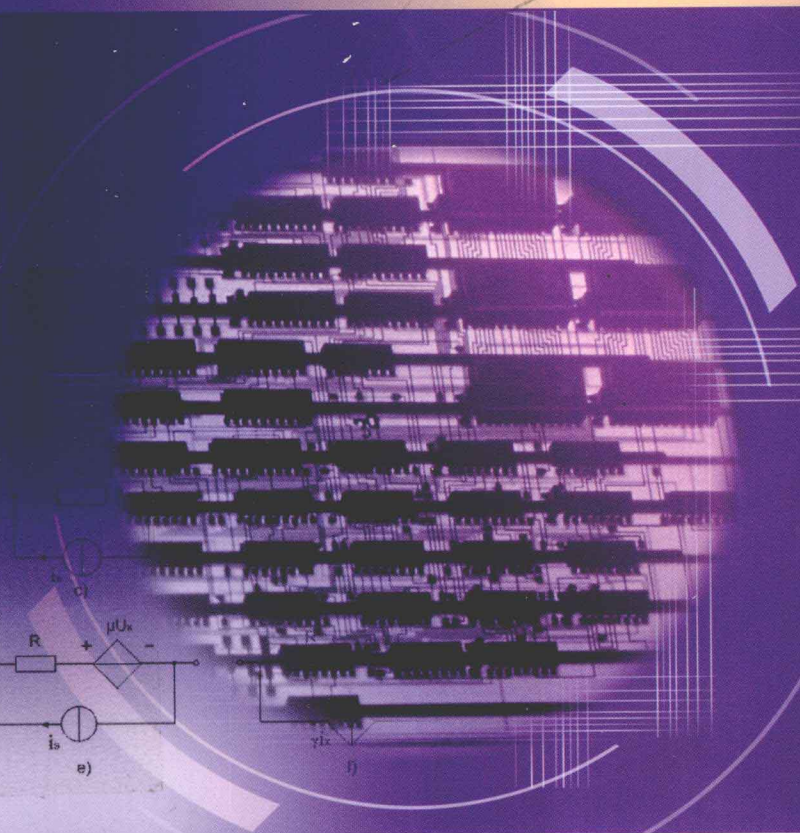




普通高等教育“十二五”规划教材 电工学系列教材

电子技术

肖军 孟令军 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材
电 工 学 系 列 教 材

电 子 技 术

主 编	肖 军	孟令军	
参 编	李 丹	刘晓志	吴春俐
	李世平	孙 静	佘黎煌
主 审	宋君烈		

机 械 工 业 出 版 社

全书共分9章,主要内容有:半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、运算放大器、信号产生电路、整流电路和直流稳压电源、晶闸管及其应用、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路。各章后有相应的习题。

本书内容全面,涵盖了电子技术的基本知识和电子新技术的应用内容。本书适用面广,可作为高等工科院校非电类各专业本科生电子技术基础课程的教材,也可作为高职高专相关专业的教材,还可供有关工程技术人员学习和参考。

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 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/肖军,孟令军主编. —北京:机械工业出版社,
2011.11

普通高等教育“十二五”规划教材. 电工学系列教材
ISBN 978-7-111-36237-1

I. ①电… II. ①肖… ②孟… III. ①电子技术—高等学校—
教材 IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第215799号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:徐凡 责任编辑:徐凡 韩静

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·13.25印张·326千字

标准书号:ISBN 978-7-111-36237-1

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

电工学课程是高等学校非电类专业本科生必修的一门重要的专业技术基础课，是一门体系严谨、理论性和实践性都很强的课程。随着科学技术的发展，各专业对电工学课程提出了越来越高的要求。本书从适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求出发，从体系结构及内容的安排上进行了科学规划和调整，体现了电子类教材要与国际接轨，要面向世界、面向未来的办学指导思想，使得教材内容更加丰富，安排更加合理，以帮助读者深入地理解和更好地掌握书中有关电子技术的基本概念、分析方法和设计方法，也有利于读者自学。

学生通过对本课程的学习，可以获得电子技术必要的基本知识、基本理论和基本技能，了解电子技术发展的概况，并为今后学习和从事与本课程相关的科学研究工作打下一定的理论基础与实践基础。

本书作者都是一线教师，有多年的电子技术课程教学经验。本书是依据教育部电子电气基础课程教学指导分委员会制定的电工学（电子技术）课程的基本要求，结合高等院校本科学生的实际情况而编写的。在编写过程中，我们力图把内容的重点放在培养学生分析问题、解决问题和创新能力上，对于基本概念、基本理论、工作原理、分析方法等都作了必要的阐述和解释，并通过实例及例题从理论上和实际应用上加以说明，使学生对所学理论能更好地理解和掌握。

参加本书编写工作的有肖军、孟令军、李丹、刘晓志、吴春俐、李世平、孙静、余黎煌等。肖军、孟令军任主编。本书承蒙东北大学宋君烈教授仔细审阅，提出了许多宝贵意见和建议，在此表示衷心的感谢。

本书可与张石、刘晓志主编的《电工技术》一书配套使用，也可以单独使用。

由于水平有限，书中仍难免出现不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 半导体器件 1

1.1 半导体基础知识 1

1.1.1 本征半导体 1

1.1.2 N型半导体和P型半导体 2

1.2 PN结的形成及其单向导电性 3

1.2.1 PN结的形成 3

1.2.2 PN结的单向导电性 4

1.3 半导体二极管 5

1.3.1 基本结构 5

1.3.2 伏安特性 6

1.3.3 主要参数 7

1.4 稳压二极管 7

1.4.1 伏安特性 7

1.4.2 主要参数 8

1.5 双极型晶体管 8

1.5.1 双极型晶体管的基本结构 8

1.5.2 晶体管的电流放大原理 9

1.5.3 晶体管的特性曲线 11

1.5.4 晶体管的主要参数 13

1.6 场效应晶体管 15

1.6.1 绝缘栅场效应晶体管的结构及工作原理 15

1.6.2 转移特性和输出特性 16

1.6.3 主要参数 16

习题 17

第2章 基本放大电路 20

2.1 交流放大电路的主要技术指标 20

2.2 共发射极放大电路 21

2.2.1 共发射极放大电路的组成 21

2.2.2 共发射极放大电路的工作原理 22

2.2.3 共发射极放大电路的静态分析 23

2.2.4 共发射极放大电路的动态分析 25

2.3 静态工作点的稳定 30

2.3.1 温度对静态工作点的影响 30

2.3.2 分压式共发射极偏置电路 31

2.4 单级放大电路的频率特性 33

2.5 放大电路中的负反馈 35

2.5.1 反馈的基本概念 35

2.5.2 反馈性质的分析 36

2.5.3 电压串联负反馈放大电路——射极输出器 39

2.6 场效应晶体管放大电路 42

2.6.1 场效应晶体管放大电路的静态偏置方式 42

2.6.2 场效应晶体管放大电路的动态分析 42

习题 43

第3章 多级放大电路 47

3.1 阻容耦合多级放大电路 47

3.2 直接耦合多级放大电路 49

3.2.1 静态工作点的设置 49

3.2.2 零点漂移 50

3.3 差动放大电路 50

3.3.1 静态分析与零点漂移的抑制 51

3.3.2 动态分析 51

3.3.3 典型差动放大电路 53

3.3.4 具有恒流源的差动放大电路 56

3.4 功率放大电路 56

3.4.1 对功率放大电路的基本要求 57

3.4.2 互补对称式功率放大电路 58

3.4.3 功率放大电路的输出功率和效率 59

3.4.4 集成功率放大器 60

习题 62

第4章 运算放大器 64

4.1 集成运算放大器 64

4.1.1 集成电路概述 64

4.1.2 集成运算放大器的电路组成 64

4.1.3 主要技术指标 67

4.2 理想运算放大器 69

4.2.1 图形符号 69

4.2.2 运算放大器的电压传输特性和 工作区域	69	6.4.2 简单串联式稳压电路	104
4.3 运算放大器应用电路中的 反馈	70	6.5 集成稳压电源	104
4.3.1 有无反馈的判断	70	习题	106
4.3.2 交流反馈和直流反馈的判断	71	第7章 晶闸管及其应用	109
4.3.3 正负反馈的判断	71	7.1 晶闸管	109
4.3.4 反馈类型的判断	71	7.1.1 晶闸管的导电特性及工作原理	109
4.4 基本运算电路	72	7.1.2 晶闸管的工作原理	110
4.4.1 比例运算电路	72	7.1.3 晶闸管的伏安特性与主要参数	111
4.4.2 求和运算电路	75	7.2 晶闸管整流电路	113
4.4.3 积分运算电路	77	7.2.1 单相半波可控整流电路	113
4.4.4 微分运算电路	78	7.2.2 单相半控桥式整流电路	115
4.5 运算放大器在信号处理方面的 应用	80	7.3 逆变电路	117
4.5.1 电压比较器	80	7.3.1 无源逆变	117
4.5.2 有源滤波器	81	7.3.2 有源逆变	117
习题	82	7.3.3 交流变换电路	118
第5章 信号产生电路	85	7.4 触发电路	119
5.1 自激振荡	85	7.4.1 TCA785 工作原理	119
5.1.1 自激振荡条件	85	7.4.2 TCA785 组成的触发电路	121
5.1.2 自激振荡建立过程	86	7.5 晶闸管的保护	122
5.2 正弦波振荡电路	86	7.5.1 晶闸管的过电流保护	122
5.2.1 RC 正弦波振荡器	86	7.5.2 晶闸管的过电压保护	123
5.2.2 LC 正弦波振荡器	88	7.6 晶闸管控制系统	123
5.2.3 石英晶体振荡器	90	7.6.1 晶闸管开环控制系统	123
5.3 非正弦波信号产生电路	92	7.6.2 晶闸管闭环控制系统	124
5.3.1 方波发生器	92	7.6.3 晶闸管调速系统应用举例	125
5.3.2 三角波发生器	92	习题	126
习题	93	第8章 门电路和组合逻辑电路	127
第6章 整流电路和直流稳压电源	95	8.1 引言	127
6.1 整流电路	95	8.2 基本门电路	128
6.1.1 单相半波整流电路	95	8.2.1 逻辑与	128
6.1.2 单相桥式整流电路	96	8.2.2 逻辑或	129
6.2 滤波电路	98	8.2.3 逻辑非	130
6.2.1 电容滤波电路	99	8.2.4 复合运算	131
6.2.2 电感滤波电路	100	8.3 数字集成逻辑电路	133
6.2.3 π 形滤波电路	101	8.3.1 TTL 与非门电路	133
6.3 简单稳压电路	101	8.3.2 CMOS 逻辑门电路	139
6.4 串联式稳压电路	103	8.3.3 TTL 与 CMOS 电路的连接	141
6.4.1 串联晶体管的调整作用	103	8.4 逻辑函数及其化简	142
		8.4.1 逻辑代数运算规则	142
		8.4.2 逻辑函数的表示方法	143
		8.4.3 逻辑函数的化简	144

8.5 组合逻辑电路	148	9.3.2 移位寄存器(串行输入、串行或 并行输出)	168
8.5.1 组合逻辑电路的分析	148	9.4 计数器	169
8.5.2 组合逻辑电路的设计	149	9.4.1 二进制计数器	169
8.6 组合逻辑电路应用	151	9.4.2 十进制计数器	171
8.6.1 加法器	151	9.5 数字电路应用	176
8.6.2 编码器	153	9.5.1 脉冲波形的产生和整形	176
8.6.3 译码器	155	9.5.2 555 集成定时器	181
习题	158	9.6 模拟量和数字量的转换	184
第9章 触发器和时序逻辑电路	161	9.6.1 数/模(D/A)转换器	184
9.1 双稳态触发器	161	9.6.2 模/数(A/D)转换器	186
9.1.1 基本 RS 触发器	161	9.7 可编程序逻辑器件简介	188
9.1.2 同步 RS 触发器	162	9.7.1 可编程序逻辑器件的发展	189
9.1.3 主从 JK 触发器	163	9.7.2 PLD 的逻辑表示	189
9.1.4 维持阻塞 D 触发器	164	9.7.3 简单 PLD 器件	194
9.1.5 触发器逻辑功能的转换	165	9.7.4 复杂 PLD 器件	200
9.2 时序逻辑电路分析	166	习题	202
9.3 寄存器	167	参考文献	205
9.3.1 并行寄存器	168		

第 1 章 半导体器件

半导体器件是用半导体材料制成的电子元器件。随着电子技术的飞速发展，各种新型半导体器件层出不穷。半导体器件是组成各种电子电路的核心器件，本章将主要介绍最常用的半导体器件——二极管、双极型晶体管和场效应晶体管的基本结构、工作原理、特性及主要参数。

1.1 半导体基础知识

所谓半导体，顾名思义，就是其导电能力介于导体和绝缘体之间，如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。半导体的导电能力在不同的条件下有很大的差别。有的半导体对温度很敏感，可以做成热敏元件；有的半导体对光照很敏感，可以做成光敏元件。而在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质后，它的导电能力会大大增强，可增加几万、几十万甚至上百万倍。利用这一特性可以做成各种半导体器件，如二极管、双极型晶体管、场效应晶体管等。半导体的这些导电特性是由半导体材料的原子结构和原子之间的结合方式决定的。下面首先介绍半导体物质的内部结构和导电机理。

1.1.1 本征半导体

在制造半导体器件时应用最多的材料是硅和锗，它们的原子最外层有四个电子，是四价元素。最外层电子受原子核束缚力最小，称为价电子。物质的化学性质是由价电子数决定的，半导体的导电性质也与价电子有关。

将锗和硅材料提纯并形成单晶体后，锗和硅原子排列很整齐，每个原子的价电子受到相邻原子的影响而使价电子为两个原子所共有，每个原子与周围相邻的四个原子组成共价键结构，如图 1-1 所示。

这种完全纯净、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。它是相对于杂质半导体而言的。

本征半导体共价键结构中的电子受到两个原子核的吸引而被束缚。他们不像导体中的价电子那么自由，但也不像绝缘体中的电子被束缚得那样紧。因此，在室温下，由于热激发，会使少量价电子获得足够能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子，同时在原来的位置上留下一个空位，称为空穴，如图 1-2 所示。这种现象称为本征激发。本征半导体中，每有一个被束缚的电子变为自由电子，必然同时出现一个空穴，即自由电子和空穴总是成对出现的。

由于空穴是共价键失去电子之后出现的，因

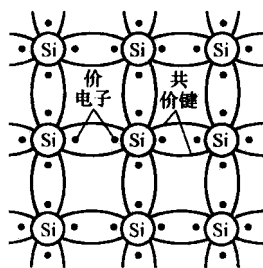


图 1-1 单晶硅的原子结构示意图

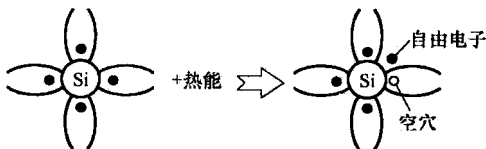


图 1-2 热激励产生的电子空穴对

此空穴带正电。一个共价键中出现了空穴，可以吸引附近共价键中的价电子来填补这个空穴。这时失去了价电子的邻近共价键中又出现空穴，它也可以再由其相邻共价键中的价电子来填充。如此进行下去，就相当于空穴在移动。因此，在半导体两端外加电压时，会出现两部分电流：一部分是带负电的自由电子定向移动形成的电子电流；另一部分是价电子填补空穴所形成的空穴电流。因此，电子和空穴统称为半导体中的载流子。在半导体中，电子与空穴同时参与导电，半导体中的电流是电子流与空穴流的总和，这就是半导体与金属在导电机理上的本质差别。

自由电子填补空穴的过程称为复合。在半导体中激发和复合总是不断地进行，在一定温度下，激发和复合达到动态平衡，电子空穴对的数目保持一定。温度越高，电子空穴对数量越多，半导体导电能力越强。所以，温度是影响半导体导电性能的一个很重要的外部因素。

1.1.2 N 型半导体和 P 型半导体

室温下，本征半导体有自由电子和空穴两种载流子，但由于数量极少，导电能力很弱。如果在其中掺入微量有用的杂质（某种元素），就会使掺杂后的半导体（杂质半导体）的导电能力显著增强。因所掺入的杂质不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

(1) N 型半导体

如果在四价的硅（或锗）晶体中掺入少量五价元素磷（P），晶体点阵中磷原子就会占据某些硅原子原来的位置，则在磷原子同周围四个硅（Si）原子组成的共价键结构中，只需外层四个价电子，多余的第五个价电子因不受共价键的束缚，很容易挣脱原子核的吸引而成为自由电子，如图 1-3 所示。于是自由电子数目大量增加，自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式，因此称为电子型半导体，又称 N 型半导体。N 型半导体中，由于自由电子数远大于空穴数，因此自由电子是多数载流子（简称多子），空穴是少数载流子（简称少子）。

在 N 型半导体中，由于磷原子是施放电子的，故称磷为施主杂质，如图 1-4 所示。

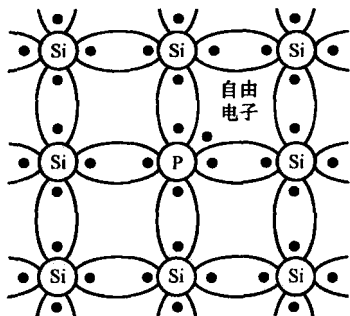


图 1-3 N 型半导体的晶体结构

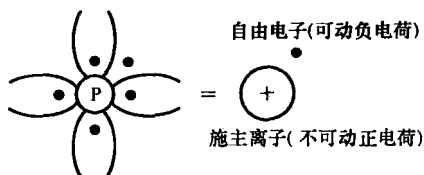


图 1-4 杂质半导体中的施主原子

(2) P 型半导体

若在硅（或锗）晶体中掺入微量三价元素硼（B），硼原子只有三个价电子，因而在组成共价键结构时，因缺少一个价电子而出现空穴，如图 1-5 所示。于是空穴数量大量增加，空穴导电成为这种半导体的主要导电方式，因此称为空穴型半导体，又称 P 型半导体。P 型半导体中，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。由于硼原子是接受电子的，故称为

受主杂质，其结构如图 1-6 所示。

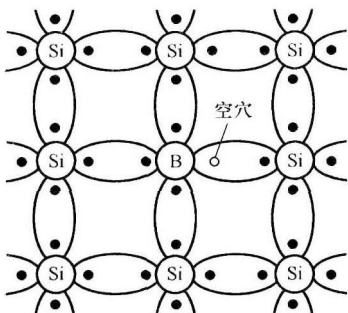


图 1-5 P 型半导体的晶体结构

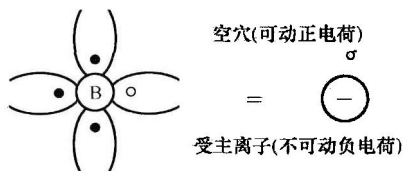


图 1-6 杂质半导体中的受主原子

应当指出，无论是 N 型半导体还是 P 型半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但整个晶体仍然是中性的。

1.2 PN 结的形成及其单向导电性

N 型半导体和 P 型半导体导电能力比本征半导体增强了很多，但不能直接用来制造半导体器件。通常采用一定的掺杂工艺，在一块晶片的两边掺入不同的杂质，分别形成 P 型半导体和 N 型半导体，则在它们的交界面处就会形成一个 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。下面首先介绍 PN 结的形成及其导电特性。

1.2.1 PN 结的形成

掺杂工艺完成后，晶片两边形成 P 型半导体和 N 型半导体。由于 N 型半导体多数载流子为自由电子，少数载流子为空穴，而 P 型半导体多数载流子为空穴，少数载流子为电子。多数载流子由于浓度的差异而产生扩散运动。空穴要从浓度高的 P 区向 N 区扩散，并与 N 区的电子复合；电子要从浓度高的 N 区向 P 区扩散，并与 P 区的空穴复合，如图 1-7a 所示。

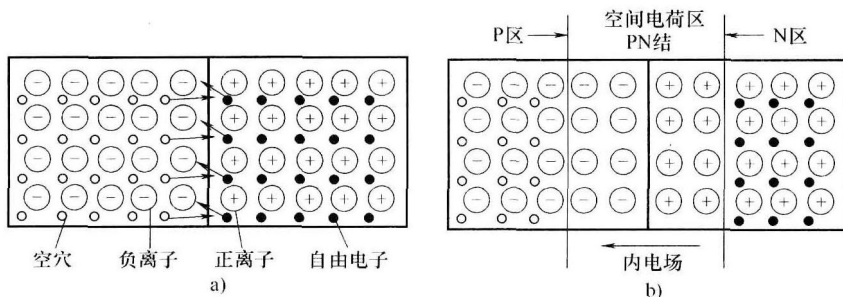


图 1-7 PN 结的形成

扩散使得 P 区和 N 区分别因失去空穴和电子而在交界面处 P 区一边留下了带负电的杂质离子（受主离子）和在 N 区一边留下了带正电的杂质离子（施主离子），如图 1-7b 所示。半导体中的杂质离子虽然也带电，但它们不能移动，因此并不参与导电。所以在交界面

附近形成了一个很薄的空间电荷区,这个空间电荷区就是PN结。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方区域并被复合掉了,或者说消耗尽了,因此又称为耗尽层,它的电阻率很高。

正、负离子在空间电荷区形成一个电场,称为内电场,其方向是从带正电的N区指向带负电的P区。由于内电场对多数载流子的扩散起阻碍作用,所以空间电荷区又称阻挡层。

内电场阻碍多数载流子的扩散运动,但对少数载流子越过空间电荷区进入对方区域起着推动作用。这种少数载流子在电场作用下有规则的运动称为漂移运动。漂移运动使交界面两侧P区和N区由于扩散运动而失去的空穴和电子得到一些补充,其作用与扩散运动相反。

由此可见,PN结的形成过程中存在着两种运动:一种是多数载流子因浓度差而产生的扩散运动,另一种是少数载流子在内电场作用下产生的漂移运动。这两种运动相互制约,在一定条件下,多数载流子的扩散运动减弱,而少数载流子的漂移运动加强,最后扩散运动和漂移运动达到动态平衡,形成了稳定的PN结。

1.2.2 PN结的单向导电性

PN结在没有外加电压时,其中的扩散运动和漂移运动处于动平衡状态。下面讨论在PN结上加外部电压时的情况。

(1) PN结外加正向电压

如果在PN结上加正向电压,即外电源正极接PN结P区,外电源负极接PN结N区,如图1-8a所示。PN结外加正向电压,又叫正向偏置。PN结外加正向电压时,外电场与内电场方向相反,从而削弱了内电场,多数载流子的扩散运动显著增强。扩散运动和漂移运动的动平衡状态被破坏,P区的空穴和N区的电子,在外加电压驱使下,可以越过PN结向对方区域扩散。从N区扩散到空间电荷区的电子和从P区扩散到空间电荷区的空穴,抵消一部分空间电荷的作用,于是空间电荷区变窄,形成较大的扩散电流。此电流通过PN结的方向是从电源的正极,经P区和N区回到电源负极,称为正向电流 I_F ,PN结处于导通状态,此时的电阻称为正向电阻,它的数值比较小。

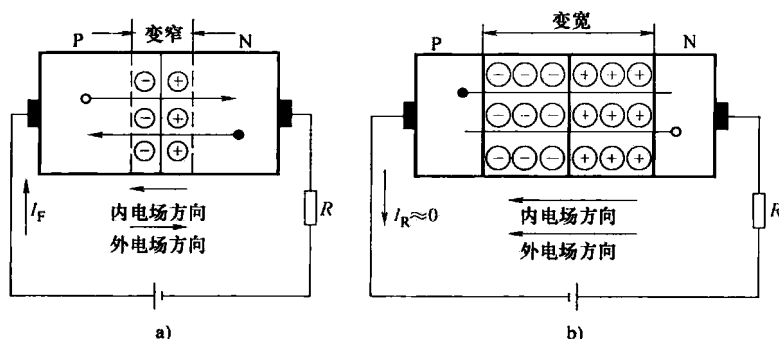


图1-8 PN结外加电压情况

a) PN结外加正向电压 b) PN结外加反向电压

(2) PN结外加反向电压

PN结外加反向电压的情况如图1-8b所示。PN结N区接电源正极,P区接电源负极。

PN 结外加反向电压，又称反向偏置。PN 结外加反向电压时，外电场与内电场方向相同，同样破坏了 PN 结原有的动态平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走，使得空间电荷增加，空间电荷区加宽，内电场增强，使多数载流子的扩散运动难以进行，扩散电流趋近于零。同时内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动，更容易形成漂移电流。由于少数载流子浓度很低，反向电流很小，PN 结呈现很高的反向电阻。此外，反向电流受温度影响较大，温度不变时，少数载流子浓度基本不变，因而在一定的反向电压范围内，反向电流基本不变，又称反向饱和电流。

总之，当 PN 结加正向电压时，PN 结电阻很低，正向电流较大，PN 结呈导通状态；当 PN 结加反向电压时，结电阻很高，反向电流很小，PN 结处于截止状态。由此可见，PN 结具有单向导电特性。

1.3 半导体二极管

1.3.1 基本结构

在 PN 结两侧加上电极（阳极和阴极）引线 and 管壳，就构成了半导体二极管。由 P 区引出的电极称阳极，由 N 区引出的电极称阴极，二极管的符号如图 1-9a 所示。

二极管有很多类型。按所用材料分类；二极管有硅管和锗管；按结构形式的不同，二极管有点接触型、面接触型、平面型等。

(1) 点接触型二极管

点接触型二极管结构如图 1-9b 所示，其特点是 PN 结的结面积小，因而结电容小，适于高频（可达几百兆赫）工作，但不能通过较大的电流，也不能承受高的反向电压。主要用于高频检波和开关电路。

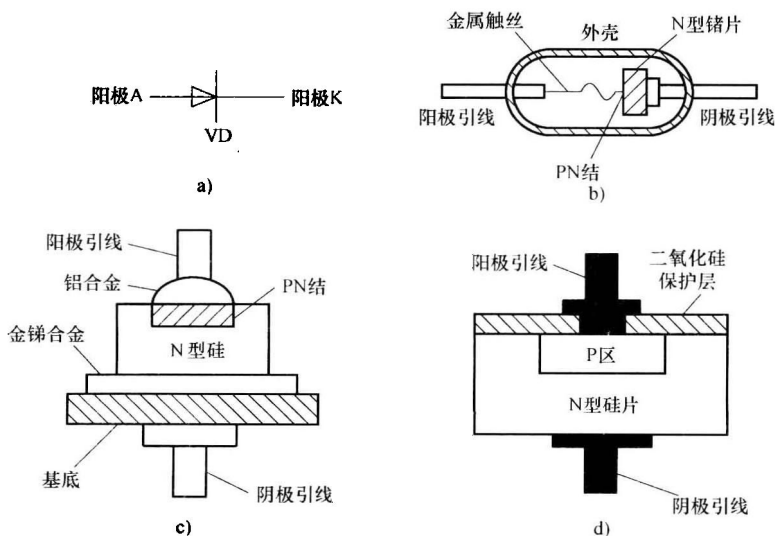


图 1-9 二极管的电路符号及结构分类

a) 图形符号 b) 点接触型二极管 c) 面接触型二极管 d) 平面型二极管

(2) 面接触型二极管

面接触型二极管结构如图 1-9c 所示,其特点是 PN 结的结面积大,能通过较大的电流,但结电容也大,适用于频率较低的整流电路。

(3) 平面型二极管

平面型二极管结构如图 1-9d 所示,其特点是结面积较大时,能通过较大的电流,适用于大功率整流电路。结面积较小时,结电容较小,工作频率较高,适用于开关电路。

按封装形式分类,二极管可分为塑封管、金封管和玻璃封装等,其封装外形主要分贴片式、直插式、螺栓式和平板式。图 1-10 所示为几种常见封装的二极管实物图例。

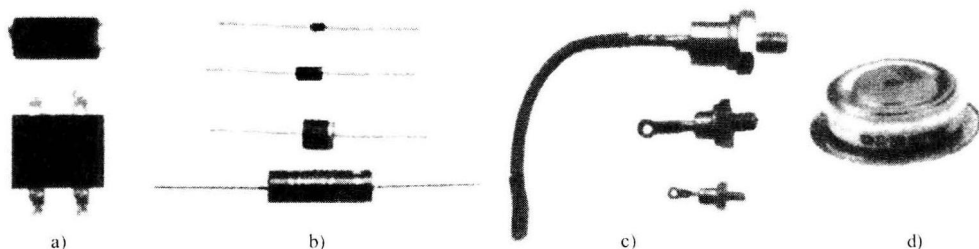


图 1-10 几种常见封装的二极管实物图例

a) 贴片式 b) 直插式 c) 螺栓式 d) 平板式

1.3.2 伏安特性

二极管两端的电压与流过二极管的电流之间的关系曲线称为二极管的伏安特性曲线,图 1-11 给出了 2CP33B 型硅二极管的伏安特性,分为正向特性、反向特性和反向击穿特性三部分。

(1) 正向特性

当二极管所加正向电压较低时,由于所加外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散所造成的阻力,故此时正向电流几乎为零,呈现较大的电阻。正向电流 $I \approx 0$, 这个区域称为死区,相应的电压值 U_0 称为死区电压,其大小和二极管的材料及温度有关。通常硅管的死区电压约为 0.5V,锗管约为 0.1V。

当所加正向电压大于死区电压 ($U > U_0$) 时,内电场被大大削弱,正向电流迅速增加,二极管处于正向导通状态。导通时,硅管正向压降为 0.6~0.7V,锗管约为 0.2~0.3V。当电流较小时取下限值,当电流较大时取上限值。

(2) 反向特性

当二极管加反向电压时,少数载流子的漂移运动形成很小的反向电流。在温度一定、反向电压不超过某一范围时,少数载流子数量基本不变,反向电流的大小基本不变,称为饱和电流,用符号 I_R 表示,其值很小。如小功率硅二极管的反向饱和电流 I_R 一般在几微安以下。当温度增高时反向饱和电流 I_R 随之增大。

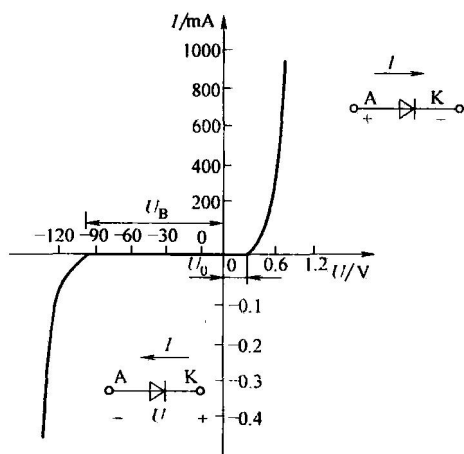


图 1-11 2CP33B 型硅二极管伏安特性

(3) 反向击穿特性

当所加反向电压增大到某一数值 U_B 时, 反向电流 I_R 突然增大, 二极管失去单向导电性。这种现象称为 PN 结的反向击穿。产生击穿时的反向电压称为反向击穿电压。普通二极管被击穿后, 一般不能恢复原有性能。

1.3.3 主要参数

1) 最大整流电流 I_{OM} 。它指二极管在长期使用时, 允许流过二极管的最大正向平均电流。当电流超过该值时, 将由于 PN 结过热而使二极管损坏。

2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。保证二极管不被击穿所允许施加的最大反向电压, 一般规定为反向击穿电压的一半或三分之二。

3) 最大反向电流 I_{RM} 。二极管加上最高反向工作电压时的反向电流。管子的反向电流愈小, 则其单向导电性愈好。温度升高会使反向电流显著增加, 使用时应该注意。

例 1-1 电路如图 1-12a 所示, 二极管的正向压降忽略不计, 已知输入电压 $u_i = 10\sin\omega t$ V, 恒压源 $U_s = 5$ V, 试画出输出电压 u_o 的波形。

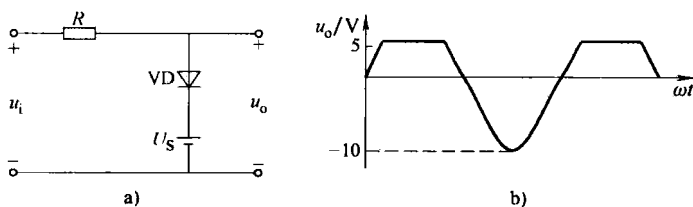


图 1-12 例 1-1 电路图及输出电压波形图

解: 当 $u_i \geq 5$ V 时, 二极管正向导通, $u_o = 5$ V。

当 $u_i < 5$ V 时, 二极管承受反向电压关断, R 中无电流, $u_o = u_i$ 。

输出电压 u_o 的波形如图 1-12b 所示。

1.4 稳压二极管

稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管, 具有稳压特性, 通常称为稳压管。它在电路中与适当阻值的电阻配合能起到稳定电压的作用, 其图形符号如图 1-13b 所示。

1.4.1 伏安特性

图 1-13a 为稳压管的伏安特性。从图中可以看出, 稳压二极管的伏安特性和普通二极管的伏安特性类似, 只是它的反向特性比较陡。当反向电压在一定范围内变化时, 反向电流很小; 当反向电压增高到击穿电压时, 反向电流突然剧增, 此时稳压管被反向击穿。此时电流虽在较大的范围内变化, 但稳压管

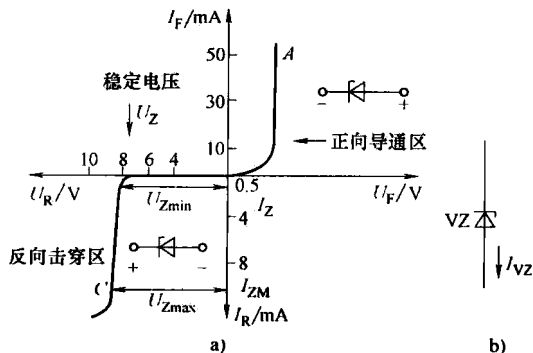


图 1-13 稳压管的伏安特性及符号

两端的电压却变化很小。正是利用这一特性,稳压管在电路中起到了稳定电压的作用。与一般二极管不同,只要流过它的反向电流不超过某一允许值,稳压管就不会损坏,它的反向击穿是可逆的。

1.4.2 主要参数

1) 稳定电压 U_Z 。它是稳压管的反向击穿电压。通常手册中给出的都是在一定电流及温度等条件下的数值。由于制造工艺上的分散性,即使对同一型号的管子,其稳压值也有一定的离散性,例如 2DW7C 硅稳压管, $U_Z = 6.1 \sim 6.5\text{V}$ 。

2) 稳定电流 I_Z 和最大稳定电流 I_{ZM} 。稳定电流是指工作电压等于稳定电压时的反向电流,是一个参考数值。最大稳定电流 I_{ZM} 是稳压管允许通过的最大反向电流。稳压管的工作电流不能超过 I_{ZM} 。当反向电流超过最大允许电流时,稳压管将过热而被烧坏。因此,稳压管必须串联一个适当的限流电阻后再接入电路中,以免损坏。

3) 最大耗散功率 P_{ZM} 。稳压管不发生热击穿时的最大耗散功率。稳压管允许流过的最大工作电流 $I_{ZM} = P_{ZM}/U_Z$ 。

4) 动态电阻 r_z 。它指稳压管在反向击穿区稳定工作时端电压的变化量与相应的电流变化量的比值,即 $r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ 。动态电阻愈小,稳压性能愈好。

5) 电压温度系数 α 。它指温度每增加 1°C ,稳压值变化的百分比数,用以表示稳压值受温度影响的程度。一般情况下稳压值低于 6V 的稳压管具有负温度系数,高于 6V 具有正温度系数, 6V 左右温度系数最小。

例 1-2 求图 1-14 中通过稳压管的电流 I_{VZ} 。并判断限流电阻 R 的值是否合适?

解:

$$\begin{aligned} 20 &= I_{VZ}R + U_Z \\ I_{VZ} &= \frac{20 - 12}{1.6} = 5\text{mA} \end{aligned}$$

$$I_{VZ} < I_{Z\max}, \text{ 所以电阻值合适。}$$

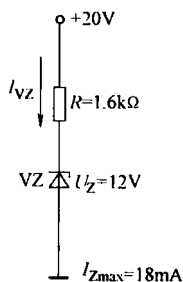


图 1-14 例 1-2 电路图

1.5 双极型晶体管

半导体三极管分为双极型晶体管和场效应晶体管。由于双极型晶体管的发明和应用较场效应晶体管早得多,因此习惯上把双极型晶体管称为晶体管。双极型晶体管由两个背靠背的 PN 结构成,在工作过程中两种载流子(电子和空穴)都参与导电,故有双极型之称,以区别于一种载流子导电的场效应晶体管。

1.5.1 双极型晶体管的基本结构

晶体管按照半导体材料可分为硅管或锗管。在一块半导体晶片上用扩散法或合金法等制造工艺制成三层交替掺杂的半导体区域,形成 P-N-P 或 N-P-N 三层结构。因此晶体管可分为 PNP 型和 NPN 型两类,其结构示意图及表示符号如图 1-15 所示。

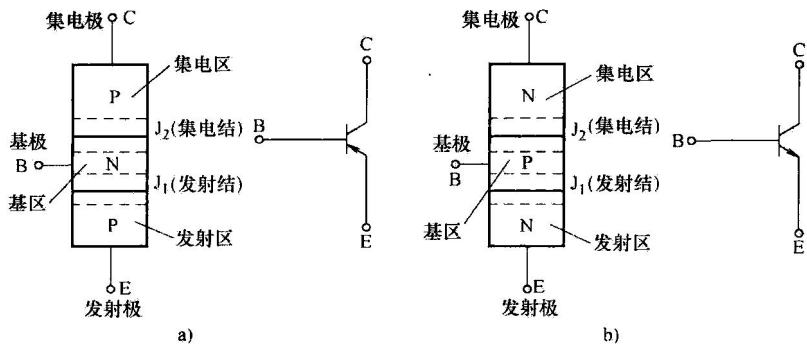


图 1-15 半导体晶体管结构示意图及表示符号
a) PNP 型 b) NPN 型

由图可见，晶体管具有三个不同的掺杂区域：基区、发射区、集电区，并分别引出三个电极，称为基极 B、发射极 E 和集电极 C。晶体管具有两个 PN 结， J_1 是发射结， J_2 是集电结。NPN 和 PNP 型符号的差别在于发射极的箭头方向。该箭头表示了发射结正向偏置时发射极电流的实际方向。图 1-16 是几种常见封装的晶体管实物图例。

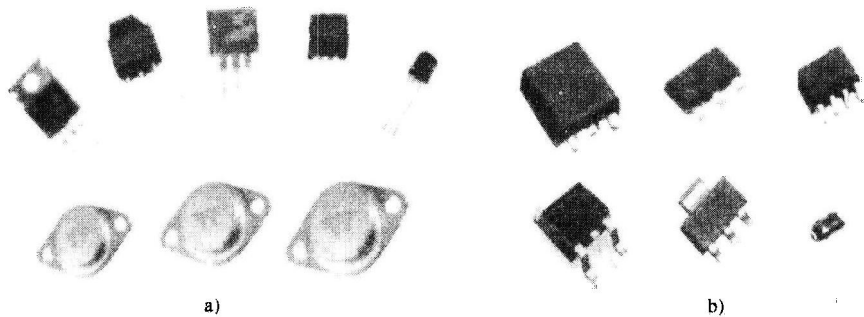


图 1-16 几种常见封装的晶体管实物图例
a) 直插式 b) 贴片式

为了具有电流放大作用，通常基区很薄，只有几微米到几十微米。从掺杂浓度看，发射区浓度最高，集电区次之，而基区掺杂浓度最低。这些特点是它具有电流放大作用的内在条件。

尽管 NPN 型和 PNP 型的内部结构不同，但它们的工作原理是类似的，只是在使用时电源极性连接与电流方向不同而已。下面以 NPN 型管子为例分析其工作原理。

1.5.2 晶体管的电流放大原理

晶体管的电流放大作用有其内部条件和外部条件。内部条件是基区很薄且掺杂浓度远低于发射区，由制造工艺实现；外部条件是发射结正向偏置，集电结反向偏置，由外部电路提供。图 1-17 所示是晶体管电流分配实验电路。图中包括两个回路：基极、发射极回路和集电极、发射极回路，发射极是发射极回路和集电极回路的公共端，因此称之为共发射极电路。

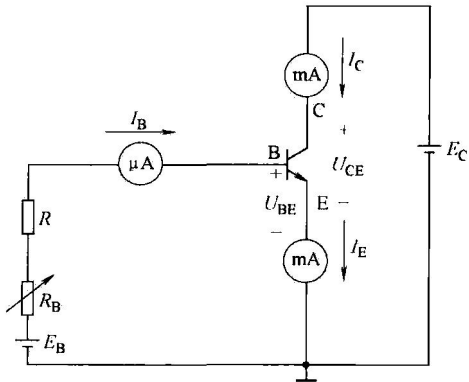


图 1-17 晶体管电流分配实验电路

注意电源 E_B 和 E_C 的极性连接方法，要保证发射结加正向电压（即正向偏置），同时 $E_C > E_B$ ，保证集电结加反向电压（即反向偏置）。

该电路所测得的电流 I_B 、 I_C 和 I_E 见表 1-1。

由上面的实验表格可得出如下结论：

1) 观察每一列数据，可得出

$$I_E = I_B + I_C \tag{1-1}$$

该式表明晶体管各极电流分配符合基尔霍夫电流定律。

表 1-1 晶体管实验数据

I_B/mA	-0.001	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
I_C/mA	0.001	0.01	0.50	1.00	1.70	2.50	3.30
I_E/mA	0	0.01	0.51	1.02	1.73	2.54	3.35

2) 从第三列往后的数据均表明， I_C 的数据比 I_B 的数据大很多。如第四列和第六列的数据， I_C 与 I_B 的比值分别为

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{1.00}{0.02} = 50, \quad \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.50}{0.04} = 62.5$$

这就是晶体管的电流放大作用。晶体管的电流放大作用还体现在基极电流的微小变化 ΔI_B 将引起较大的集电极电流变化 ΔI_C ，比较第五列到第七列的数据可以看出

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{0.80}{0.01} = 80$$

3) 第一列数据 $I_E = 0$ 是发射极开路时的情况， $I_C = I_{CBO}$ 称为集-基极反向饱和电流。此时集电结处于反向偏置，所以实质上它就是集电结的反向漂移电流。对于硅管此电流很小。

4) 第二列数据 $I_B = 0$ 是基极开路的情况， $I_C = I_{CBO}$ 称为晶体管的穿透电流。此电流越小越好。

下面通过其内部载流子的运动情况分析载流子运动及各电极电流分配，如图 1-18 所示。

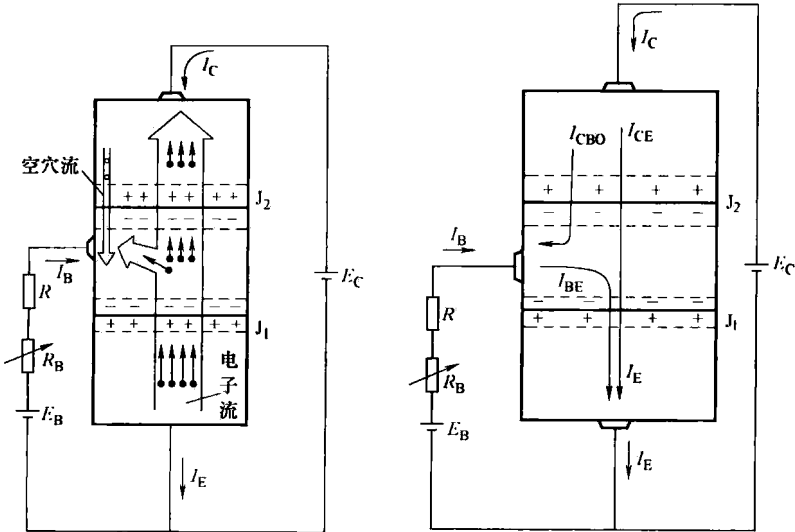


图 1-18 晶体管中载流子运动及电流分配