

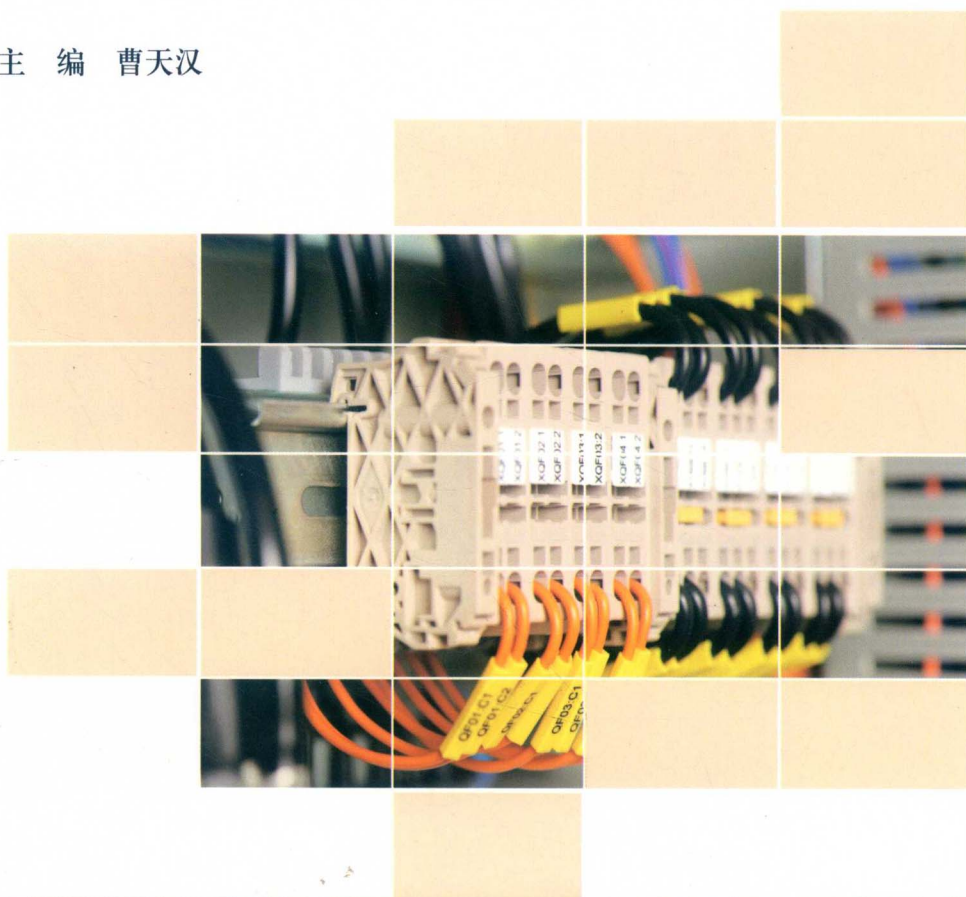
电气信息类基础课系列



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

模拟电子技术

主 编 曹天汉



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

电气信息类基础课系列



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

模拟电子技术

主 编 曹天汉
副主编 童晓敏 袁炼红



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/曹天汉主编. —3 版. —北京: 北京师范大学出版社, 2017. 6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-303-21896-7

I. ①模… II. ①曹… III. ①模拟电路—电子技术—高等教育—教材 IV. TM710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 013755 号

营销中心电话 010-62978190 62979006
北师大出版社科技与经管分社 www.jswsbook.com
电子信箱 jswsbook@163.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com
北京市海淀区新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 北京嘉实印刷有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16
印 张: 18
字 数: 374 千字
版 次: 2017 年 6 月第 3 版
印 次: 2017 年 6 月第 1 次印刷
定 价: 35.00 元

策划编辑: 周光明 责任编辑: 华 珍 周光明
美术编辑: 高 霞 装帧设计: 高 霞
责任校对: 赵非非 责任印制: 赵非非

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-62978190

北京读者服务部电话: 010-62979006-8021

外埠邮购电话: 010-62978190

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-62979006-8006

内容简介

本书按知识结构共分为 8 章。第 1 章介绍晶体二极管、晶体三极管和场效应管等半导体器件;第 2 章详细地叙述了几种主要的基本放大电路的组成、工作原理和频率特性,并给出了常用的分析方法和电路主要参数的计算;第 3 章作为改善放大电路性能的措施,介绍了负反馈的类型、判别和引入负反馈的方法,并较简捷地给出了具有深度负反馈放大电路的分析估算方法;第 4 章介绍了集成运算放大器的组成及其应用;第 5~7 章分别介绍了信号发生器、低频功率放大电路和直流电源等以晶体二极管、晶体三极管和场效应管为核心组成的功能电路,叙述了这些功能电路的工作原理,主要参数估算和设计要点;第 8 章介绍了仿真软件 Multisim 10.0,用作实训项目中应用 Multisim 10.0 仿真软件的参考。

本书在多所高职院校用作模拟电子技术课的教材,鉴于其涵盖的基本知识点较为全面精练,叙述通俗易懂,内容有较好的可读性和实用性,本书也可供其他层次的学生和电子技术爱好者学习使用。

前言

本书自 2005 年出版以来,被很多高职院校教师选用,并在 2006 年被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

模拟电子技术是电子类专业重要的专业基础课程之一,本书符合高等职业技术教育的教育特点,在编写中把如何掌握学科中重要的基本概念、基本分析方法、基本运算能力和基本技能放在考虑选材和写作方法的首位,力求使学生得到扎实的可持续发展的能力,在实践中能更好更快地适应实际生产和科学技术的发展。

本书在 2010 年对第一版进行修订后出版了第 2 版,在修订过程中,保留了原有的知识点模块化的结构,并根据本书在教学使用中积累的经验和发现的不足,对全书的文字和插图进行了审阅、更新和完善,特别对第 3~6 章做了较大的删减和改写,使书中的章节更为精练,叙述更为清晰,重点更为突出,更具科学性,更加有利于读者对各知识点的理解和掌握。

随着计算机技术的发展,电子电路的分析与设计方法发生了重大变革,大量优秀仿真软件的涌现,为教学的创新和改革提供了一个方便、直观、高效的手段。本次修订在第 2 版的基础上,进一步修正了个别文字上的错、漏,删除了一些不必要的章节,并重点对各章中的实训进行了更新。在各章的实训中,叙述了如何应用仿真软件 Multisim 10.0 对实训项目进行制图、仿真和调试,在此基础上,教学中可选择安排学生在实验箱实现仿真结果或进行实物制作。

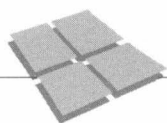
此次修订由杭州职业技术学院曹天汉担任主编并统改和审阅全稿,杭州科技职业技术学院童晓敏、袁炼红为副主编,编写了各章的实训内容并重写了第 8 章。凌毅为参编,重新编写了第 1 章。在修订过程中还得到吴龙、李凡、张雪娟、郭志宏、彭斐等教师的许多建议和帮助,在此一并致以谢意。

随着科学技术的发展和教学改革的深入,修订后的教材难免还会存在不如人意的地方,也可能还存在一些缺点和错误,敬请读者给予批评指正。

编者

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体基础	(1)
1.1.1 纯净的半导体	(1)
1.1.2 杂质半导体	(2)
1.1.3 PN 结及其单向导电性 ..	(3)
1.2 半导体二极管	(6)
1.2.1 半导体二极管结构及其伏安特性	(6)
1.2.2 半导体二极管的参数	(7)
1.3 半导体二极管的应用	(8)
1.3.1 二极管的线性化处理	(8)
1.3.2 普通二极管及其应用 ..	(12)
1.3.3 其他特殊用途的二极管	(15)
1.4 双极型半导体三极管 ..	(16)
1.4.1 双极型半导体三极管的结构、符号及电流放大作用 ..	(16)
1.4.2 三极管的共发射极伏安特性	(19)
1.4.3 双极型半导体三极管的参数	(21)
1.4.4 双极型半导体三极管的线性化处理	(24)
1.5 单极型半导体三极管 ..	(27)
1.5.1 单极型半导体三极管的结构、符号及其工作原理和特性曲线	(28)
1.5.2 单极型半导体三极管的线性化处理	(35)
1.5.3 单极型半导体三极管的参数	(36)
本章小结	(37)
习题与思考题	(38)
实训 1 二极管、三极管的检测与应用	(41)
第 2 章 放大电路的组成及分析 ..	(48)
2.1 放大电路的基本知识 ..	(48)
2.1.1 放大电路的组成	(48)
2.1.2 放大电路的主要性能指标	(50)
2.2 基本放大电路的组成及分析方法	(53)
2.2.1 基本共发射极放大电路	(53)
2.2.2 稳定静态工作点放大电路	(64)
2.2.3 共集电极放大电路(射极输出电路)	(69)
2.2.4 共基极放大电路	(72)
2.3 放大电路的频率特性 ..	(75)
2.3.1 频率特性的基本概念 ..	(75)
2.3.2 放大电路频率特性的分析方法	(76)
2.3.3 三极管的频率特性	(80)



2.3.4 单管共射极放大电路的频率特性	(84)
2.4 多级放大电路	(90)
2.4.1 多级放大电路的组成及耦合方式	(90)
2.4.2 多级放大电路技术指标的估算	(91)
2.4.3 多级放大电路的频率响应	(93)
2.5 差动放大电路	(94)
2.5.1 差动放大电路的组成及分析	(94)
2.5.2 差动放大电路的几种输入、输出方式	(98)
2.5.3 采用恒流源的差动放大电路	(101)
2.6 场效应管放大电路	(106)
2.6.1 自给偏压共源极放大电路	(106)
2.6.2 分压式自偏压共源极放大电路	(107)
2.6.3 共漏极放大电路	(108)
本章小结	(110)
习题与思考题	(110)
实训2 稳定静态工作点放大电路的静态和动态测试	(116)
第3章 放大电路中的反馈	(123)
3.1 反馈的基本概念和基本关系式	(123)
3.1.1 什么是反馈	(123)
3.1.2 反馈的方框图及一般表达式	(124)
3.2 负反馈的基本类型及判别方法	(125)
3.2.1 正反馈和负反馈	(125)
3.2.2 直流反馈和交流反馈	(127)
3.2.3 电压反馈和电流反馈	(127)
3.2.4 串联反馈和并联反馈	(128)
3.2.5 交流负反馈的四种组态	(128)
3.3 负反馈对放大电路性能的影响	(132)
3.3.1 提高放大倍数的稳定性	(133)
3.3.2 改变放大电路的输入和输出电阻	(133)
3.3.3 减小放大电路的非线性失真	(134)
3.3.4 展宽放大电路的频带	(135)
3.4 深度负反馈放大电路的分析估算	(135)
3.4.1 深度负反馈的条件	(135)
3.4.2 放大电路在深度负反馈的条件下的分析估算	(136)
3.5 负反馈放大电路的稳定性	(140)
3.5.1 负反馈放大电路自激振荡的产生	(140)
3.5.2 消除自激振荡的措施	(141)
本章小结	(142)
习题与思考题	(142)
实训3 负反馈放大电路	(144)

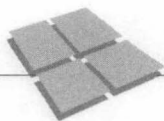
第 4 章 集成运算放大器及其应用

.....	(148)
4.1 集成运算放大器的组成及 主要技术指标	(148)
4.1.1 集成电路及其分类	(148)
4.1.2 集成运算放大器的基本组成 及符号	(149)
4.1.3 集成运算放大器的主要技术 指标	(151)
4.2 基本运算电路	(153)
4.2.1 理想运算放大器	(153)
4.2.2 理想运算放大器在线性区 的应用	(153)
4.2.3 理想运算放大器在非线性区 的应用	(160)
4.3 有源滤波电路	(166)
4.3.1 滤波电路的种类和用途	(166)
4.3.2 有源低通滤波电路	(166)
4.3.3 有源高通滤波电路	(169)
4.3.4 有源带通滤波电路	(170)
4.4 集成运放应用中需注意的 几个问题	(171)
4.4.1 集成运放参数的测试	(171)
4.4.2 集成运放使用中可能出现 的问题	(171)
4.4.3 集成运放的保护	(172)
本章小结	(173)
习题与思考题	(174)
实训 4 集成运算放大器的基本 应用	(176)

第 5 章 信号发生电路 (180)

5.1 正弦波振荡电路的组成及 产生振荡的条件	(180)
----------------------------------	-------

5.1.1 正弦波振荡电路的基本组成	(180)
5.1.2 产生正弦波振荡的条件	(181)
5.2 RC 正弦波振荡电路 ...	(183)
5.2.1 RC 串并联选频网络的选频特性	(183)
5.2.2 RC 桥式正弦波振荡电路	(184)
5.3 LC 正弦波振荡电路 ...	(187)
5.3.1 LC 并联回路的选频特性	(187)
5.3.2 变压器反馈式 LC 正弦波振荡 电路	(188)
5.3.3 电感三点式振荡电路	(189)
5.3.4 电容三点式振荡电路	(190)
5.4 石英晶体正弦波振荡电路	(191)
5.4.1 石英晶体的基本特性与等效 电路	(191)
5.4.2 石英晶体振荡电路	(193)
5.5 非正弦波形发生电路	(193)
5.5.1 矩形波发生器	(194)
5.5.2 三角波发生器	(195)
5.5.3 锯齿波发生电路	(195)
5.5.4 集成波形发生器介绍	(196)
本章小结	(198)
习题与思考题	(199)
实训 5 RC 与 LC 正弦波振荡器	(202)



第 6 章 低频功率放大电路 (208)

6.1 功率放大电路的特点
..... (208)

6.2 互补对称功率放大电路
..... (208)

6.2.1 低频功率放大电路的分类
..... (208)

6.2.2 乙类双电源互补对称功率
放大电路 (209)

6.2.3 甲乙类互补对称功率放大
电路 (213)

6.2.4 单电源供电的互补对称功率
放大电路 (213)

6.3 集成功放电路 (214)

6.3.1 集成功率放大电路概述
..... (214)

6.3.2 几种常用集成功率放大电路
的介绍 (215)

本章小结 (218)

习题与思考题 (218)

实训 6 OTL 功率放大电路与集成
功率放大器 (220)

第 7 章 直流电源 (228)

7.1 直流电源的组成 (228)

7.2 单相整流电路 (229)

7.2.1 整流电路的基本参数
..... (229)

7.2.2 单相半波整流电路 (229)

7.2.3 单相全波整流电路 (230)

7.2.4 单相桥式整流电路 (231)

7.3 单相可控整流电路 (232)

7.3.1 晶闸管 (232)

7.3.2 单相半波可控整流电路
..... (235)

7.3.3 单相桥式可控整流电路
..... (236)

7.4 滤波电路 (237)

7.4.1 电容滤波 (238)

7.4.2 几种其他形式的滤波电路
..... (239)

7.5 直流稳压电路 (241)

7.5.1 稳压电路的主要技术指标
..... (241)

7.5.2 稳压管稳压电路 (241)

7.5.3 串联型稳压电路 (244)

7.5.4 三端集成稳压器 (246)

7.6 开关稳压电源 (248)

7.6.1 开关稳压电源的组成和工作
原理 (248)

7.6.2 实用的开关电源简介
..... (250)

本章小结 (253)

习题与思考题 (254)

实训 7 串联型直流稳压电源和
三端集成稳压器 (257)

第 8 章 仿真软件 Multisim 10.0

..... (264)

8.1 Multisim 简介 (264)

8.2 Multisim 10.0 的用户界面
..... (264)

8.3 Multisim 10.0 电路仿真基本
操作 (266)

8.3.1 文件建立与打开 (267)

8.3.2 设置电路窗口 (267)

8.3.3 元器件操作 (268)

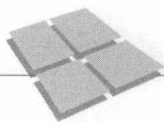
8.3.4 连线的操作 (271)

8.3.5 虚拟仪器及其使用 (273)

8.3.6 文件保存与退出 (276)

本书常用符号说明 (278)

参考文献 (280)



零度(-273.16°C)时,价电子没有足够的能量来脱离共价键的束缚,在这种情况下,晶体中就不能产生能自由运动的带电的粒子,因此半导体也就不能导电。

在室温或光照下,少数价电子因受热激发而获得足够的能量,它们摆脱了共价键的束缚,由束缚电子变成了自由电子,同时也在原来的共价键中留下了一个空位,我们把这个空位称为空穴,把这种现象称为本征激发。本征激发产生了自由电子-空穴对,如图 1.3 所示。

我们把自由电子称作带负电的粒子,而对于空穴,因原子失去价电子后带正电,所以我们将空穴等效看成是带正电的粒子。自由

电子是能自由运动的,空穴在共价键结构中是不能移动的,但空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子来填补(这种现象称为复合),使该邻近价电子原来所在的共价键中产生空穴,这个空穴又可以吸引其相邻共价键中的价电子来填补,从而产生空穴的转移。这种价电子填补空穴的运动可以看成是空穴在做与价电子运动方向相反的运动。

在电场的作用下,带负电的自由电子做定向的运动形成电子电流,带正电的空穴做定向的运动(价电子做定向的填补空穴的运动)形成空穴电流。我们称自由电子和空穴为载流子,把它们在电场作用下的运动称为漂移运动,所产生的电子电流和空穴电流称为漂移电流。

综上所述,半导体与金属导体的导电机理是有所不同的。半导体中存在两种载流子,一种是带负电荷的自由电子,一种是带正电荷的空穴;在电场的作用下,半导体中两种载流子参与导电产生两种电流,一种是自由电子形成的电子电流,一种是空穴形成的空穴电流,按电流正方向的规定,它们的方向是相同的。

在常温下,因本征激发产生的载流子浓度很低,本征半导体在电场作用下产生的电流很小,所以说它的导电能力是很弱的。

1.1.2 杂质半导体

研究发现,在本征半导体中掺入微量的其他元素就会使半导体中载流子的浓度大大增加,从而使半导体的导电性能显著提高。我们把掺入的其他微量元素称为杂质,掺入微量其他元素的半导体称为杂质半导体。按掺入微量元素的种类不同,杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体两种。

1. N 型半导体

在有四个价电子的四价元素(硅或锗)的晶体中掺入有五个价电子的五价元素(如磷、砷、锑等)后,五价元素的原子中的四个价电子与其周围的四价元素的原子中的四个价电子结合成共价键,还多余一个价电子在共价键之外。这个价电子受五价元素的原子的束缚较弱,在室温下就可以挣脱束缚被激发成自由电子,而这个五价元素的原子因脱离了一个电子而变成带正电的离子,掺入多少个杂质原子就可激发多少个自由电子,使这种杂质半导体中的自由电子的浓度大大地增加。这时由于自由电子的增加,

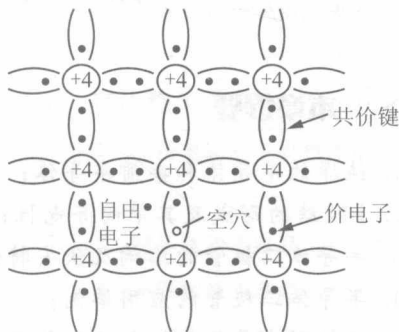


图 1.3 本征激发产生电子-空穴对

又使杂质半导体中原先由本征激发所产生的空穴被电子填补复合的机会增多,因而造成空穴的浓度减少。

因此,在N型半导体中,自由电子的浓度远大于空穴的浓度,我们称自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子,这种杂质半导体主要以自由电子导电,产生电子电流。N型半导体的示意图如图1.4所示。

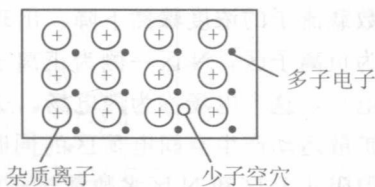


图1.4 N型半导体

2. P型半导体

在有四个价电子的四价元素(硅或锗)的晶体中掺入有三个价电子的三价元素(如硼、铝、钢等)后,三价元素的原子中的三个价电子与其周围的四价元素的原子中的三个价电子结合成共价键时,因缺少一个价电子而在共价键中产生一个空穴。这个空穴在室温下极易吸引邻近共价键中的价电子来填补,使这个三价元素的原子因吸引了一个电子而变成带负电的离子,掺入多少个杂质原子就可产生多少个空穴,使这种杂质半导体中的空穴的浓度大大地增加。这时由于空穴的增加,又使杂质半导体中原先由本征激发所产生的自由电子被空穴吸引复合的机会增多,因而造成自由电子的浓度减少。

因此,在P型半导体中,空穴的浓度远大于自由电子的浓度,我们称空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子,这种杂质半导体主要以空穴导电,产生空穴电流。P型半导体的示意图如图1.5所示。

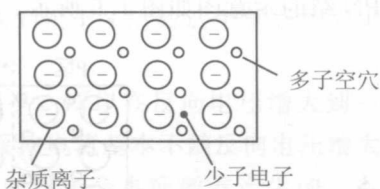


图1.5 P型半导体

注意:

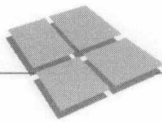
(1)杂质离子虽然带电荷,但它们在晶体结构中是不能移动的,它们不是载流子;杂质半导体中虽然有一种载流子是多数载流子,但整个杂质半导体中正负电荷平衡,是电中性的。

(2)杂质半导体的导电性能主要决定于多数载流子的浓度,多数载流子是由掺杂产生的,它在两种杂质半导体中浓度大且稳定,使半导体的导电性能得到显著的改善。少数载流子是本征激发产生的电子-空穴对,本征激发与温度有关,所以少数载流子虽然浓度很小,但其浓度随温度的变化而变化,这种不稳定性会影响半导体器件的性能。

1.1.3 PN结及其单向导电性

1. PN结

在同一块半导体的基片(如硅片)上采用不同的掺杂工艺,可使其一边形成N型半导体(N区),另一边形成P型半导体(P区),两种类型半导体之间形成一个交界面。P型半导体和N型半导体交界面两侧的两种多数载流子的浓度差别会产生扩散力,所以P区的多数载流子空穴从高浓度的P区向低浓度的N区运动,而N区的多数载流子自由电子会从高浓度的N区向低浓度的P区运动,我们把这种运动称为扩散运动。扩散运动产生的电流称为扩散电流,尽管两种载流子的扩散运动方向相反,但根据电流正方向的规定,两种多数载流子的扩散所产生的扩散电流的方向是相同的。



P区的空穴扩散到交界面的N区一侧，与N区的电子复合，载流子消失；N区的电子扩散到交界面的P区一侧，与P区的空穴复合，载流子消失，结果使界面附近的多数载流子的浓度骤然下降，出现了由不能移动的带电离子组成的区域，由于P区一侧为负离子区，N区一侧为正离子区，同时也形成了一个电场方向为从N区指向P区的电场，这个电场称为内电场，这个区域称为空间电荷区。也就是形成了PN结。

扩散运动产生空间电荷区的同时也产生内电场，从内电场方向可以看出，这个电场不但阻止P区和N区多数载流子的扩散，而且在电场力的作用下，P区的少数载流子电子产生漂移运动从P区漂移到N区，而N区的少数载流子空穴从N区漂移到P区，尽管这两种少数载流子的漂移运动方向相反，但根据电流正方向的规定，两种少数载流子的漂移运动所产生的漂移电流的方向是相同的。所以这个由少数载流子在内电场作用下产生的漂移电流的方向与扩散电流的方向是相反的。

多数载流子的扩散使空间电荷区增宽，内电场增大；少数载流子的漂移使空间电荷区变窄，内电场减弱。在PN结的形成过程中，当扩散力和电场力平衡，扩散运动和漂移运动的作用相抵时，空间电荷区的宽度和内电场的强度就确定了。空间电荷区因载流子的稀少而称作耗尽层，也因其内电场阻碍多数载流子的扩散而称作阻挡层或势垒区。

PN结的示意图如图1.6所示。

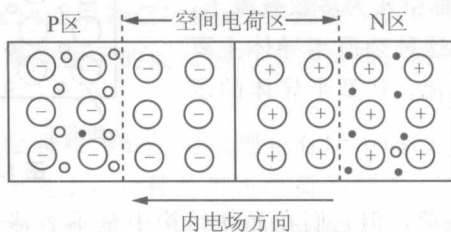


图 1.6 PN 结

2. PN 结的单向导电性

我们把加在PN结上的电压称为偏置电压。如果PN结的P区接电源正极，N区接电源负极，则称PN结加正向电压，又称加正向偏置或正偏；如果PN结的N区接电源正极，P区接电源负极，则称PN结加反向电压，又称加反向偏置或反偏。

PN结正偏时，电源施加的外电场力把P区的空穴和N区的电子推向空间电荷区，它们分别中和P区一侧的负离子和N区一侧的正离子，使得空间电荷区变窄，内电场减弱，这时P区和N区的多数载流子的扩散运动增大，少数载流子的漂移运动减弱，大量多数载流子的扩散在外电场的作用下通过外电路形成回路，产生正向电流。当外加正向电压增大到一定值后，正向电流将显著增大，PN结呈现的电阻很小，我们把PN结的这个状态称为PN结导通。

注意：为了防止正向电流过大而损坏PN结，正偏时应该在回路中串接限流的电阻。

PN结正向偏置的示意图如图1.7所示。

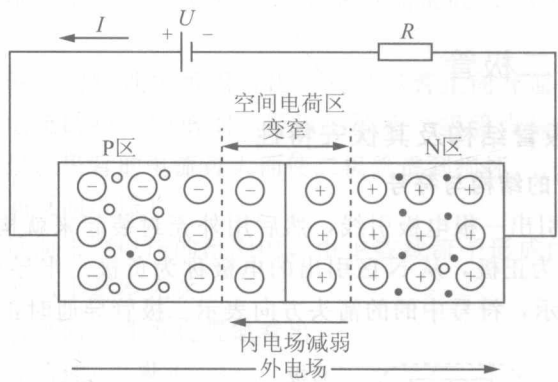


图 1.7 PN 结正向偏置

PN 结反偏时，外电源施加的外电场力把 P 区的空穴和 N 区的电子向离开空间电荷区的方向拉离，使空间电荷区变宽，内电场增强，这时 P 区和 N 区的多数载流子的扩散运动受到内外电场的阻碍，而 P 区和 N 区的少数载流子的漂移运动却受到内外电场的作用而增强，并在外电场的作用下通过外电路形成的回路，产生反向电流。由于反向电流是由 P 区和 N 区中的少数载流子的漂移运动产生的，少数载流子的数量很少，所以形成的反电流很小，PN 结呈现的电阻很大，我们把 PN 结的这个状态称为 PN 结截止。

注意：由于 P 区和 N 区中的少数载流子数量很少，所以在反向电压增大到一定的值后（一般在零点几伏），只要 PN 结没有被击穿，反向电流基本不随反向电压增大而增大，所以又称它为反向饱和电流；另外，由于少数载流子是本征激发产生的，本征激发与温度有关，所以反向电流要受温度的影响。

综上所述，PN 结在外加电场的作用下正偏导通，反偏截止，具有单向导电的特性。

PN 结反向偏置示意图如图 1.8 所示。

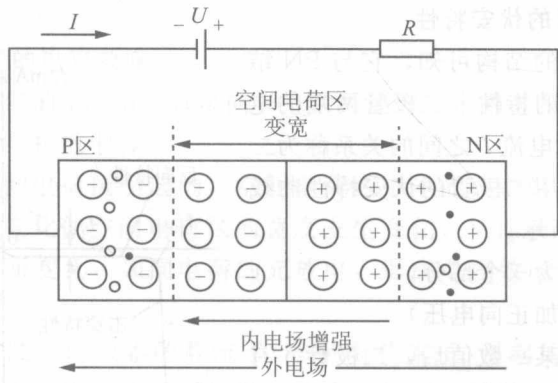
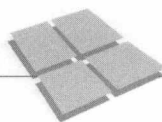


图 1.8 PN 结反向偏置



1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管结构及其伏安特性

1. 半导体二极管的结构与符号

在 PN 结两端各引出一根电极引线, 然后用外壳封装起来就构成了半导体二极管, 从 P 区引出的电极称为正极, 从 N 区引出的电极称为负极。半导体二极管的结构示意图和符号如图 1.9 所示, 符号中的箭头方向表示二极管导通时正向电流的方向。

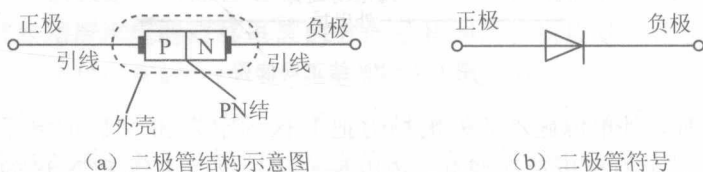


图 1.9 二极管结构与符号

半导体二极管种类有很多, 按照所用的半导体材料, 可分为锗二极管(Ge 管)和硅二极管(Si 管)。根据其不同用途, 可分为检波二极管、整流二极管、稳压二极管、开关二极管等。按照管芯结构, 又可分为点接触型二极管、面接触型二极管及硅平面型二极管。点接触型二极管的 PN 结面积很小, 不能通过很大的电流, 也不能承受很高的反向电压, 但由于它的等效极间电容小, 对高频信号的旁路作用小, 所以适合高频电路工作, 可应用于小电流的整流和高频时的检波、混频等。面接触型二极管的 PN 结面积大, 能通过较大的电流, 但等效极间电容也大, 所以只能在较低的频率下工作, 主要应用于整流电路中。

硅平面型二极管是一种特制的硅二极管, 性能稳定可靠。其 PN 结面积大的, 能通过较大的电流, 可用于大电流整流; PN 结面积小的, 多用于开关、脉冲及高频电路中。但总的来看, 使用于大电流整流用的型号很少, 而作小电流开关用的型号则很多。

2. 半导体二极管的伏安特性

从半导体二极管的结构可知, 它与 PN 结相同, 具有单向导电的特性。二极管两端的电压 U 和流过二极管的电流 I 之间的关系称为二极管的伏安特性, 可用二极管的伏安特性曲线来描述, 如图 1.10 所示。

图中曲线可划分为三个部分。

(1) 正向特性(外加正向电压)

当正向电压超过某一数值后, 二极管才有明显的正向电流, 该电压值称为导通电压(又称为门坎电压或死区电压), 用 U_{th} 表示。在室温下, 硅管的 U_{th} 约为 0.5V, 锗管的 U_{th} 约为 0.1V。当流过二极管的电流 I 比较大时, 二

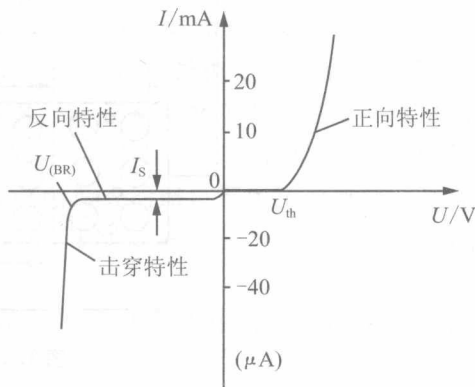


图 1.10 硅二极管的伏安特性曲线

极管两端的电压几乎维持恒定,硅管为 $0.6\sim 0.8\text{V}$ (通常取 0.7V),锗管为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ (通常取 0.2V)。

注意:从二极管的正向特性中可以看出,当二极管正向导通后,其正向电压稍有增大,就会引起正向电流的很大的增加,所以不要将二极管直接接到电源上,而应串以限流电阻,防止流过二极管的电流过大而使二极管遭到损坏。

(2) 反向特性(外加反向电压)

在反向电压小于反向击穿电压的范围内,由少数载流子形成的反向饱和电流 I_s 很小,而且与反向电压的大小基本无关。

由二极管的正向与反向特性可直观地看出:

①二极管是非线性器件;

②二极管具有单向导电性。

(3) 反向击穿特性

当反向电压增加到某一数值 $U_{(\text{BR})}$ 时,反向电流急剧增大,这种现象叫做二极管的反向击穿。

注意:二极管反向击穿时,反向电流急剧增大,二极管因电流过大而过热损坏,这种情况称为热击穿,使用二极管时要防止热击穿。

二极管伏安特性的数学表达式也可以用 PN 结两端的电压和流过 PN 结的电流之间的关系来近似表示:

$$I = I_s(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

在这个数学表达式中, I_s 是反向饱和电流,单位为 A; $U_T = \frac{kT}{q}$ 称为温度电压当量,其中 $k = 1.380 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度,单位为 K; $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, 为电子的电量;在常温($T = 300\text{K}$)下, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

二极管正向偏置时, $U \gg U_T$, 所以 $e^{\frac{U}{U_T}} \gg 1$, $I \approx I_s e^{\frac{U}{U_T}}$, 由此式可见, I 随 U 按指数规律变化,与正向伏安特性曲线近似。

二极管反向偏置时, $e^{\frac{U}{U_T}} \ll 1$, 所以 $I \approx -I_s$, 其中的负号表示反向电流,此式与反向伏安特性曲线相符。

3. 半导体二极管的电容效应

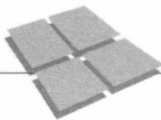
构成半导体二极管的 PN 结具有单向导电性外还有一定的电容效应,按产生的原因不同可分为势垒电容与扩散电容。

势垒电容是由空间电荷区引起的,空间电荷区中不能移动的正、负离子具有一定的电量,外加电压的变化使空间电荷区的宽度发生变化,从而使空间电荷区中的电荷量随外加电压的变化而变化,如同电荷的充放电,形成电容效应。势垒电容在二极管反偏时作用较大。

扩散电容是由扩散区内积累的载流子(非平衡载流子)引起的。载流子带有电荷,外加电压引起扩散区内载流子的积累量发生改变,从而使扩散区内积累的电荷量产生变化,如同电荷的充放电,形成了电容效应。扩散电容在二极管正偏时作用较大。

1.2.2 半导体二极管的参数

二极管的特性还可以用参数来进行定量的描述,在实际应用中,二极管的参数是



我们选用二极管的重要依据，它一般可通过查器件手册得到，必要时也可通过实测来获得。半导体二极管的主要参数有以下几个。

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流是指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。实际应用时，二极管的平均电流不能超过此值，并要满足散热条件，否则会烧坏二极管。

2. 最高反向工作电压 U_R

最高反向工作电压是指二极管使用时允许施加在二极管两端的最大反向电压，超过此值二极管就有发生反向击穿的危险，通常规定取反向击穿电压的一半作为 U_R 。

3. 反向电流 I_R

反向电流是指二极管未击穿时的反向电流值，此值越小，说明二极管的单向导电性能越好。但此值会随温度的上升而显著提高，所以在应用时要注意环境温度的影响。

4. 最高工作频率 f_M

最高工作频率是指保证二极管单向导电作用的最高工作频率。此值主要是由 PN 结的结电容大小决定的，PN 结的结电容很小，对低频信号的容抗大，所以影响小，但随着信号频率增高，其容抗减小，所以产生的影响就会增大。总的来说，结电容大， f_M 就小，结电容小， f_M 就大。

在实际应用中，选择二极管有以下几条基本原则。

(1) 要求导通电压低时选锗管；要求反向电流小时选硅管。

(2) 要求导通电流大时选平面型结构的二极管；要求工作频率高时选点接触型结构的二极管。

(3) 要求反向击穿电压高时选择硅管。

(4) 要求耐高温时选硅管。

1.3 半导体二极管的应用

1.3.1 二极管的线性化处理

从上面的分析可以看到，二极管的伏安特性是非线性的，所以我们不能错误地用以前学过的用于线性元件的欧姆定律来对其进行分析计算。但在实际应用中，我们在特定的条件下完全可以对它进行线性化的处理，只要处理符合实际情况，不但会给分析带来较大的方便，而且能保证工程上允许的准确程度。线性化处理常用以下几种方式。

1. 近似为理想二极管

我们把二极管的理想特性定义为：正向偏置时电压降为零；反向偏置时反向电流为零。在分析电路时，理想二极管的导通和截止可等效为一只理想开关的闭合和断开，理想二极管的符号和等效模型如图 1.11 所示。

在实际电路中，若二极管正向导通，其两端的正向电压远小于与它串联的其他电压时，可将二极管两端的正向电压作零电压处理；若二极管反向截止，其反向电流远小于和它并联的电流时，可将二极管的反向电流作零电流处理。即在上述条件下，可把实际的二极管看作理想二极管。



图 1.11 理想二极管

例 1.1 二极管电路如图 1.12 所示。二极管为理想的硅二极管，电阻 $R=2\text{k}\Omega$ ，电源电压 $U_{\text{DD}}=2\text{V}$ ，求回路中的电流 I 和电阻 R 两端的电压 U 。

解 题中告知二极管为理想二极管，所以其两端的正向压降为零。由图可得：

$$I = \frac{U_{\text{DD}}}{R} = \frac{2}{2} = 1(\text{mA})$$

$$U = U_{\text{DD}} = R \times I = 2(\text{V})$$

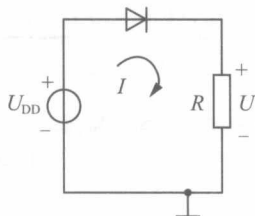


图 1.12 二极管电路

2. 正向导通电压恒定的二极管

考虑到实际二极管正向特性曲线中的门坎电压(硅管约为 0.5V ，锗管约为 0.1V)，我们可用图 1.13 来等效实际的二极管。其特性可近似为：

(1) 二极管有一个导通电压，只有当正向电压超过导通电压后，二极管才导通，否则二极管不导通，电流为零；

(2) 二极管导通后，规定其两端的正向电压为常量，通常硅管取 0.7V ，锗管取 0.3V ；

(3) 反偏时电流为零。

显然，这种处理方式比理想二极管更接近实际的二极管特性。

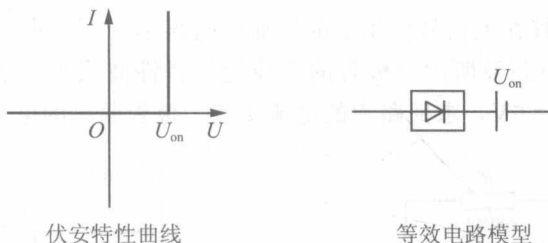


图 1.13 正向导通电压恒定的二极管

例 1.2 二极管电路如图 1.14 所示。二极管为硅二极管，其正向导通压降为 0.7V ，电阻 $R=2\text{k}\Omega$ ，电源电压 $U_{\text{DD}}=10\text{V}$ ，求回路中的电流 I 和电阻 R 两端的电压 U 。

解 题中告知硅二极管的正向导通压降为 0.7V ，所以由图可得：

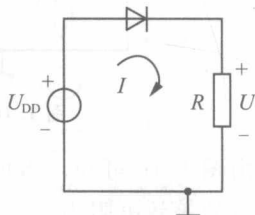


图 1.14 正向导通电压恒定的二极管电路