联型稳压电路	99	一、TTL 门电路与 CMOS 门电路的性能	
三、集成稳压电路	99	比较	142

二、门电路多余输入端的处理	143	一、R-2R 梯形电阻网络 D/A 转换器	196
三、CMOS 门电路与 TTL 门电路的连 接	143	二、D/A 转换器的主要参数	198
四、门电路驱动分立元件电路	144	三、集成 D/A 转换器	198
第五节 组合逻辑电路的分析与设计	144	第二节 模数转换器	200
一、组合逻辑电路的分析	144	一、逐次逼近型 A/D 转换器	201
二、组合逻辑电路的设计	146	二、双积分型 A/D 转换器	202
第六节 典型的集成组合逻辑电路	148	三、A/D 转换器的主要参数	204
一、加法器	148	本章小结	204
二、编码器	150	习题九	204
三、译码器和数字显示	153	第十章 存储器与可编程逻辑器件	206
四、数据分配器	158	第一节 只读存储器	206
五、数据选择器	158	一、固定只读存储器	206
本章小结	159	二、可编程序只读存储器	209
习题七	159	三、可改写只读存储器	209
第八章 触发器和时序逻辑电路	164	四、EPROM2716 简介	210
第一节 双稳态触发器	164	五、ROM 的应用	210
一、RS 触发器	164	第二节 随机存储器	211
二、JK 触发器	168	一、静态随机存储器	211
三、D 触发器	169	二、动态随机存储器	212
四、触发器逻辑功能的转换	170	三、存储器容量的扩展	212
第二节 寄存器	171	第三节 可编程逻辑器件	214
一、数码寄存器	172	一、可编程逻辑阵列	214
二、移位寄存器	172	二、可编程阵列逻辑	215
第三节 计数器	175	三、通用阵列逻辑	216
一、二进制计数器	175	本章小结	217
二、十进制计数器	179	习题十	217
三、任意进制计数器	182	附录	219
第四节 脉冲信号的产生与整形电路	184	附录 A 半导体分立器件型号命名法	219
一、555 定时器	184	附录 B 常用半导体分立器件参数	220
二、单稳态触发器	185	附录 C 半导体集成电路型号命名法	223
三、施密特触发器	188	附录 D 常用半导体集成电路参数	223
四、多谐振荡器	189	附录 E 常用门电路、触发器、计数器的 部分品种型号	224
本章小结	191	附录 F 几种常用集成电路图形符号 对照	225
习题八	191	部分习题答案	226
第九章 模拟信号和数字信号的转换 ...	196	参考文献	232
第一节 数模转换器	196		

第一章 半导体器件

半导体器件是构成各种电子电路最基本的元器件。学习电子技术，必须首先了解和掌握半导体器件的基本结构、工作原理、特性和参数。本章首先简单介绍半导体的特性、PN 结的单向导电性，然后讨论二极管、晶体管的特性及使用方法，为以后的学习打下基础。

第一节 半导体基本知识

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。

一、本征半导体

本征半导体就是完全纯净的、具有晶体结构的半导体。

常用的半导体材料是硅和锗，它们都是具有共价键结构的四价元素。纯净的半导体具有晶体结构，所有原子基本上整齐排列，所以半导体也称晶体。

在本征半导体中，每一个原子的 4 个外层价电子与周围 4 个原子的外层价电子相结合而形成共价键。当价电子获得一定的能量（温度升高或受光照）后，即可挣脱原子核的束缚而成为自由电子。价电子成为自由电子的同时，共价键中就留下一个空位，称为空穴。由于中性原子失去一个电子而带正电，因此，可以认为空穴是带正电的。自由电子和空穴总是成对出现的，称为电子空穴对。半导体中产生电子空穴对的过程称为本征激发。

自由电子带负电，空穴带正电，统称载流子。在外电场作用下，一方面自由电子逆着电场方向运动而形成电子电流；另一方面空穴顺着电场方向运动而形成空穴电流。这两个电流的实际方向是相同的，所以通过半导体的电流是自由电子和空穴两种载流子的运动形成的。这是半导体导电与金属导体导电机理上的本质区别。

半导体材料的导电能力在不同条件下有很大的差别，主要体现在以下几个方面。

1. 热敏性

环境温度对半导体的导电能力影响很大，温度升高，本征激发增强，产生的电子空穴对就增多，导电能力就增强。根据半导体材料的热敏特性，可制成热敏电阻和其他温度敏感元件。

2. 光敏性

一些半导体材料受到光照时，本征激发增强，导电能力亦随之增强。利用半导体的光敏性，可制成光敏电阻、光电二极管、光电晶体管等光敏器件。

3. 掺入杂质可改变半导体的导电性能

在半导体中掺入微量其他元素称作掺入杂质，简称掺杂。掺杂后半导体的导电能力将显著的提高。利用这种特性可制成各种不同用途的半导体器件，如二极管、晶体管、场效应晶体管及晶闸管等。

二、P 型半导体和 N 型半导体

1. P 型半导体

在纯净的半导体中掺入微量的三价元素，如硼元素，硼原子取代硅（或锗）原子的位置并与邻近硅（或锗）原子形成共价键时，因缺少一个电子而形成一个空位，相邻原子中的价电子很容易受到热或其他的激发填补这个空位，于是产生一个空穴，如图 1-1 所示。因此掺入三价元素的半导体，空穴的总数远大于自由电子，空穴成为多数载流子，自由电子成为少数载流子。这种半导体主要靠空穴导电，称为空穴型半导体，简称 P 型半导体。

2. N 型半导体

在纯净的半导体中掺入微量五价元素，如磷元素，在构成共价键结构中，由于存在多余的价电子，在常温下很容易成为自由电子，如图 1-2 所示。因此，掺入五价元素的半导体，自由电子的总数远大于空穴，自由电子成为多数载流子，空穴成为少数载流子。这种半导体主要靠自由电子导电，称为电子型半导体，简称 N 型半导体。

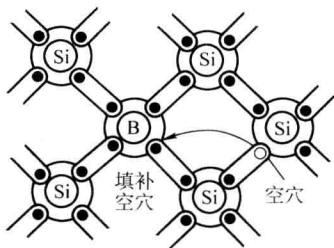


图 1-1 硅晶体中掺硼出现空穴

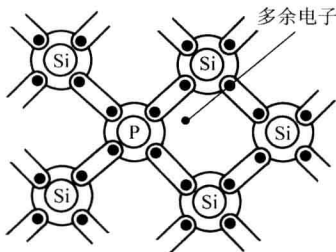


图 1-2 硅晶体中掺磷出现自由电子

在掺杂半导体中，虽然两种载流子的数目不等，但整块半导体中的正、负电荷仍相等保持电中性。

三、PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成

采用适当的工艺把 P 型半导体和 N 型半导体做在同一基片上，两种半导体之间便形成了一个交界面。由于交界面两侧存在着自由电子和空穴浓度的差异，N 型半导体中的自由电子向 P 型半导体中扩散，P 型半导体中的空穴向 N 型半导体中扩散，如图 1-3a 所示。多数载流子扩散到对方区域后被复合而消失，在交界面两侧分别留下了不能移动的正、负离子，呈现出一个空间电荷区，如图 1-3b 所示。这个空间电荷区就称作 PN 结。由于 PN 结在形成过程中载流子已复合耗尽，故又称为耗尽层。

PN 结的内电场，如图 1-3b 所示。内电场对多数载流子的扩散运动起着阻碍作用，但对少数载流子的运动起着推动作用。少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移运动。在无外电场作用的情况下，扩散运动和漂移运动达到动态平衡，PN 结的宽度保持一定，而处于稳定状态。

2. PN 结的单向导电性

(1) PN 结外加正向电压导通 当 PN 结的 P 区接电源正极，N 区接电源负极，即 PN 结处于正向偏置时，外加电场方向和内电场方向相反，使空间电荷区变窄，多数载流子的扩散运动大大超过了少数载流子的漂移运动，形成较大的扩散电流，如图 1-4 所示。这时 PN 结

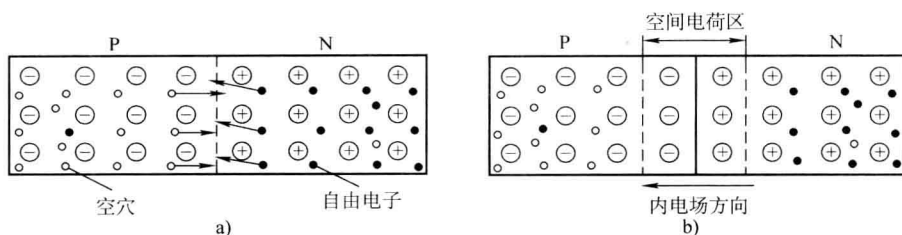


图 1-3 PN 结的形成

a) 多数载流子的扩散 b) 空间电荷区

处于正向导通状态，通过的正向电流较大，呈现正向电阻很小。

(2) PN 结外加反向电压截止 当 PN 结的 P 区接电源的负极，N 区接电源的正极，即 PN 结处于反向偏置时，外加电场方向与 PN 结内电场方向一致，使空间电荷区变宽，多数载流子的扩散难以进行，少数载流子的漂移运动则得到加强，从而形成反向漂移电流。由于少数载流子浓度极小，故反向电流很微弱，如图 1-5 所示。这时 PN 结处于反向截止状态，通过的电流很小，呈现反向电阻很大。

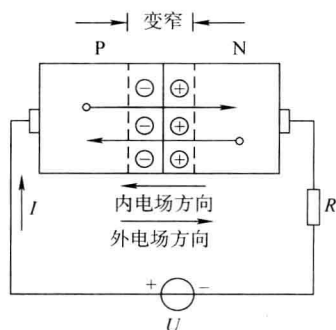


图 1-4 PN 结外加正向电压

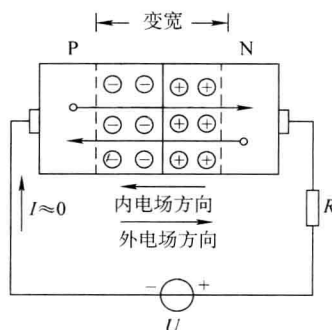


图 1-5 PN 结外加反向电压

第二节 二极管

一、基本结构

将 PN 结加上相应的电极引线和管壳，就成为二极管。按材料分，二极管可分为硅管和锗管；按用途分，二极管可分普通管、整流管、稳压管、开关管等；按结构分，二极管有点接触型和面接触型两类。点接触型二极管如图 1-6a 所示，PN 结结面积很小，结电容小，只能通过较小电流，但其高频性能好，故一般用于高频小功率的电路或数字电路中的开关元件。面接触型二极管如图 1-6b 所示，PN 结结面积大，结电容大，允许通过较大电流，但其工作频率较低，一般用于低频电路或整流电路。图 1-6c 是二极管的符号。

二、伏安特性

图 1-7 是二极管的伏安特性曲线。当二极管两端加正向电压很低时，正向电流很小，几乎为零。当正向电压超过一定数值后，电流增长很快。这一电压称为死区电压或开启电压，

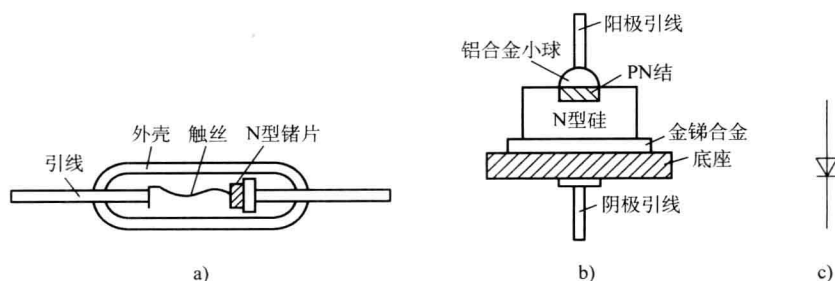


图 1-6 二极管

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 图形符号

其大小与材料及环境温度有关。通常，硅管的死区电压约为 0.5 V ，锗管约为 0.1 V 。导通时的正向压降，硅管约为 $0.6 \sim 0.8\text{ V}$ （通常取 0.7 V ），锗管约为 $0.2 \sim 0.3\text{ V}$ （通常取 0.3 V ）。

当二极管两端加反向电压时，形成很小的反向电流，但它随温度的上升增长很快。反向电压在某一范围内，反向电流的大小基本恒定，与反向电压的高低无关，故通常称它为反向饱和电流。而当外加反向电压超过某一定数值时，反向电流将突然增大，二极管失去单向导电性，这种现象称为反向击穿，所对应的电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。二极管被击穿后，一般不能恢复原来的单向导电性能。

三、主要参数

二极管的参数很多，主要参数如下：

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流是指二极管长时间工作时，允许流过的最大正向平均电流。实际工作中，二极管通过的电流应小于 I_{OM} ，如果超过此值，将因 PN 结过热而损坏管子。

2. 反向工作峰值电压 U_{RM}

U_{RM} 是保证二极管不被击穿而给出的反向峰值电压，一般是反向击穿电压 U_{BR} 的一半或三分之二。

3. 反向峰值电流 I_{RM}

I_{RM} 是指在室温下，二极管承受最高反向工作电压时的反向漏电流。其值越小，二极管的单向导电性越好。当温度升高时，反向电流会显著增加。

二极管的应用范围很广，主要用于整流、检波、限幅、元件保护以及在数字电路中作为开关元件等。

例 1-1 已知电路如图 1-8 所示， VD_A 和 VD_B 为硅二极管，若 $U_\text{A} = 3\text{ V}$ ， $U_\text{B} = 0\text{ V}$ 时，求输出端 F 的电压值 U_F 。

解 当两个二极管的阳极连在一起时，阴极电位低的二极管优先导通。即 VD_B 优先导通，由于硅管的正向压降为 0.7 V ，所以 $U_\text{F} = U_\text{B} + 0.7\text{ V} = 0.7\text{ V}$ 。 VD_B 导通后，使 VD_A 承受反向电压而截止。

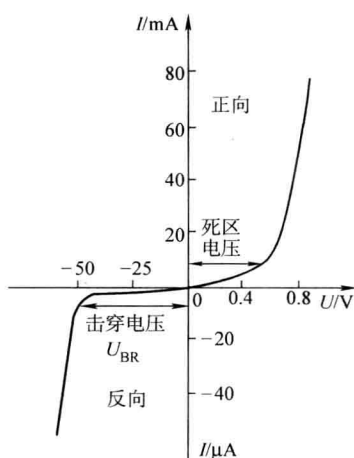


图 1-7 二极管的伏安特性曲线

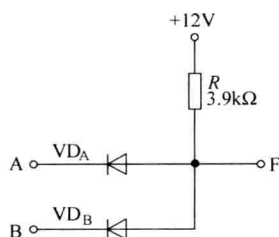


图 1-8 例 1-1 的电路

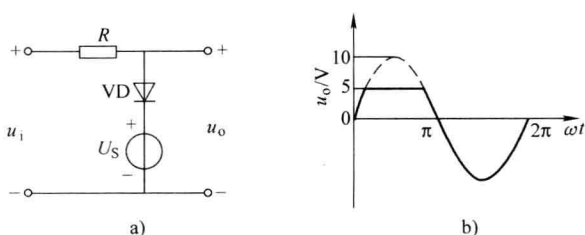


图 1-9 例 1-2 的图

a) 电路图 b) 波形图

例 1-2 电路如图 1-9a 所示, 已知电源电压 $U_s = 5\text{V}$, 输入信号 $u_i = 10\sin\omega t \text{ V}$, 设二极管为理想元件, 试画出输出电压 u_o 的波形。

解 理想二极管在正向导通时的压降近似为 0; 反向截止时的漏电流也近似为 0。所以, 当 $u_i > U_s$ 时二极管导通, 输出电压 $u_o = U_s = 5\text{V}$; 而当 $u_i < U_s$ 时, 二极管截止, 相当于开路, 输出电压 $u_o = u_i$ 。输出电压 u_o 的波形如图 1-9b 所示。

第三节 特殊二极管

一、稳压管

稳压管是一种特殊的面接触型半导体硅二极管, 其特性曲线与普通二极管相似, 如图 1-10a 所示。稳压管的符号如图 1-10b 所示。

稳压管工作在反向击穿区, 反向电流在很大范围内变化时, 稳压管两端电压变化很小, 因而能起稳压作用, 这时稳压管两端的电压 U_z 称为稳定电压。与稳压管稳压范围所对应的电流为 $I_{z\min} \sim I_{z\max}$, 如果工作电流小于 $I_{z\min}$, 则电压不能稳定, 若工作电流大于 $I_{z\max}$, 稳压管将因过热而损坏。

稳压管的主要参数:

1. 稳定电压 U_z

稳定电压是指稳压管工作在反向击穿区的稳定电压值。由于工艺方面和其他原因, 即使是同一型号的稳压管, 稳定电压值也有一定的分散性。例如 2CW59 稳压管的稳压值为 $10 \sim 11.8\text{V}$ 。

2. 稳定电流 I_z

稳定电流是指稳压管正常稳压时的一个参考电流值。稳压管的工作电流在 $I_{z\min} \sim I_{z\max}$ 范围内, 才能保证稳压管有较好的稳压性能, 本书中以后用 $I_{z\min}$ 表示稳定电流。

3. 动态电阻 r_z

在稳压范围内, 稳压管两端电压的变化量 ΔU_z 与对应的电流变化量 ΔI_z 之比称为动态电阻, 即

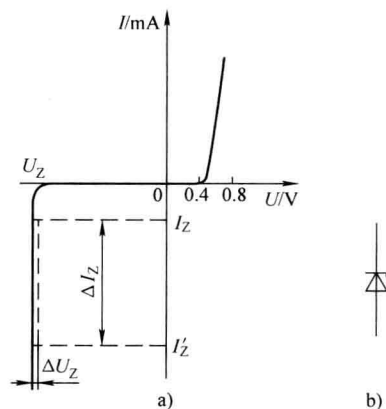


图 1-10 稳压管

a) 伏安特性曲线 b) 图形符号

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$$

(1-1)

稳压管的动态电阻越小，其稳压性能越好。

4. 最大耗散功率 P_{ZM}

P_{ZM} 是指管子不发生热击穿时所允许的最大功率损耗， $P_{ZM} = I_{Zmax} U_z$ 。

例 1-3 在图 1-11 中，稳压管 $U_z = 6V$ ， $P_{ZM} = 200mW$ ， $I_{Zmin} = 10mA$ ； $R = 1k\Omega$ 。问若电源 E 在 $18 \sim 30V$ 内变化时，输出电压 U_o 是否基本不变，稳压管是否安全？

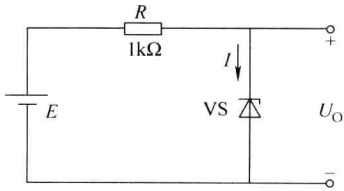


图 1-11 例 1-3 的图

解 稳压管最大稳定电流

$$I_{Zmax} = \frac{P_{ZM}}{U_z} = 33.3mA$$

当 $E = 18V$ 时

$$I = \frac{E - U_z}{R} = \left(\frac{18 - 6}{1} \right) mA = 12mA$$

当 $E = 30V$ 时

$$I = \frac{E - U_z}{R} = \left(\frac{30 - 6}{1} \right) mA = 24mA$$

显然， $I_{Zmin} < I < I_{Zmax}$ ，稳压管工作在稳压区，能正常稳压， $U_o = U_z = 6V$ 。

二、发光二极管

发光二极管，简称 LED (Light Emtting Diode)，通常用元素周期表中Ⅲ、V 族元素的化合物如砷化镓、磷化镓等制成。这种管子当通过正向电流时会发出可见光，这是由于电子与空穴直接复合释放出多余能量的结果。发光的颜色与所用的材料有关。发光二极管的符号和伏安特性如图 1-12 所示。发光二极管的死区电压比普通二极管高，正向工作电压约为 $1.5 \sim 2.5V$ ，发光强度与正向电流大小成正比，正向工作电流一般为几毫安到几十毫安之间。发光二极管除单个使用外，常做成七段数码管或矩阵式大屏幕显示器。

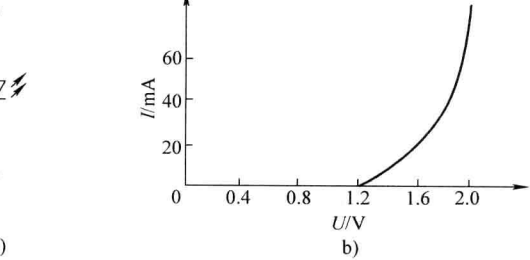


图 1-12 发光二极管
a) 图形符号 b) 伏安特性曲线

三、光敏二极管

光敏二极管是一种将光能转换为电能的半导体器件，其结构与普通二极管相似，只是管壳上留有一个能入射光线的窗口，以便于光线射入。其外形、符号和特性曲线如图 1-13 所示。

光敏二极管是在反向电压作用下工作的。当无光照时，和普通二极管一样，其反向电流很小（一般小于 $0.1\mu A$ ），该电流称为暗电流。当有光照时，受激发的载流子通过外电路形成较大的反向电流，该电流称为光电流，其数值会随光照强度 E 的增加而增大，此外还与入射光的波长有关。光电流很小，一般只有几十微安，应用时需进行放大。常用的光敏二极管有 2AU、2CU 等系列。

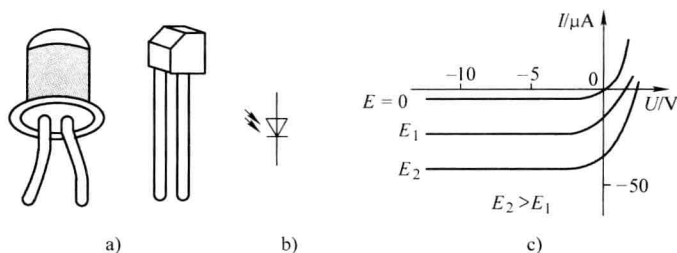


图 1-13 光敏二极管

a) 外形 b) 图形符号 c) 伏安特性曲线

第四节 晶体管

晶体管又称三极管。在这种管子中，空穴和自由电子两种载流子都参与导电过程，所以又称双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor, BJT）。晶体管按工作频率分为高频管和低频管；按半导体材料分为硅管和锗管。为了更好地理解和熟悉晶体管的特性，首先介绍晶体管的基本结构和载流子的运动规律。

一、基本结构

晶体管由两个 PN 结构成，它分为 PNP 型和 NPN 型两大类，其结构示意图和符号如图 1-14 所示。在晶体管符号中，箭头表示发射结正向导电时的电流方向。

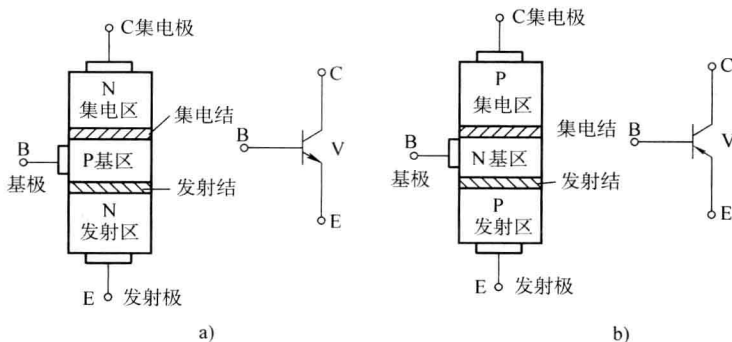


图 1-14 晶体管的结构示意图和图形符号

a) NPN 型 b) PNP 型

晶体管内部结构分为发射区、基区和集电区，由各区引出的电极分别称为发射极 E、基极 B 和集电极 C。发射区与基区交界处的 PN 结称为发射结，集电区与基区交界处的 PN 结称为集电结。具有电流放大作用的晶体管在结构上具有以下特性：

- 1) 发射区的掺杂浓度远大于基区和集电区的掺杂浓度，其作用是向基区扩散多数载流子。
- 2) 基区很薄且掺杂浓度很小，其作用是控制由发射区扩散到集电区的载流子数。
- 3) 集电区的作用是收集由发射区扩散过来的载流子，为了便于收集载流子和散热，集电结的面积较大。

以上这些特点是晶体管实现电流放大的内部条件。

二、电流分配与放大原理

1. 晶体管的工作原理

晶体管要实现电流放大，除了满足内部条件之外，还必须满足一定的外部条件：发射结必须加正向偏置电压，以利于发射区多数载流子向基区扩散；集电结必须加反向偏置电压，以利于基区少数载流子被拉到集电区。图 1-15a 是 NPN 型晶体管一种常见的偏置电路，图中 E_B 使晶体管的发射结正向偏置，为了使集电结反偏，必须使 $E_C > E_B$ ， R_C 称为集电极电阻， R_B 称为基极电阻。流过发射极的电流称为发射极电流，用 I_E 表示；流过基极的电流称为基极电流，用 I_B 表示；流过集电极的电流称为集电极电流，用 I_C 表示。图 1-15b 是 PNP 型晶体管电路，与 NPN 型不同之处在于电源极性和电流方向正好相反，工作原理基本一致。下面以 NPN 型晶体管为例进行分析讨论。

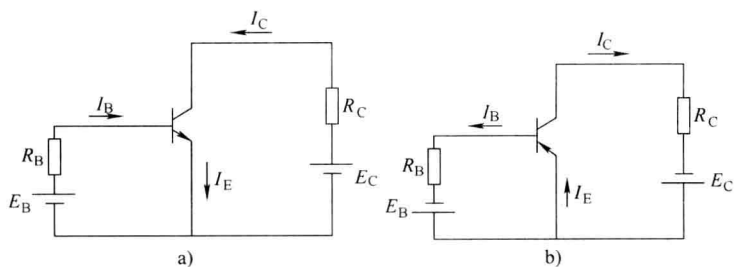


图 1-15 晶体管共射偏置电路 ($E_C > E_B$)

a) NPN 管共射电路 b) PNP 管共射电路

图 1-15 中，由 R_B 、 E_B 组成的电路接在晶体管的 B、E 两端，称为输入回路；由 R_C 、 E_C 组成的电路接在晶体管的 C、E 两端，称为输出回路。发射极是输入回路和输出回路的公共端，因此这种电路称为共发射极电路，简称为共射电路。

2. 晶体管内部载流子的传输过程

(1) 发射区向基区扩散自由电子 在图 1-16 中，由于发射结正偏，发射结的内电场被削弱，有利于该结两边多数载流子的扩散。因此发射区的自由电子不断扩散到基区，形成发射极电流 I_E ，其方向与自由电子运动方向相反，如图 1-16 所示。与此同时，基区的空穴也向发射区扩散，但是由于基区掺杂浓度很低，所以空穴电流很小，与自由电子电流相比可以忽略不计（图中未画出）。

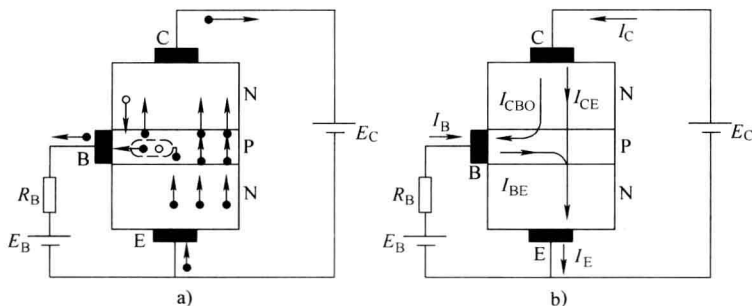


图 1-16 晶体管内部载流子的运动规律和电流分配

(2) 自由电子在基区的扩散与复合 从发射区扩散到基区的自由电子起初集聚在发射结

附近,即靠近发射结区域的自由电子浓度最高,靠近集电结区域的自由电子浓度最低,形成了浓度差,于是自由电子将在基区内不断地向集电结扩散,在扩散过程中,自由电子不断与基区中的空穴相遇而复合。由于基区做得很薄,且掺杂很少,因此,被复合的自由电子数量极少,绝大部分自由电子将扩散到达集电结。由于基区接电源 E_B 的正极,所以电源 E_B 不断从基区拉走价电子,这相当于不断向基区补充空穴,形成电流 I_{BE} ,它基本等于基极电流 I_B 。

(3) 集电区收集从基区扩散过来的自由电子 由于集电结处于反向偏置,其内电场被加强,有利于集电结两边半导体中少数载流子的漂移运动。从发射区扩散到基区的自由电子在集电结电场的作用下漂移到集电区,为集电极所收集,从而形成集电极电流 I_{CE} ,它基本等于集电极电流 I_C 。

(4) 集电结的反向饱和电流 在集电结内电场作用下,少数载流子,即基区中的自由电子和集电区的空穴,将漂移过集电结而形成反向漂移电流 I_{CBO} ,称为集电极和基极间反向饱和电流。这个电流的数值很小,但受温度影响较大,温度每升高 10°C , I_{CBO} 约增加一倍。 I_{CBO} 与外加电压的大小关系不大。

3. 晶体管电流的分配关系

如上所述,从发射区扩散到基区的自由电子只有很小一部分在基区复合,绝大部分漂移到集电区。因此发射极电流 I_E 中, I_{BE} 部分很小, I_{CE} 部分所占的比例很大,令

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (1-2)$$

$\bar{\beta}$ 称为共发射极直流电流放大系数。温度升高,载流子在基区的扩散速度加快,复合的几率相对减小,因而电流放大系数增大。温度每升高 1°C 时,电流放大系数约增加 $0.5\% \sim 1\%$ 。

由图 1-16 可知, $I_C = I_{CE} + I_{CBO}$, $I_{BE} = I_B + I_{CBO}$, 从而

$$I_C = \bar{\beta} (I_B + I_{CBO}) + I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \quad (1-3)$$

依 KCL 定律可得

$$I_E = I_C + I_B \quad (1-4)$$

由式 (1-3)、式 (1-4) 可知,当基极开路 ($I_B = 0$) 时,集电极电流 (等于发射极电流) 就是 $(1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$, 令

$$I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \quad (1-5)$$

I_{CEO} 称为集电极与发射极间的反向饱和电流,也称为集电极发射极间的穿透电流。通常 I_{CEO} 很小,故

$$I_C \approx \bar{\beta} I_B \quad (1-6)$$

$$I_E \approx (1 + \bar{\beta}) I_B \quad (1-7)$$

式 (1-6) 表明,晶体管的集电极电流 I_C 受控于其基极电流 I_B ,用较小的基极电流可以控制较大的集电极电流,这就是晶体管的电流放大作用。

4. 晶体管的放大作用

晶体管的主要用途之一是放大信号,一个简单的放大原理电路如图 1-17 所示。在输入回路中加入交流小信号 u_i ,发射结电压在原值 U_{BE} (硅管约为 0.7V ,锗管约为 0.3V) 的基

基础上增加了 ΔU_{BE} , 于是 U_{BE} 的微小变化会引起基极电流 I_B 产生相应的变化量 ΔI_B , 而 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ 变化更大, 若 β 、 R_C 足够大, 则可在 R_C 上得到比输入信号 u_i 大许多倍的交流输出电压 $u_o = -R_C \Delta I_C$, 也就是说对输入信号电压进行了放大。

晶体管的放大作用有以下的含义:

1) 输出电流变化量 ΔI_C 比输入电流变化量 ΔI_B 大 β 倍, 可得到电流放大。

2) 输出信号电压 $|u_o| = |\Delta I_C| R_C > |u_i|$, 可得到电压放大。

3) 输出信号功率 $P_o = |u_o \Delta I_C|$ 大于输入信号功率 $P_i = |u_i \Delta I_B|$ 。

需要指出的是功率放大不是反映能量放大, 输出信号功率不是由输入端信号源提供, 而是由输出回路的直流电源提供的。晶体管放大作用的本质是用小信号去控制大信号, 用小功率控制大功率, 以在输出端获得能量较大的信号。

三、特性曲线

晶体管特性曲线是表示晶体管各极间电压和电流之间的关系曲线, 最常用的是共发射极接法时的输入、输出特性曲线。这些特性曲线可用晶体管特性图示仪直观地显示出来, 也可以通过实验电路进行测绘。

1. 输入特性曲线

输入特性是指当晶体管集电极与发射极间电压 U_{CE} 保持不变时, 基极电流 I_B 与基射极之间电压 U_{BE} 的关系, 即

$$I_B = f(U_{BE}) \mid U_{CE} = \text{常数}$$

图 1-18 给出了 NPN 型硅晶体管 3DG100 的输入特性曲线。由图可见:

1) 当 $U_{CE} = 0V$ 时, B、E 之间发射结和集电结并联, 此时的输入特性曲线与二极管的正向伏安特性曲线相似。

2) 当 $U_{CE} > 0V$ 时, 输入曲线将向右移, 即在 U_{BE} 一定时, I_B 将随着 U_{CE} 的增加而减小。这是由于 U_{BE} 一定, 从发射区扩散到基区的电子数一定, 当 U_{CE} 增加, 即集电结反向电压增加, 使得从发射区扩散到基区的电子更多地漂移到集电区, 因而 I_B 减小。

实际上, 当 $U_{CE} \geq 1V$ 时, 集电结的内电场已足够强, 可以把从发射区扩散到基区的绝大部分电子吸引到集电极来, U_{CE} 的变化对 I_B 的影响很小。即当 $U_{CE} \geq 1V$ 以后的输入特性曲线几乎是重合的, 所以, 通常只画出 $U_{CE} \geq 1V$ 时的一条输入特性曲线。

由图 1-18 可知, 晶体管的输入特性有一段死区, 只有在发射结外加电压大于死区电压时, 晶体管才会导通出现 I_B 电流。硅管的死区电压约为 $0.5V$, 锗管的死区电压约为 $0.1V$ 左右。在正常工作状态下, 硅管的发射结电压约为 $0.7V$, 锗管的发射结电压约为 $0.3V$ 。

对应同样的 I_B , 温度升高后, 发射结正向压降将减小, 温度每升高 $1^\circ C$, U_{BE} 下降约 $2 \sim 2.5mV$ 。

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指当基极电流 I_B 为常数时, 输出电路集电极电流 I_C 与集射极电压 U_{CE} 之间的关系, 即

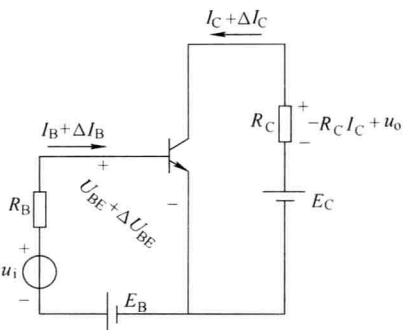


图 1-17 晶体管放大作用原理电路