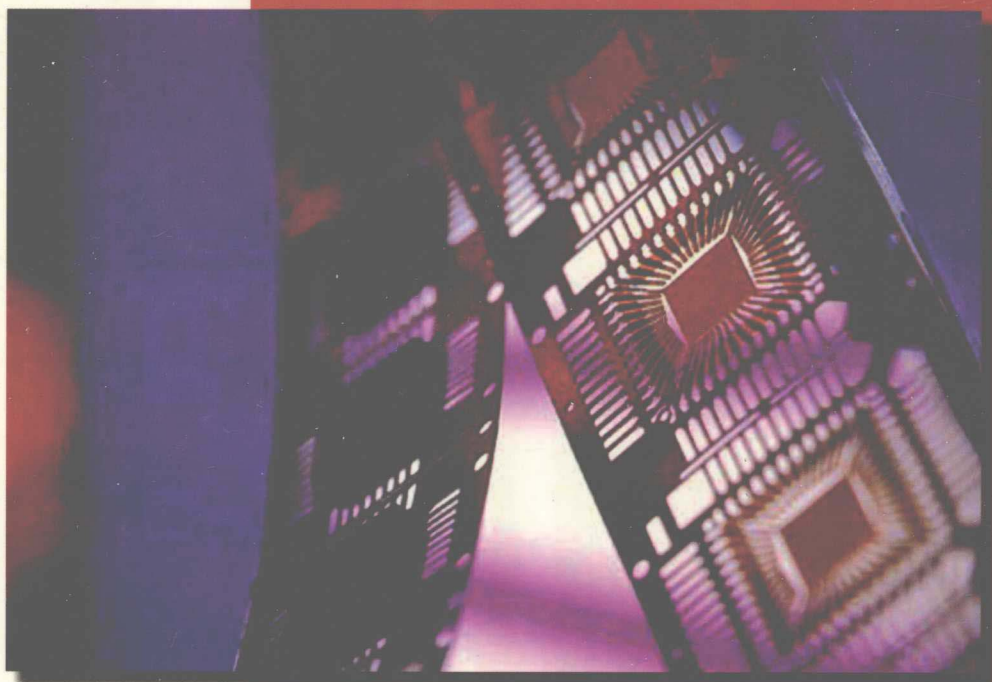




面向 21 世纪课程教材
Textbook Series For 21st Century

电子技术



李春茂（等）编著
朱承高 主审

 科学技术文献出版社

面向 21 世纪 课程教材

Textbook Series For 21st Century

电子技术

主 编	李春茂	赵会军	
副主编	周志田	刘建萍	
主 审	朱承高		
编 委	李春茂	赵会军	周志田
	刘建萍	何 丰	徐祥征
	郭新荣	李丹娜	李改潮

科学技术

(京)新登字 130 号

内 容 简 介

作为面向 21 世纪课程教材,本书较系统地介绍了半导体器件、基本放大电路、运算放大器、正弦波振荡电路、直流稳压电源、可控整流技术、晶闸管逆变技术、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、A/D 与 D/A 转换、存储器、传感测试技术等等。

本书适合于理工科院校本(专)科师生做为教学用书;也能够满足从事各专业的工程技术人员对电子技术的基本需要。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/李春茂(等)编著

北京:科学技术文献出版社,2001.10

ISBN 7-5023-3893-4

I. 电... II. 李... III. 电子技术 IV. TM47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 071919 号

出 版 者: 科学技术文献出版社

地 址: 北京市复兴路 15 号/100038

网 址: <http://www.stdph.com>

E-mail: stdph@istic.ac.cn; stdph@public.sti.ac.cn

策划编辑: 王大庆

责任编辑: 李 静

责任校对: 邓 瑶

责任出版: 周永京

版式设计: 刘 玉

封面设计: 裴 渝

发 行 者: 科学技术文献出版社 全国各地新华书店经销

印 刷 者: 天虹印刷有限责任公司

版(印)次: 2001 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 16 开

字 数: 400 千

印 张: 16

定 价: 26.30 元

版权所有 翻印必究

代 序

我国的经济建设近年来得到长足的发展,建设成就举世瞩目,科学技术发展速度是前所未有的,教育事业蓬勃发展,大、中专学生人数逐年增加,需要有更多教师安心于教学岗位,为教育事业的发展作出贡献。身处教学、科研、生产第一线的广大教师,特别是年轻一代知识分子,在积累了一定的经验与素材以后,编写各种科技书目、教材以及教学辅导材料应该受到鼓励和提倡。

作为一名教师,除了课堂教学,还要从事科学研究、编制教学文件、编写科技书目、教材和各种辅导材料、组织课外活动、发表教学及科研论文,其知识范围不限于所教的课程,而要有所延伸与扩展,特别是在综合运用方面,要有足够宽的知识面,不仅要熟悉本学科的知识范围,还要了解相关学科知识,才能更好的适应经济建设及科技事业发展的需要,适应培养创新人才的需要。李春茂及参加本书编写工作的一批中青年教师,在有关电子技术教学、科研方面具有扎实的理论基础和较丰富的经验。本书作为一部面向 21 世纪的课程教材,选材面宽,内容丰富,并紧密结合实际应用,深入浅出,叙述有一定深度和广度,能够适应不同专业、不同类型、不同层次的教学需要。

本书的编写特点:分析详尽、层次清楚,对于一些重点内容不采用一般的叙述方式,而是分层逐点分析,并且在分析中能够举一反三,循序渐进,便于阅读。另外对于一些触类旁通或延伸的内容有目的的让读者自行分析,启发性强。书中举例有一定针对性,不仅重复验证或用数字体现前面所讲的原理,而且还进一步扩展了概念,指导了解题方法与技巧,可见,例题的安排是有一定构思的。全书进行了模块化编排,有利于按需取舍,而不影响其连贯性。它包含了新的教学大纲所规定的全部内容,主讲教师可根据需要予以调整和取舍,并对有关章节的习题予以合理选择和适当补充。在使其更好地适应教学、科研需要方面,本书作者是作了相当努力的。

组织具有相当经验及基础扎实的中青年教师编写科技书或教材,是当前的新生事物,是培养科技、教育事业接班人的体现。希望今后能够涌现更多不同风格、各具特色的好书,并在使用中不断更新,不断充实,不断完善,不断提高。

祝贺本书早日出版,并预祝其在使用中得到顺利地推广。

朱永高

2001 年 2 月 于上海

前 言

电子技术与电子计算机、自动控制技术、遥感遥测技术及现代通信技术等有机的渗透和结合,是现代高新技术的重要组成部分。

本书是在《电工学新编教程》、《电子技术原理及应用》、《电工学学习指南》的基础上修订而成的。它作为一部面向 21 世纪课程教材,在编著过程中,作者充分考虑了广大师生对现代电子技术的需求,注意现代理论与实际应用紧密结合,并吸收了近年来国内外在电子技术领域及相关学科一些新的科研成果,使得本书知识新颖、涵盖面广,适用性强。全书覆盖了半导体器件、基本放大电路、运算放大器、正弦波振荡电路与非正弦信号发生器、直流稳压电源,可控整流与逆变技术、门电路与组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、A/D 与 D/A 转换等传统内容,同时还涉及存储器、传感测试技术等现代学科领域。全书采用国际单位制。

本书由下列人员共同编著:李春茂(绪论、第 1 章)并负责全书的统稿工作、刘建萍(第 2 章)、李丹娜(第 3 章)、何丰(第 4 章)、徐祥征(第 5 章、附录)、李改潮(第 6 章)、周志田(第 7 章)、赵会军(第 8 章)、郭新荣(第 9、10 章)。

全书承蒙国家教育部电工学研究会理事、上海交通大学知名教授朱承高先生主审。朱承高先生在百忙之中对全书进行了认真审阅,提出了许多宝贵意见和建议;书中插图由裴渝等同志负责绘制;刘玉同志在内文排校中做了大量细致的工作;在编写和出版过程中,西南交通大学、湖北工学院、华东交通大学、承德石油高等专科学校、山西大学、张家口大学、沈阳市职业学院、重庆邮电学院、北方工业学校、华北水利水电学院等给予了热情支持。全体编著者密切合作,对每一个章节段落、公式及插图等进行反复推敲核对,以确保成书质量。在此,对所有关心此书出版工作的人们深表诚挚谢意!对本书参考文献作者表示衷心感谢!

因编者水平所限,疏漏难免,欢迎读者批评指正。

李春茂

2001.06.06

目 录

前言

上篇 模拟电子技术

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体基础知识和 PN 结	(1)
本征半导体·杂质半导体·PN 结	
1.2 半导体二极管	(6)
基本结构·伏安特性·主要参数·二极管的等效电路模型·半导体二极管的测量与选用·特殊半导体二极管	
1.3 晶体三极管	(11)
晶体管的类型与符号·晶体管的载流子运动规律·晶体的特性曲线·晶体管的主要参数·共射晶体管的微变模型	
1.4 场效应晶体管(FET)	(17)
N 沟道增强型 MOS 管·N 沟道耗尽型 MOS 管·P 沟道 MOS 场效应管·结型场效应管·MOS 管小信号模型·场效应管的主要参数·场效应管与双极型晶体管的比较	
1.5 晶闸管	(21)
晶闸管的结构及工作原理·晶闸管的伏安特性分析·晶闸管的主要参数	
1.6 单结晶体管	(23)
构造及符号·伏安特性·工作原理及其特点	
习 题	(25)
第 2 章 基本放大电路	(27)
2.1 放大电路的性能指标	(27)
放大的概念·如何实现信号放大·放大电路的主要性能指标	
2.2 单管放大电路	(29)
三极管单管放大电路·场效应管单管放大电路	
2.3 多级放大电路	(42)
多级放大电路的耦合方式·多级放大电路的静态分析·多级放大电路的动态分析·放大电路的频率特性	
2.4 差动放大电路	(48)
差动放大电路的组成与电路分析·共模放大倍数与共模抑制比·差动放大电路在不同输入、输出方式下的动态性能指标·改进型差动放大电路	
2.5 功率放大电路	(53)
功率放大电路的特点·功放的类型及其分析	
习 题	(58)
第 3 章 集成运算放大器	(62)
3.1 集成运算放大器	(62)
集成运算放大器的特点·集成运算放大器的组成·集成运算放大器的主要参数与等效电路·理想运算放大器及其分析依据	

3.2 放大电路中的反馈	(66)
反馈的基本概念·反馈放大器的分类·负反馈对放大电路性能的影响·反馈类型的判断· 正确引入负反馈的原则	
3.3 运算放大器的应用	(71)
集成运放的数学运算电路·低通滤波器·电压比较器·采样保持电路	
3.4 使用运算放大器应注意的几个问题	(82)
选用元件·消振·调零·集成运算放大器的保护	
习 题	(83)
第4章 波形发生电路及应用	(86)
4.1 正弦波振荡器	(86)
正弦波振荡器的自激振荡原理·正弦波振荡器的组成和分析方法·LC 正弦波振荡器· RC 正弦波振荡器	
4.2 非正弦信号发生器	(94)
矩形波发生器·三角波发生器·集生函数发生器简介	
习 题	(98)
第5章 直流稳压电源	(99)
5.1 整流滤波电路	(99)
单相半波整流电路·单相桥式整流电路·倍压整流电路·滤波电路	
5.2 稳压电路	(105)
硅稳压管稳压电路·串联型稳压电路	
5.3 集成稳压电源	(108)
习 题	(111)
第6章 晶闸变流管技术基础	(113)
6.1 单向可控整流电路	(113)
单向半控桥式整流电路·单相全控桥式整流电路·电感性负载与续流二极管的作用	
6.2 三相可控整流电路	(116)
6.3 常用晶闸管触发电路	(118)
晶闸管对触发电路的要求·简单触发电路·阻容移相桥触发电路·单结晶体管弛张振荡 电路·单结晶体管同步触发电路·* KJ 系列集成电路触发器简介	
6.4 晶闸管的保护	(122)
晶闸管的过电流保护·晶闸管的过电压保护	
6.5 晶闸管逆变技术	(124)
逆变的概念·几种常用的晶闸管有源逆变电路·有源逆变器的应用—绕线异步电动机的 串级调速	
6.6 晶闸管调压电路	(127)
交流调压电路·交流调压温控电路·LC906 集成可控调压电路	
6.7 晶闸管可控开关电路	(128)
习 题	(129)

下篇 数字电子技术

第 7 章 组合逻辑电路的分析与综合	(130)
7.1 数字信号概述	(130)
7.2 逻辑代数基础	(131)
逻辑变量·基本逻辑运算和逻辑函数·逻辑代数的基本定律和公式·逻辑代数运算的基本原则	
7.3 逻辑函数与逻辑图	(135)
化简的意义及最简的概念·逻辑函数的代数化简法·逻辑函数的卡诺图化简法·逻辑函数与逻辑图的相互转换	
7.4 逻辑门电路	(140)
基本逻辑门电路·TTL 集成逻辑门电路·MOS 门电路	
7.5 组合逻辑电路的分析和设计方法	(151)
组合逻辑电路的分析·组合逻辑电路的设计	
7.6 编码器和译码器	(153)
二进制编码器·二-十进制编码器·	
二进制译码器·二-十进制译码器·七段数字显示译码器	
7.7 加法器	(159)
半加器·全加器·并行相加串行进位加法器	
7.8 数据选择器和数据分配器	(161)
数据选择器·数据分配器	
7.9 数值比较器	(162)
7.10 组合逻辑电路应用举例	(163)
故障报警电路·水位检测器	
习 题	(164)
第 8 章 时序逻辑电路的分析及应用	(168)
8.1 双稳态触发器	(168)
基本 RS 触发器·钟控 RS 触发器·主从触发式 JK 触发器·触发器逻辑功能的转换·边沿触发式 D 触发器·CMOS D 触发器·常用触发器的类型符号·触发器的选择和应用·集成电路触发器的主要参数	
8.2 寄存器	(178)
数码寄存器·移位寄存器·集成寄存器	
8.3 计数器	(183)
二进制计数器·十制计数器·任意进制计数器·集成计数器	
8.4 单稳态触发器	(191)
微分型单稳态触发器·CMOS 积分型单稳态触发器·集成单稳及应用	
8.5 555 集成定时器	(194)
555 集成定时器工作原理·由 555 定时器组成双稳态触发器·由 555 定时器组成单稳态	

触发器·由 555 定时器组成无稳态触发器(多谐振荡器)	
8.6 时序逻辑电路的典型应用举例	(196)
数字钟·数字测速系统	
8.7 数/模和模/数转换器	(198)
数/模转换器(DAC)·数/模转换器的主要技术指标·集成数/模转换器·模/数转换器	
(ADC)·ADC 的主要技术指标·集成 ADC	
习 题	(207)
第 9 章 存储器与可编程逻辑器件	(212)
9.1 存储器	(212)
9.2 随机存取存储器	(216)
RAM 的结构和工作原理·集成随机存取存储器(RAM)	
9.3 可编程逻辑器件(PLD)	(219)
可编程只读存储器(PROM)·可编程逻辑阵列(PLA)·可编程阵列逻辑(PAL)	
习 题	(224)
第 10 章 传感测试技术	(227)
10.1 传感器的定义、组成及其作用	(227)
10.2 传感器的分类及性能指标	(228)
按工作原理分类·按输入信息分类·按输出信息分类·按能量关系分类·传感器的主要性能指标	
10.3 金属应变片式传感器	(229)
工作原理·应变式传感器测试电路·应用举例	
10.4 电容式传感器	(233)
工作原理·电容式传感器在液位测量中的应用	
10.5 电感式传感	(237)
10.6 半导体温度传感器	(238)
二极管温度传感器·三极管温度传感器·集成电路温度传感器	
10.7 非电量测试技术	(239)
习 题	(241)
附录	

上篇 模拟电子技术

第 1 章 常用半导体器件

在科学技术飞速发展的今天,几乎所有的电子设备都离不开半导体器件。因此,了解各种半导体器件的结构特点、技术参数和性能、工作原理及适用范围,对于学好电子技术是非常重要的。

1.1 半导体基础知识和 PN 结

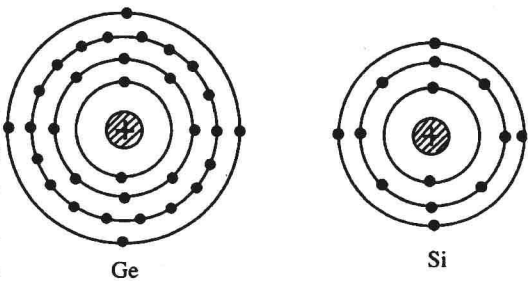
1.1.1 本征半导体

自然界中的物质可以依导电能力的强弱来分类,导电能力强的物质称为**导体**,不导电的物质称为**绝缘体**,导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为**半导体**。目前用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。经过高度提纯,晶体结构完整有序的半导体称为**本征半导体**。

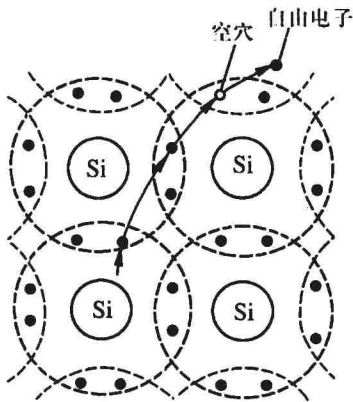
硅和锗都是四价元素,其原子序数分别为 14 和 32。它们的原子结构中,最外层轨道上都有四个电子,称为**价电子**,如图 1-1(a)所示。它的数目决定了物质的化学性质和导电能力。

在本征半导体(硅或锗)的单晶体结构中,原子在空间有规律地整齐排列,组成一定形式的晶格点阵。由于晶体中相邻原子间的距离很近,相互影响大,价电子受到所属原子核及相邻原子核的共同作用,使一个价电子为相邻两个原子所共有,形成了晶体中的**共价键**结构,如图 1-1(b)所示。这样,晶体中每个原子的四个价电子都与相邻四个原子的价电子分别组成四对共价键,相当于每个原子在最外层拥有八个电子,这是稳定的原子结构。

共价键内的两个电子叫做**束缚电子**。在热力学温标零度($T = 0\text{K}$)或无外界能量激发时,由于共价键的束缚力很强,价电子不能脱离公共轨道,因此在本征半导体中没有能够自由运动



(a) 硅和锗的原子结构简化模型



(b) 本征半导体的共价键结构

图 1-1 本征半导体结构模型

的电子存在,这时即使有(不太强的)外电场作用,它也不会产生电流,呈现出绝缘性。

温度上升时,一些价电子因原子的热运动而获得足够的能量,使之可以脱离共价键的束缚成为自由电子,这种现象叫做本征激发。自由电子是本身带有负电荷的粒子,在外电场作用下可以定向运动形成电流。当价电子脱离共价键后,共价键中就留下了一个空位,称为空穴。由于原子外层轨道的能级相同,空穴很容易被任一相邻共价键中的价电子所填充,所以空穴可以在共价键中“自由移动”。注意空穴所在原子缺少一个电子,相当于带有一个正电荷,空穴的移动可被视为正电荷的移动,因而可以把空穴看成是带一个正电荷的粒子,它在外电场作用下也可以定向运动而形成电流。带有电荷的自由电子和空穴都称为载流子,它们的定向运动是半导体导电的内部机制,即半导体中的电流是电子电流和空穴电流之和。

在本征半导体内,自由电子和空穴总是相伴出现的,所以本征半导体中自由电子和空穴数目是相等的。半导体内部除了本征激发产生电子-空穴对以外,电子和空穴在无规则的游离状态下,也会相遇而互相填补,使自由电子和空穴一同消失,这一过程称为载流子的复合。

电子-空穴对同时产生、同时消失。在一定温度下,它们的产生、复合在持续不断地进行,使载流子数目在变化中处于一种动态平衡,半导体中的载流子浓度将保持一定的数值。温度升高时本征激发使电子-空穴对数目相对增多。理论分析表明,载流子浓度会按指数规律增大,在电场一定的情况下,本征半导体内载流子数目越多,电流就越大。所以温度是影响半导体性能的一个很重要的因素。另外光照、辐射等外界条件的加强都会使半导体导电能力增大。

1.1.2 杂质半导体

影响半导体性能的另外一个因素是在本征半导体中掺入微量杂质,形成杂质半导体。因掺入的杂质不同,可将杂质半导体分为N型半导体和P型半导体两类。

1. N型半导体

在本征半导体(如硅)中掺入微量的五价元素,如磷(或砷、锑等)。这些微量的杂质原子掺入后基本上不会改变本征半导体的晶体结构,只是在某些位置取代了硅原子。在磷原子的五个价电子中,有四个与其相邻的硅原子组成共价键。多余的一个价电子不受共价键的束缚,受原子核的引力也较小,在室温下极容易脱离磷原子的吸引成为自由电子,而磷原子成为不能移动的带正电荷的离子。除了磷原子提供的自由电子外,原晶体中也有由于本征激发产生的自由电子和空穴。每个磷原子都能提供一个自由电子,却不能同时产生空穴,所以这些额外的自由电子使半导体中的自由电子数目大大增加,而空穴数目则远远小于自由电子数目。因此,在这种掺杂半导体中,电子是多数载流子(简称多子),空穴是少数载流子(简称少子),这种杂质半导体主要以电子的定向运动形成电流,故称为N型(电子型)半导体。

2. P型半导体

在本征硅(或锗)内掺入微量的三价元素,如硼(或铝、镓等),晶体中的某些位置被硼原子所替代。由于硼原子最外层只有三个价电子,它们与相邻的四个硅原子组成共价键结构时,其中一个共价键中必然留有一个空位。其它相邻硅原子中的价电子在室温下或其它能量的激发下,很容易填补这个空位,使硼原子成为带负电的不能移动的离子。硅原子中的价电子移走后,原来的位置就产生一个空穴。在常温下每个硼原子都能提供一个空穴,但不能同时产生一个电子。除此之外,晶体中也存在由于本征激发而产生的电子-空穴对,其数目远远少于硼原子提供的额外的空穴数目。因此,在这种杂质半导体内的两种载流子中,电子只占很少的一部

分,绝大多数载流子都是空穴,所以空穴是多数载流子,电子是少数载流子。显然,参与导电的载流子以空穴为主,故将这种杂质半导体叫做**P型(空穴型)半导体**。

无论是**N型半导体**还是**P型半导体**,其中的正电荷量与负电荷量都是相等的。如在N型半导体内,磷原子失去电子后形成的正离子数与本征激发产生的空穴数之和,等于磷原子提供的自由电子数与本征激发的自由电子数之和,所以自由电子是多数载流子并不表明N型半导体带负电,它对外部呈现电中性;类似地,P型半导体对外部也呈现电中性。

1.1.3 PN结

在本征半导体中掺入杂质后,载流子数目剧增,相应导电能力也大大加强。

1. 半导体内部载流子的运动

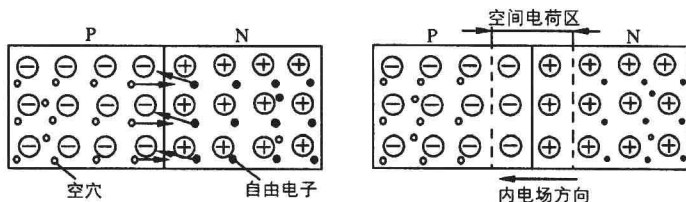
半导体没有外加电场时,内部的载流子处于杂乱无序的运动状态,它们自由地向各处移动。有外加电场后,载流子在电场作用下将有序地定向运动。在电中性的半导体中,如果一种载流子的分布不均匀,即浓度有差别时,载流子会从浓度高的区域向浓度低的区域扩散,载流子做微观上无序但宏观上有序的运动,从而形成电流。这种由于载流子扩散运动形成的电流叫做**扩散电流**。

2. PN结的形成

在一块完整的硅片上,用一定的工艺使其一边形成P型半导体,另一边形成N型半导体,在这两种不同半导体的交界面附近会形成一个特殊的区域—**PN结**。

N型半导体中电子是多数载流子,P型半导体中空穴是多数载流子,它们结合在一起时,存在明显的浓度差。N区的电子必然向P区扩散,P区的空穴也必然向N区扩散。当载流子通过两种半导体的交界面后,N区的电子与P区的空穴复合,P区的空穴与N区的电子复合,如图1-2所示。在交界面附近,N区出现了带正电的杂质离子区域,这些杂质离子不能移动,不能参与导电,结果

使这一区域带有正电荷;P区同样出现不能移动的负离子,相应的这一区域带有负电荷。这些正负离子所在区域形成一个**空间电荷区**,即**PN结**。在空间电荷区内,P区空穴和



(a) 交界面两侧载流子的扩散

(b) PN结示意图

图1-2 PN结的形成

N区的电子在扩散过程中复合,载流子的数目很少,即载流子的浓度从很高迅速下降至很低,所以PN结又称为“**耗尽层**”。交界面两侧空间电荷的存在,使得这个区域产生了由N区指向P区的**内电场**。载流子浓度越大,空间电荷区越宽,内电场越强。注意到内电场的方向与多子扩散运动的方向相反,所以它阻碍了两区域多子的扩散,因此,又将PN结称为**阻挡层**。内电场虽然阻碍各方载流子向对方扩散,但却促使双方的少数载流子向对方漂移(P区的电子向N区漂移,使空间电荷区内的正离子数减少;N区的空穴向P区漂移,使负离子数也减少),其结果是空间电荷区有变窄的趋势。另一方面,空间电荷区变窄后,内电场对多子扩散的阻碍作用减

弱,又使得多数载流子继续向对方扩散,PN 结又有加宽的趋势。最终当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时,使 PN 结的宽度和内电场的场强都稳定下来。

PN 结的宽度一般为数微米。内电场的电压与半导体材料、掺杂浓度及环境温度有关。在室温下,硅材料 PN 结的电压约为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$,锗材料 PN 结的电压约为 $0.1 \sim 0.3\text{V}$ 。

3. PN 结的特性

讨论 PN 结的性质时,不仅要了解其内部的情况,更重要的是通过它掌握 PN 结外加电压后所呈现的特性,而 PN 结的基本特性就是单向导电性。另外还存在着电容效应,当外加高频电压时就会呈现出来。

(1) 单向导电性 在 PN 结上施加正向电压(P 区接电源正极,N 区接电源负极),也叫正向偏置,如图 1-3(a)所示。外加的正向电场与内电场迭加,共同作用于空间电荷区,破坏了原有的平衡状态,使内电场的作用减弱,P 区和 N 区的多子在外电场作用下被推向 PN 结,将一部分杂质离子中和,使空间电荷量减少,阻挡层变窄,有利于多子的扩散但不利于少子的漂移。所以在外加正向电压时,P 区的空穴和 N 区的电子源源不断地向对方扩散,形成较大的扩散电流。此时,PN 结的内电场并未消失,所以两侧的少子依然存在漂移运动,形成的漂移电流与扩散电流的方向相反,但因其数值很少,无法与扩散电流相抗衡,可忽略不计。

在 PN 结上施加反向电压(P 区接电源负极,N 区接电源正极),也叫反向偏置。此时外电场与内电场的方向一致,共同作用使局部场强增大,阻挡层加宽,结果阻止了多子的扩散,促使了少子的漂移,因而形成了 PN 结的反向电流。如图 1-3(b)所示。在半导体内少子的浓度很低,能够参与漂移的少子数量有限,所以即使外加的反向电压较大,通过 PN 结的电流也很小,并且在外加电压增大时,电流保持基本不变,所以把该电流称为反向饱和电流 I_s 。

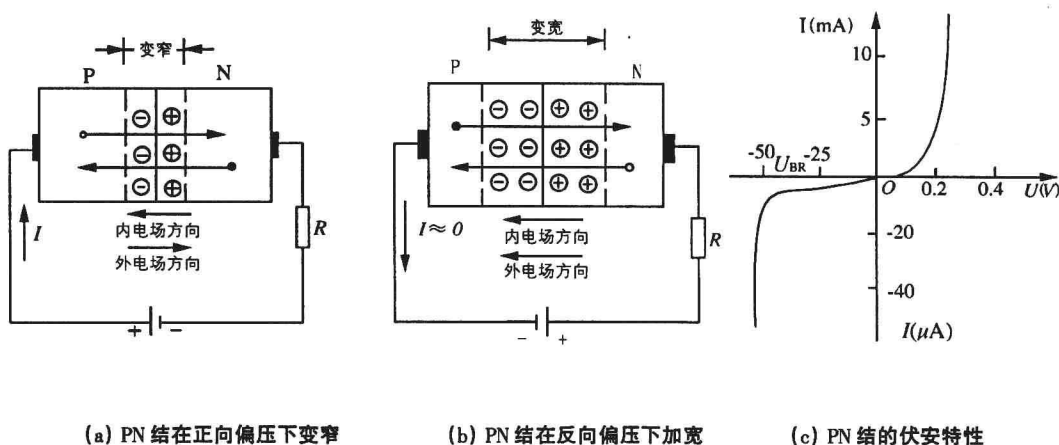


图 1-3 PN 结的单向导电性示意图

从上面的讨论可知,PN 结加正向电压时,有较大的正向电流通过,称为正向导通;而 PN 结加反向电压时,反向电流很小,称为反向截止。即 PN 结只允许一个方向的电流顺利通过。这就是 PN 结的单向导电性。

由理论分析得知,PN 结两端的电压 U 和流过 PN 结的电流 I 之间可以用下式来表示:

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

式中 U 是 PN 结外加电压,参考方向由 P 区指向 N 区; I 是流经 PN 结的电流,与 U 关联方向;

I_s 为 PN 结反向饱和电流, $U_T = kT/q$ 称为温度电压当量, 其中 k 为波尔兹曼常数, T 是热力学温标, q 为电子的电量, 在室温下 ($T = 300\text{K}$), $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

对式(1-1)进行简单的分析就可得出 PN 结正向特性和反向特性的大致情况。PN 结在正向偏置时, 只要 U 大于 U_T 几倍以上 (如 $U = 5U_T$), 式(1-1)就可简化为

$$I = I_s e^{U/U_T} \quad (1-2)$$

即电压 U 大于 U_T 一定的数值后, 电流 I 与电压 U 之间按指数规律变化。PN 结反向偏置时, 只要 $|U|$ 大于 U_T 几倍, 式(1-1)可简化为

$$I \approx -I_s \quad (1-3)$$

这时, PN 结的反向电流就是反向饱和电流, 而且与反向电压无关。根据式(1-1)可以画出 PN 结的伏安特性曲线, 如图 1-3(c)所示。

当 PN 结的反向电压加大, 达到某一数值时, PN 结的电流不再保持 I_s , 而是迅速变大, 这时只要电压 U 的数值稍有增加, 电流就增加很多, 这种情况叫做反向击穿。发生击穿时的反向电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。产生反向击穿的基本原因是, 在强电场的作用下, PN 结内的自由电子和空穴大量增加, 使反向电流突然增大, PN 结内载流子数目瞬时激增, 基于以下两种机制:

①当反向电压足够大, PN 结内的电场强度很高, 参加漂移的电子在很短的路程内就获得了较高的能量, 运动速度很高。当它们与晶体中的原子碰撞时, 能量的传递可以使原子中的价电子受激发而脱离共价键的束缚, 产生新的电子-空穴对。新的电子又被加速, 去碰撞其它的原子, 再产生其它新的电子-空穴对。如此形成了连锁反应, 使 PN 结中的载流子激增, 反向电流急剧增大, 所以常称之为雪崩击穿。

②反向电压较大时, 对于掺杂浓度高的半导体, 使本来就很薄的 PN 结中造成了很高的电场强度 (可达到 $2 \times 10^6/\text{cm}$ 以上的场强)。它能够强迫价电子挣脱共价键的束缚, 把价电子从共价键中拉出来, PN 结中骤增了大量的电子-空穴对, 形成很大的反向电流, 这种现象称之为齐纳击穿。

PN 结反向击穿后, 只要反向电压和反向电流的乘积限定在一定范围内, 一旦反向电压的数值小于击穿电压 U_{BR} , PN 结就会恢复正常, 这属于电击穿。如果对反向电流的大小不能加以限制, PN 结的功耗太大, 其热量不能及时得到散发, PN 结的温度就会上升直至过热而烧坏 PN 结。这种情况叫做热击穿。电击穿是可利用的, 而热击穿是应该避免的。

(2) 电容效应 PN 结外加正向电压增大时, P 区和 N 区的多数载流子更多地涌进空间电荷区, 与已存在的正、负离子相中和, 结果使空间电荷区的电荷量减少; 相反, PN 结外加电压减小时, 空间电荷区加宽, 电荷量增多。也就是说, 外加电压的变化, 将引起 PN 结空间电荷量的改变, 这与电压的改变可以引起电容器极板上电荷量的改变相类似。这就是 PN 结的电容效应。它发生在空间电荷区内, 称为势垒电容。

PN 结正向偏置时, P 区和 N 区的多子向对方扩散。载流子通过 PN 结后, 在电源的作用下, P 区到达 N 区的空穴要继续向电源的负极移动, 空穴在 N 区形成一定的浓度分布, PN 结界面附近浓度最高, 沿空穴运动方向浓度渐渐降低, 相当于在 PN 结 N 区界面外侧有空穴的积累, 即有正电荷的聚集。同样, N 区到达 P 区的电子也在 P 区界面外侧有负电荷(电子)的聚集。若正向电压增大, 参与扩散的载流子数增多, 在 PN 结外侧所积累的载流子也多, 电荷量增大; 若正向电压减小, 扩散到对方的载流子数目就少, 相应地在 PN 结外侧的电荷量减少。

这可以看成是在外界电压的增大或减小时,电容器的两个极板上的电荷也在增多或减少,即相当于电容在充放电。这种 PN 结的电容效应是由于载流子扩散程度不同引起的,称之为扩散电容。

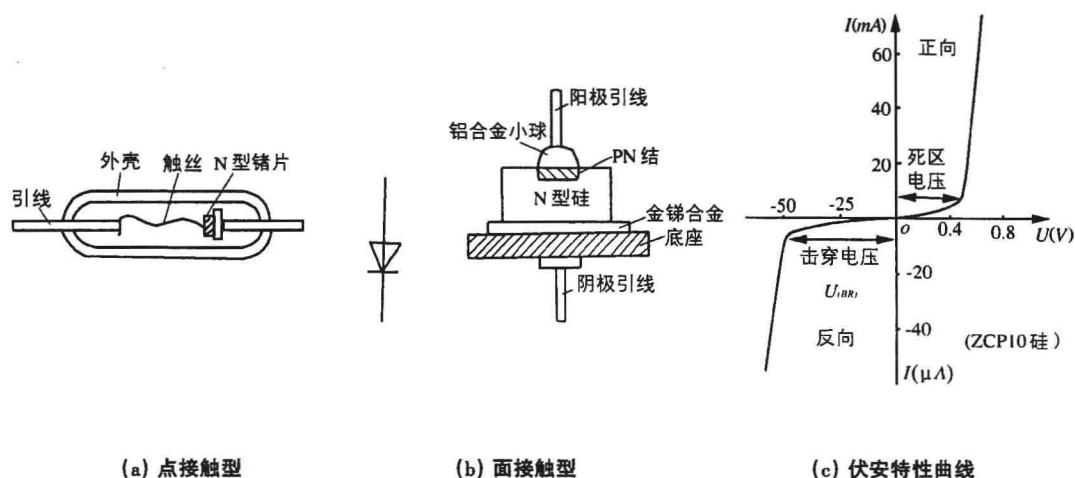
PN 结总的电容效应包括势垒电容和扩散电容两部分。一般地,PN 结正向偏置时,扩散电容起主要作用;而 PN 结反向偏置时,势垒电容起主要作用。它们的值都很小,通常为 $1\text{pF} \sim$ 几十 pF 。

1.2 半导体二极管

1.2.1 基本结构

半导体二极管是由 PN 结焊接上引线并用管壳封装制成的,按结构不同可以分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管是用一根细金属丝和一块半导体晶片的表面接触,采用特殊工艺在接触点形成 PN 结,再做引出线,外加管壳密封而成,如图 1-4(a)所示。这种结构的二极管 PN 结面积很小,结电容也很小,但不能承受较大的电流。主要适用于高频检波、小电流整流和作为小功率开关器件。



1-4 二极管结构及伏安特性示意图

面接触型二极管是用合金法或扩散法在半导体材料上做成的 PN 结,其结构如图 1-4(b)所示。这种结构的 PN 结的结面积大,可以承受较大的正向电流,但结电容也大,所以工作频率低。适用于低频大功率整流。

1.2.2 伏安特性

由于二极管的主要结构是 PN 结,所以它的伏安特性与 PN 结的伏安特性相近。在正向电压较小时,外电场的作用尚不能影响内电场的强度,多数载流子的扩散没有明显的增强,二极管基本上没有电流。当正向电压大到一定程度时,正向电流才开始较快增加,对应的正向电压叫做“阈值电压”(或死区电压) U_V 。在室温下,硅二极管的 $U_V \approx 0.5\text{V}$,锗二极管的 $U_V \approx 0.2\text{V}$ 。因为二极管的 P 区和 N 区存在着体电阻、引线电阻和电极的接触电阻,使二极管外加的

正向电压并不能完全作用在 PN 结上,对于同样数值的外加电压,二极管的正向电流比 PN 结的电流小。电流越大,差别越明显。其伏安特性曲线如图 1-4(c)所示。但一般在定量计算时,二极管的伏安特性仍可采用 PN 结的方程式(1-1)。

二极管所加的反向电压小于反向击穿电压 U_{BR} 时,反向电流基本上等于 PN 结的反向饱和电流。硅二极管的反向电流远小于锗二极管的反向电流。

温度的变化对二极管的伏安特性有一定影响。可以证明,当温度增加 1°C 时,正向电压降低 $2 \sim 2.5\text{mV}$,即二极管的正向电压有负温度系数。由于温度的升高使少数载流子的数目增加,所以反向电流随温度升高而增大。在室温附近,温度每升高 10°C ,反向电流大约增大一倍。

1.2.3 主要参数

选择电路器件时,除了掌握它的特性以外,还要了解器件具体的性能指标和运用的极限条件等,作为合理与安全使用器件的依据,二极管的主要参数有:

1. 最大整流电流 I_F

指二极管长期运行时,允许通过的最大正向平均电流。实际运用时,二极管的平均电流不要超过此值,以免 PN 结功耗过大而烧坏管子。

2. 最大反向工作电压 U_R

指二极管使用时所允许承受的最大反向电压,为避免二极管反向击穿,通常取 U_R 等于反向击穿电压 U_{BR} 的一半。

3. 反向电流 I_R

指管子未击穿时的反向电流。 I_R 的值越小,管子的单向导电性就越好。使用中要充分注意温度对 I_R 的影响。

4. 最高工作频率 f_M

由于 PN 结电容的存在,对二极管工作信号频率将有所限制,若信号频率超出 f_M ,二极管的单向导电性变差,甚至完全消失。数值上 f_M 主要决定于 PN 结的电容的大小。

1.2.4 二极管的等效电路模型

二极管是一种非线性器件。在具体分析含有二极管的电路时,常常根据实际情况,用二极管的模型来等效替代,建立比较简单的等效电路,从而便于分析电路的性能和参数。

1. 静态电阻 R_D 与动态电阻 r_d

二极管的正向电压 U_F 与正向电流 I_F 之比,定义为静态电阻,如图 1-5(a)所示电路,据此作出的直线与二极管特性曲线的交点 Q 为静态工作点,如图 1-5(b)所示。由图 1-5(b)可得静态电阻为

$$R_D = \frac{U_F}{I_F} \big|_Q$$

在 Q 点处电压变化量 ΔU 与电流变化量 ΔI 之比,称为二极管的动态电阻 r_d ,即

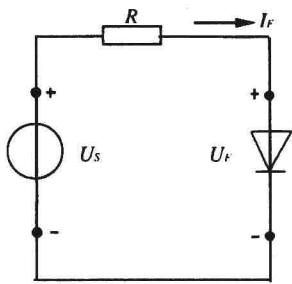
$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} \big|_Q \approx \frac{dU}{dI}$$

因为二极管电流与其两端电压间的关系满足

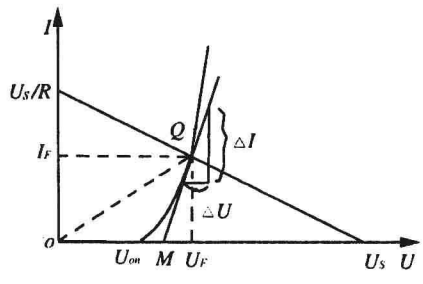
$$I = I_s(e^{U/U_T}-1)$$

$$\frac{dI}{dU} = \frac{I_s}{U_T}e^{U/U_T} \approx I/U_T$$

$$r_d \approx \frac{dU}{dI} = \frac{U_T}{I} \Big|_Q$$



(a) 含有二极管的电路



(b) 求静态电阻 R_D 和动态电阻 r_d

图 1-5 二极管的等效电阻

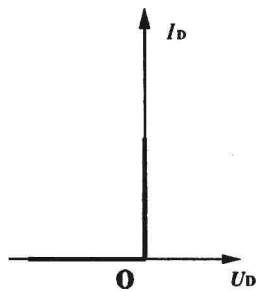
二极管的静态工作点确定之后, R_D 和 r_d 值确定; 工作点改变时, R_D 和 r_d 随之改变。

2. 二极管的等效电路模型

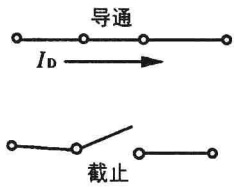
在不同条件下, 可以建立几种二极管的等效电路模型。

(1) 理想二极管模型

相对于与二极管串联的其它元件相比, 如果二极管的电压很小, 且其反向电流可以忽略不计, 则二极管视为理想元件。理想二极管的伏安特性及等效电路模型如图 1-6 所示。当理想二极管正向导通时, 其 $U_D = 0$, 用一个闭合的开关来表示, 这时通过二极管的正向电流 $I_D > 0$; 当它截止时, $I_D = 0$, 相当于断开的开关。



(a) 伏安特性

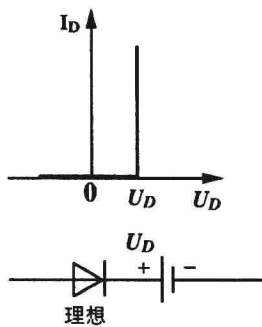


(b) 开关模型

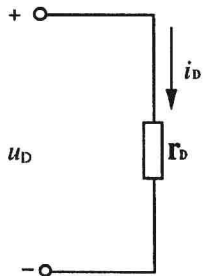
图 1-6 理想二极管的等效电路模型

(2) 二极管大信号模型

如果二极管工作在特性曲线的上部, 其两端电压的数值不可忽略时, 则正向特性简化为平行于纵轴的直线, 二极管可视为理想二极管与电压源相串联的模型来表示, 如图 1-7(a) 所示。它考虑了二极管



(a) 大信号模型



(b) 微变信号模型

图 1-7 二极管大信号与微变信号模型

的正向压降 U_D (硅二极管为 0.6~0.7V, 锗管为 0.2~0.3V)。

(3) 二极管微变信号模型(动态模型)

如果二极管已经在某种状态下运行, 需要考虑微小变化的电压引起对应电流的变化规律