



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工学(II): 电子技术

李春茂 编著 朱承高 审

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工学(II): 电子技术

李春茂 编著 朱承高 审

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书较系统地介绍了常用半导体器件,分立元件基本放大电路,集成运算放大器,信号发生与变换电路,直流稳压电源,电力电子技术基础,逻辑门与组合逻辑电路,触发器与时序逻辑电路,存储器与可编程逻辑器件等内容。

本书特别适合机电一体化、自动控制、仪器仪表、信息工程、通信、航天、化工、轻工、过程控制、安全工程、管理及环境保护类等各专业作为教材使用(40~60学时各专业可以通用),也可供自学者及工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电工学. II,电子技术/李春茂编著. —北京:清华大学出版社,2009.9
ISBN 978-7-302-21012-2

I. 电… II. 李… III. ①电工学 ②电子技术 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 158219 号

责任编辑:张占奎

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:15.5 字 数:368 千字

版 次:2009 年 9 月第 1 版 印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:25.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:034903-01

代 序

新中国成立以来,特别是改革开放 30 年来,随着科教兴国战略的实施,我国的经济建设得到长足发展,建设成就举世瞩目,科学技术迅速腾飞,教育事业蒸蒸日上,学生人数逐年增加,需要有更多的优秀教师安心于教学工作,为教育事业的发展作出贡献。身处教学、科研第一线的广大教师,在积累了一定的经验与素材之后,编写各种教材以及教学辅导读物应该受到足够重视。

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,才能更好地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。

本书作者知识面很宽,特别是在电工电子技术教学、科研方面具有深厚造诣和丰富经验。本书选材面宽,内容丰富,叙述通俗、严谨,并紧密结合实际应用,能够适应不同专业、不同类型、不同层次读者的需要。

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,对于一些类似的或延伸的内容有目的地让读者自行分析,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。在使其更好地适应教学、科研需要方面,本书作者作了较大努力。

本书可作为非电各专业的《电子技术》教材,它包含了新的教学大纲所要求的全部内容,主讲教师可根据需要予以调整和取舍,对有关章节的习题予以合理选择和适当的补充。

预祝此书得到顺利推广使用。

朱承高

2009 年 4 月于上海交通大学

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渗透和结合,组成现代高新技术。

本书系作者在长期的教学实践中,不断总结经验并吸取了国内外同类教材精华的基础上编著而成。作为一部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,在编著过程中,作者以全国电工学会多次召开的“教学教法改革研讨会”精神为指导,充分考虑了广大读者对电子技术的需求,注意现代理论与实际应用紧密结合,并吸收了国内外在电子技术领域及相关学科新的科研成果。在本书出版前,作者特别做了以下工作:征求并采纳了各相关兄弟院校专家和同行的意见,且考虑到当前大众化教育学时不断压缩的实际情况,对书中某些繁杂或不便讲解的内容进行了必要的删减,对某些需要加强的内容进行了适当补充和修正;为便于学生课后练习,对有关章节的习题进行了较大篇幅的补充;结合作者几年来在双语教学和实验教学中的体会,充分借鉴国外优秀教材对电子器件的描述,吸收了经过实验验证的特性参数,使得本书更加精练、通俗易懂、适用性强。为适应我国目前高等教育技术基础课教学的通用性,整体框架未做根本性改变。全书(采用国际单位制)涵盖了半导体器件、基本放大电路、运算放大器、振荡电路、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、存储器与可编程逻辑器件等内容。它特别适合于高等院校机电一体化、自动控制、仪器仪表、信息工程、通信、航天、化工、轻工、过程控制、安全工程、管理及环境保护类等各专业作为教材使用(40~60学时各专业可以通用),也可供自学者及工程技术人员参考。

为了方便教学,本书配有多媒体教学课件(备案)。

全书承蒙教育部电工学会理事、上海交通大学知名教授朱承高先生主审。朱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;书中插图初稿由李冠宇负责绘制。在本书的编著和出版过程中,全体工作人员密切合作,对每一个章节段落、公式及插图等进行反复推敲核对;清华大学出版社给予了大力支持。在此,对所有关心此书出版工作的人们深表诚挚谢意!

因编者水平所限,疏漏难免,恳请读者斧正。作者电子邮箱:lcm0421@126.com。

李春茂

2009年4月

目 录

代序	I
前言	III
第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.2 半导体二极管	6
1.3 双极型晶体管	10
1.4 场效应晶体管	15
1.5 晶闸管	19
1.6 单结晶体管	21
习题	22
第 2 章 分立元件基本放大电路	25
2.1 概述	25
2.2 单管放大电路	27
2.3 多级放大电路	39
2.4 差动放大电路	45
2.5 功率放大电路	49
习题	53
第 3 章 集成运算放大器	61
3.1 集成运算放大器概述	61
3.2 放大电路中的反馈	65
3.3 集成运算放大器的应用	70
3.4 使用运算放大器应注意的几个问题	79
习题	80
第 4 章 信号发生与变换电路	85
4.1 正弦波发生电路	85
4.2 非正弦信号发生器	91
习题	94

第 5 章 直流稳压电源	97
5.1 整流滤波电路	97
5.2 稳压电路	103
习题	106
第 6 章 电力电子技术基础	110
6.1 单向可控整流电路	110
* 6.2 三相可控整流电路	113
6.3 常用晶闸管触发电路	115
6.4 晶闸管的保护	118
6.5 晶闸管逆变技术	120
6.6 晶闸管调压电路	123
6.7 晶闸管可控开关电路	125
习题	126
第 7 章 逻辑门与组合逻辑电路	127
7.1 数字信号概述	127
7.2 逻辑代数基础	128
7.3 逻辑函数与逻辑图	132
7.4 逻辑门电路	137
7.5 组合逻辑电路的分析和设计方法	147
7.6 编码器和译码器	150
7.7 加法器	156
7.8 数据选择器和数据分配器	158
7.9 数值比较器	159
7.10 组合逻辑电路应用举例	160
习题	161
第 8 章 触发器与时序逻辑电路	165
8.1 双稳态触发器	165
8.2 寄存器	175
8.3 计数器	181
8.4 单稳态触发器	190
* 8.5 555 集成定时器	193
8.6 时序逻辑电路的典型应用举例	196
8.7 数/模和模/数转换器	198
习题	205

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
9.3 可编程逻辑器件	219
习题	226
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	228
附录 B 常用半导体分立器件的参数	229
B.1 半导体二极管	229
B.2 绝缘栅场效应管	230
B.3 晶体三极管(3DG100A)	231
B.4 晶闸管	231
B.5 单结晶体管	232
附录 C 国际电工委员会(IEC)简介	233
附录 D 半导体集成电路型号命名法	234
参考文献	235

第1章 常用半导体器件

半导体器件是用半导体材料制成的电子器件,最常用的有二极管、三极管、场效应管、晶闸管、单结晶体管等。随着电子技术的飞速发展,各种新型半导体器件层出不穷,几乎所有电子设备都离不开半导体器件。因此,全面了解各种半导体器件的结构特点、工作原理、技术参数和性能及其适用范围,是学好电子技术的关键所在。

1.1 半导体基础知识

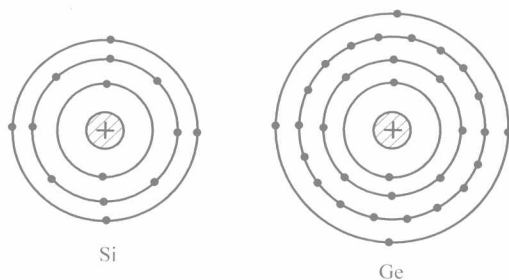
自然界中的物质可以按导电能力的强弱分为导体、绝缘体和半导体。导电能力强的物质称为导体,不导电的物质称为绝缘体,导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体(如硅、锗、硒等)。半导体之所以得到广泛的应用,是因为它具有热敏感性、光敏感性、掺杂敏感性等特殊性能。

1.1.1 本征半导体

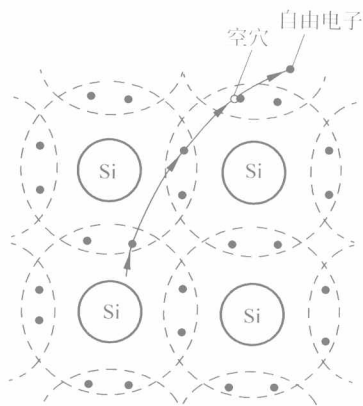
经过高度提纯(99.999999%,简称9个9)、晶体结构完整有序的半导体称为本征半导体。目前用来制造半导体器件的材料主要是单晶硅(Si)、单晶锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。硅和锗都是4价元素,其原子序数分别为14和32。它们的原子结构如图1-1(a)所示,最外层轨道上都有4个电子,称为价电子。

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约束,使1个价电子为相邻2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4个价电子都与相邻4个原子的价电子分别组成4对共价键,相当于每个原子核最外层有8个等效价电子,这是稳定的原子结构。

共价键内的2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,价电子不易挣



(a) 硅和锗原子结构简化模型



(b) 本征半导体的共价键结构

图1-1 本征半导体结构模型

脱原子核束缚而成为自由电子,因此,本征半导体的载流子数目有限,其导电能力很差。这时即使有(不太强的)外电场作用,也不会产生电流,呈现绝缘性。

当温度上升时,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1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1个电子,相当于带有1个正电荷,空穴的移动可视为正电荷的移动,因而可以把空穴看成是带1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,载流子浓度会随温度的升高按指数规律增大,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

如上所述,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1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1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3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1个共价键中必然留有1个空位。其他相邻硅原子中的价电子在室温下或其他能量的激发下,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1个空穴。在常温下每个硼原子都能提供1个空穴,但不能

同时产生1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。

综上所述,在掺入杂质后,载流子的数目都有相当程度的增加。因而对半导体掺杂是改变半导体导电性能的有效方法。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。在呈电中性的半导体中,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,载流子作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

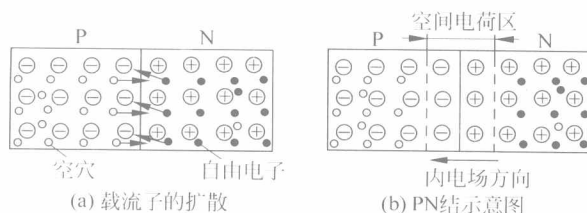


图 1-2 PN结的形成

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,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,这在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叠加,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,所以两侧的少数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,促进了少子的漂移,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,能够参与漂移的少数子数量有限,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 。

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

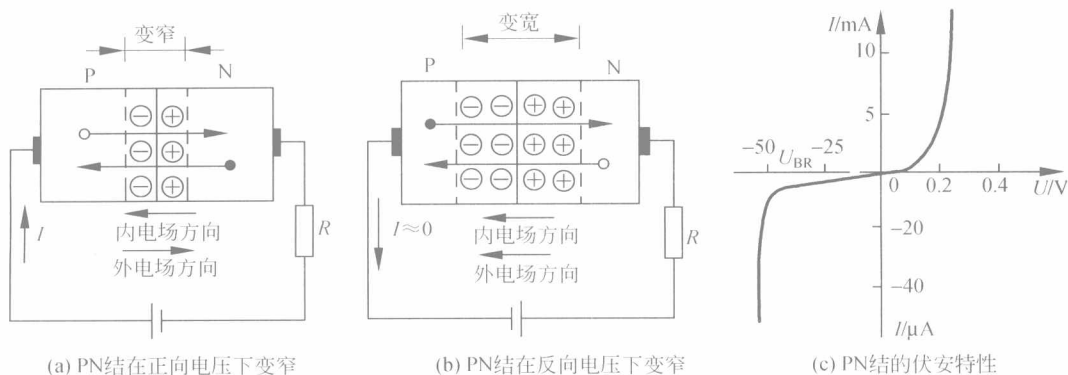


图 1-3 PN 结的单向导电性示意图

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 为 PN 结外加电压,参考方向由 P 区指向 N 区; I 为流经 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 为波耳兹曼常数, 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)可化简为

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

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,去碰撞其他的原子,再产生其他新的电子-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,常称为雪崩击穿。

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 $2 \times 10^6 \text{V/cm}$ 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,这种电荷量随外加电压的变化所形成的电容效应称为势垒电容。

势垒电容通常用 C_T 表示。 C_T 不是一个常数,它随外加电压的变化而变化。利用势垒电容可以制成变容二极管。

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 2 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多数载流子在扩散过程中引起电荷积累而产生的,称为扩散电容,通常用 C_D 表示。

PN 结总的电容效应包括势垒电容和扩散电容两部分,即 $C_j = C_T + C_D$ 。一般地,PN 结正向偏置时,扩散电容起主要作用,即 $C_j \approx C_D$;而 PN 结反向偏置时,势垒电容起主要作用,即 $C_j \approx C_T$ 。它们的值都很小,通常为几皮法至几十皮法。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的基本结构

半导体二极管又称晶体二极管,简称二极管,它是由 PN 结焊接上引线并用管壳封装制成的,按其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,再做出引线,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。

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。

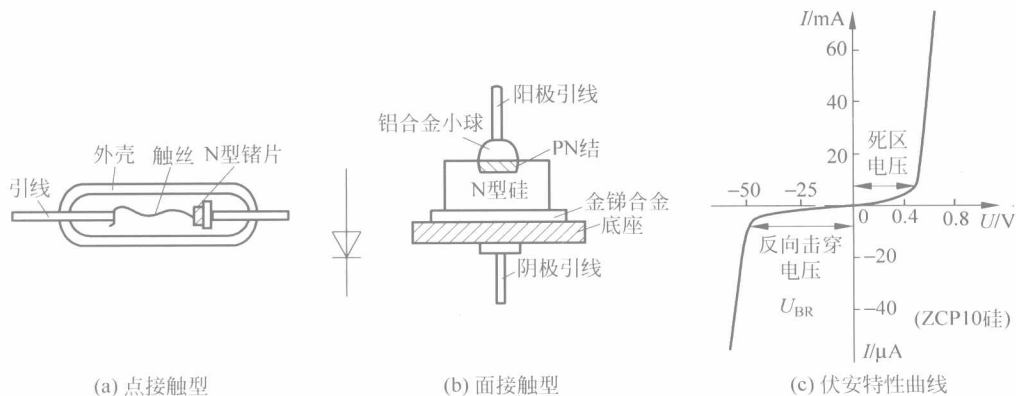


图 1-4 二极管结构及伏安特性示意图

1.2.2 二极管的伏安特性

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。二极管的伏安特性曲线如图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。由于温度升高使少数载流子数目增加,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 ,反向电流约增大1倍。

1.2.3 二极管的主要参数

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。二极管的参数是定量描述二极管性能的质量指标,只有正确理解这些参数的意义,才能正确、合理地选择和使用二极管。

1. 最大整流电流 I_F

I_F 指二极管长期运行时,允许通过的最大正向平均电流。因为电流通过PN结时要引起管子发热,电流太大,发热量超过限度,就会使PN结烧坏。例如,2AP1最大整流电流为 16mA 。实际运用时,二极管的平均电流不要超过 I_F 值,以免PN结功耗过大而烧坏管子。

2. 反向击穿电压 U_{BR} 与最大反向工作电压 U_R

反向击穿电压是指反向击穿时的电压值。击穿时,反向电流剧增,使二极管的单向导电性被破坏,甚至会因过热而烧坏。最大反向工作电压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,通常将 U_R 取为反向击穿电压 U_{BR} 的一半,以确保管子安全工作。例如,2AP1最高反向工作电压规定为 20V ,而实际反向击穿电压可大于 40V 。

3. 反向电流 I_R

在室温下,二极管加反向电压未击穿时的反向电流值称为反向电流。该电流越小,二极管的单向导电性能就越好。由于温度升高,反向电流会急剧增加,因而在使用二极管时要注意环境温度的影响。

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。

二极管参数是正确使用二极管的依据,一般半导体器件手册中都给出不同型号管子的参数。使用时应特别注意不要超过最大整流电流和最高反向工作电压,否则管子容易损坏。

1.2.4 含有二极管电路的简单计算

下面举例说明含有二极管电路的简单计算,关于二极管更复杂的应用将在后面章节讨论。

[例 1-1] 在图 1-5 所示的电路中, $E=1\text{V}$, $R=2\text{k}\Omega$,二极管的正向压降 $U_D=0.6\text{V}$,当 U_i 分别等于 0V 、 3V 、 12V 时,对应的输出电压 U_o 和二极管电流 I_D 各为多少?

解:先设二极管在电路中被断开,从开路电压来判断二极管的状态。设此开路电压为 U'_D ,则建立 KVL 方程:

$$E + U_R + U'_D = U_i$$

开路时, $U_R=0$,则

$$U'_D = U_i - E$$

若要二极管处于导通状态,应有 $U'_D \geq U_D$,即 $U_i - 1 \geq 0.6\text{V}$,亦即 $U_i \geq 1.6\text{V}$ 。

(1) $U_i=0\text{V}$ 时,二极管截止,此时

$$U_o = -E = -1\text{V}, \quad I_D = 0$$

(2) $U_i=3\text{V} > 1.6\text{V}$,二极管导通,此时

$$U_o = U_i - E = 3 - 1 = 2\text{V}, \quad I_D = \frac{2 - 0.6}{2} = 0.7\text{mA}$$

(3) $U_i=12\text{V} > 1.6\text{V}$,二极管导通,此时

$$U_o = 12 - 1 = 11\text{V}, \quad I_D = \frac{11 - 0.6}{2} = 5.2\text{mA}$$

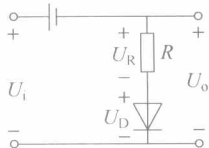


图 1-5 例 1-1 图

1.2.5 半导体二极管的测量与选用

对二极管的极性与好坏进行测量,是正确选用二极管及保证电路质量的前提。工程方法通常使用万用表 $R \times 100$ 或 $R \times 1\text{k}\Omega$ 挡,测得电阻小时,黑表笔对应的管脚为正极,红表笔对应的管脚为负极。进行质量测量时,交换表笔分别测量正反向电阻,结论如下:

- (1) 两次测量正反向电阻相差最大,质量好;
- (2) 两次测量正反向电阻接近或相等,失效;
- (3) 两次测量正反向电阻无穷大,断路;
- (4) 两次测量正反向电阻等于零,短路。

选用二极管时应注意以下几方面:

(1) 引出线弯角处距根部应大于 2mm ,焊接处距根部应大于 5mm ,焊接时间应小于 3s ,烙铁功率应不大于 60W 。

(2) 在高频和脉冲电路中使用,引出线应尽量短,最好是贴板焊接。

(3) 对整流二极管反向电压应降低 20% 使用,并避免瞬间或长时间过电压。工作在容性负载时,其额定整流电流应降低 20% 使用。

(4) 在进行串联或并联使用时,根据实际需要决定是否采用均恒装置。串联时其均压电阻 $R_j \leq 1.2R_F$ (其中 R_F 为整流元件反向电阻)。

(5) 大功率整流元件要满足散热条件。

1.2.6 特殊半导体二极管

1. 稳压二极管

稳压管是利用 PN 结的反向击穿特性制成的一种特殊的二极管。利用稳压二极管可以构成简单的稳压电路,使负载电阻上得到比较稳定的输出电压。图 1-6(a)、(b)所示分别为稳压二极管的符号和特性曲线。稳压管的主要参数如下:

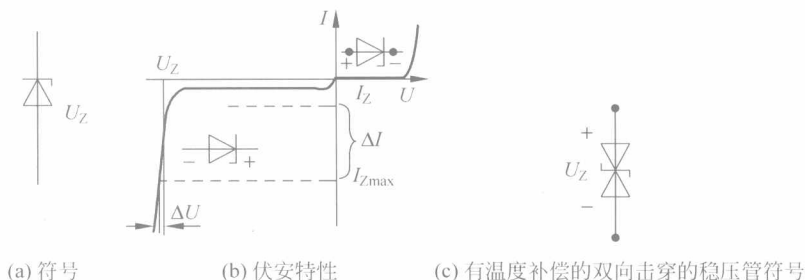


图 1-6 稳压管伏安特性及符号

(1) 稳定电压 U_Z

U_Z 指稳压管中的反向电流达到规定值时,稳压管两端的反向电压值。由于工艺方面的原因,即使是同一型号的管子, U_Z 的差别可能也较大。

(2) 稳定电流 I_Z

I_Z 指稳压管在稳定电压时的工作电流,其范围在 $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ 之间,其中最小稳定电流 I_{Zmin} 是指稳压管进入反向击穿区时的转折点电流。若稳压管的反向电流小于 I_Z ,电压随电流变化较大,稳压效果不好;若稳压管的反向电流在一定范围内大于此值,则稳压效果较好。

(3) 动态电阻 r_Z

在稳压工作范围内,稳压管两端电压变化量与通过管子的电流变化量之比,即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (1-4)$$

r_Z 也称交流电阻。管子的击穿特性越陡, r_Z 越小,稳压管的稳压性能越好。一般稳压管的 r_Z 约为几欧姆至几十欧姆。

(4) 最大耗散功率 P_{ZM} 与最大工作电流 I_{Zmax}

稳压管在稳压工作时,允许耗散功率的最大值称最大耗散功率 P_{ZM} 。若实际功耗超出 P_{ZM} ,稳压管会因温升过高而损坏。最大稳定电流 I_{Zmax} 是指稳压管长期工作时允许通过的最大反向电流。因为稳定电压值是一定的,所以稳压管工作时受到最大工作电流 I_{Zmax} 的限制,其工作电流应小于 I_{Zmax} 。 $P_{ZM} = U_Z I_{Zmax}$ 。

(5) 温度系数 α

温度系数是表征稳定电压 U_Z 受温度影响的参数,其定义为:当稳压管电流为规定电流时,温度每升高 1°C 时稳定电压 U_Z 的相对变化量,即

$$\alpha = \frac{\Delta U_Z}{U_Z \Delta T} \times 100\% (^{\circ}\text{C}) \quad (1-5)$$