

新编电气与电子信息类本科规划教材·电子电气基础课程

电路与电子技术

(中册·模拟电子技术)(第2版)

张纪成 主编

李燕荣 李冰 副主编



電子工業出版社·

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

● 新编电气与电子信息类本科规划教材 · 电子电气基础课程

电路与电子技术

(中册 · 模拟电子技术)

(第 2 版)

张纪成 主编

李燕荣 李 冰 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本套书分为上、中、下三册,上册为电路原理部分,中册为模拟电子技术部分,下册为数字电子技术部分。中册内容包括:半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、集成运算放大器、运算放大器的应用、正弦波振荡电路、稳压电源,共7章。本书内容丰富,语言流畅,通俗易懂,重点突出,保证基础,立足应用。每章都有丰富的例题和习题,各章前有概述、后有小结,书后有部分习题答案。

本书适合作为电子、电气、自动化、通信、计算机、机电一体化等专业本科生、大专生及成人教育多学时教材或参考书,还可供工程技术人员自学使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术. 中册,模拟电子技术/张纪成主编. 2版. —北京:电子工业出版社,2007.9

新编电气与电子信息类本科规划教材. 电子电气基础课程

ISBN 978-7-121-04432-8

I. 电… II. 张… III. ①电路理论—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材 ③模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TM13 TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 136808 号

责任编辑:冉 哲

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市万和装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:360 千字

印 次:2007 年 9 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:19.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本书第1版自2002年出版以来,已历时5个春秋。此期间,电子技术发展迅速,新技术、新工艺、新产品日新月异,有些刚刚问世,不久却成了明日黄花;另外,教学内容与课程体系改革进一步深入发展,所以教材内容应该适当取舍、修改,使教材日臻完善,以满足课堂教学的需要,跟上时代的步伐。

本次修订除满足课程基本需要外,还充分考虑了培养21世纪人才所具备的条件——基础扎实、知识面宽、能力强、素质高等,所以修订中仍注意保持第1版的特色:突出基本理论、基本知识、基本技能;反映现代电子技术中的新发展、新成果、新产品及新技术;加强电子技术应用,重点介绍常用集成电路芯片的功能及使用方法;配以适量例题及习题,以求理论联系实际;将“电路与电子技术”一书分成上、中、下三册,即“电路原理”、“模拟电子技术”和“数字电子技术”。除此之外,本次修订更重视创新能力的培养,为此,我们进行了精心策划、精心设计、精心取材,力求定义准确、概念明确、阐述清楚、深入浅出、图文并茂,增强可读性,便于读者自学。

对于“电路与电子技术(中册·模拟电子技术)”具体修改内容如下。

(1)将原第2章“基本放大电路”分成两章,新的第2章由原2.1~2.5节及新增加的内容构成,包括基本放大电路组成、基本放大电路的静态分析、基本放大电路的动态分析、静态工作点的稳定、三种放大电路分析、场效应管放大电路。

(2)第3章由原第2章的2.6~2.10节组成,包括阻容耦合放大电路、直流放大电路、放大电路中的负反馈、差分放大电路、功率放大电路等内容。

(3)将原第3章“运算放大器”分成两章,新的第4章由原3.1和3.6节组成,包括集成运算放大器的简单介绍、运算放大器应用中应该注意的问题、扩大输出电路、数字电位器在运算放大器中的应用等内容。

(4)新的第5章“运算放大器的应用”由原3.2~3.5节组成,包括运算放大器在信号运算方面的应用、运算放大器在信号处理方面的应用、运算放大器在波形发生器方面的应用、运算放大器在信号变换方面的应用。

(5)新的第1章、第6章、第7章分别为原第1章、第4章、第5章经修改后构成。

修订后的内容除力求满足前面的要求外,结构更加合理,更具有科学性、完整性、先进性;不仅具有理论性,又具有技术与应用性。

参加本书修订工作的有张纪成(第1,2章、第3章部分内容)、魏永继(第3章部分内容、第7章部分内容)、张兴会(第4章、第5章部分内容)、李冰(第3章部分内容、第6章)、李燕荣

(第5章部分内容、第7章部分内容、部分习题及答案),许景春负责收集、整理资料。张纪成任主编,负责全书的策划、组织、统稿和订稿,李燕荣、李冰任副主编,协助主编工作。

在本书的修订过程中,得到了电子工业出版社高等教育分社编辑的指导与帮助,在此表示诚挚的感谢。另外,也对几年来关心和支持我们的读者深表谢意。

由于时间仓促,水平有限,本书虽经修改但可能还会有疏漏或错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2007年7月

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体器件的基本知识	(1)
1.1.1 半导体器件的导电特性	(1)
1.1.2 本征半导体	(1)
1.1.3 杂质半导体	(2)
1.2 PN 结	(3)
1.2.1 PN 结的形成	(3)
1.2.2 PN 结单向导电特性	(5)
1.3 半导体二极管	(6)
1.3.1 半导体二极管的基本结构	(6)
1.3.2 半导体二极管的伏安特性	(6)
1.3.3 半导体二极管的主要参数	(7)
1.4 特殊二极管	(9)
1.4.1 稳压管	(9)
1.4.2 光电器件	(11)
1.4.3 光电耦合器	(13)
1.5 半导体三极管	(13)
1.5.1 半导体三极管的基本结构	(13)
1.5.2 半导体三极管的电流分配与放大原理	(14)
1.5.3 特性曲线	(16)
1.5.4 半导体三极管的主要参数	(18)
1.5.5 半导体三极管的选择	(20)
1.6 场效应管	(20)
1.6.1 N 沟道增强型绝缘栅场效应管	(20)
1.6.2 N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管	(23)
1.6.3 P 沟道绝缘栅场效应管	(24)
1.6.4 场效应管主要参数	(24)
本章小结	(25)
习题 1	(25)
第 2 章 基本放大电路	(28)
2.1 基本放大电路的组成	(28)
2.1.1 共发射极基本放大电路	(28)
2.1.2 共发射极基本放大电路的化简	(28)
2.2 基本放大电路的静态分析	(29)

2.2.1	估算法	(29)
2.2.2	图解法	(29)
2.2.3	静态工作点的调整	(30)
2.3	基本放大电路的动态分析	(31)
2.3.1	微变等效电路	(31)
2.3.2	电压放大倍数	(32)
2.3.3	动态电阻	(33)
2.3.4	基本放大电路图解分析	(35)
2.4	静态工作点的稳定	(38)
2.4.1	温度对静态工作点稳定的影响	(38)
2.4.2	分压式偏置电路	(39)
2.4.3	静态分析	(39)
2.4.4	稳定静态工作点的原理	(41)
2.4.5	动态分析	(41)
2.5	三种放大电路分析	(43)
2.5.1	共集电极放大电路	(43)
* 2.5.2	共基极放大电路	(47)
* 2.5.3	三种放大电路比较	(49)
2.6	场效应管放大电路	(51)
2.6.1	静态分析	(51)
2.6.2	动态分析	(53)
	本章小结	(55)
	习题 2	(55)
第 3 章	多级放大电路	(58)
3.1	阻容耦合放大电路	(58)
3.1.1	概述	(58)
3.1.2	阻容耦合放大电路的组成	(58)
3.1.3	阻容耦合放大电路的分析	(59)
3.1.4	阻容耦合放大电路的频率特性	(62)
3.2	直流放大电路	(63)
3.2.1	直接耦合放大电路的分析	(63)
3.2.2	产生零点漂移的主要因素	(66)
3.2.3	调制式直流放大电路	(69)
3.3	放大电路中的负反馈	(71)
3.3.1	放大电路负反馈的基本概念	(71)
3.3.2	负反馈放大电路的组态	(74)
3.3.3	负反馈对放大电路工作性能的影响	(76)
3.4	差分放大电路	(80)
3.4.1	差分放大电路分析	(80)
3.4.2	典型的差分放大电路	(83)

3.5 功率放大电路	(88)
3.5.1 最简单的功率放大电路——射极输出器	(88)
3.5.2 互补对称功率放大电路	(89)
* 3.5.3 大功率功率放大电路	(91)
* 3.5.4 功率放大电路(OCL)介绍	(91)
3.6 集成功率放大电路	(93)
本章小结	(94)
习题3	(94)
第4章 集成运算放大器	(97)
4.1 集成运算放大器的简单介绍	(97)
4.1.1 概述	(97)
4.1.2 集成运算放大器的特点	(98)
4.1.3 集成运算放大器的基本组成	(99)
4.1.4 集成运算放大器的主要参数及其简要测试方法	(100)
4.1.5 理想集成运算放大器及其基本组态	(104)
4.2 运算放大器使用中应该注意的问题	(109)
4.2.1 运算放大器的选择	(109)
4.2.2 运算放大器参数特性的老化和筛选	(111)
4.2.3 运算放大器自激的消除	(112)
4.2.4 运算放大器输出调零	(113)
4.2.5 运算放大器的保护	(115)
4.3 扩大输出电路	(116)
4.4 数字电位器在运算放大器中的应用	(117)
本章小结	(118)
习题4	(119)
第5章 运算放大器的应用	(121)
5.1 运算放大器在信号运算方面的应用	(121)
5.1.1 加法运算放大器	(121)
5.1.2 减法运算放大器	(122)
5.1.3 积分运算放大器	(123)
5.1.4 微分运算放大器	(125)
5.1.5 对数与反对数运算放大器	(126)
* 5.1.6 模拟乘法器运算放大器	(128)
5.2 运算放大器在信号处理方面的应用	(138)
5.2.1 有源滤波器	(139)
5.2.2 采样保持电路	(143)
5.2.3 电压比较器	(145)
5.3 运算放大器在波形发生器方面的应用	(150)
5.3.1 矩形波发生器	(151)
5.3.2 三角形波发生器	(151)

5.3.3 锯齿波发生器	(152)
5.3.4 正弦波发生器	(153)
5.4 运算放大器在信号变换方面的应用	(155)
5.4.1 电压-时间模数变换器	(155)
5.4.2 电压-频率变换电路	(156)
本章小结	(160)
习题 5	(160)
第 6 章 正弦波振荡电路	(165)
6.1 正弦振荡电路的基础知识	(165)
6.1.1 振荡条件	(165)
6.1.2 起振条件	(166)
6.1.3 正弦振荡电路的基本组成	(166)
6.1.4 正弦振荡电路的分析方法	(166)
6.2 RC 正弦波振荡电路	(166)
6.2.1 RC 串并网络的频率特性	(166)
6.2.2 RC 正弦波振荡电路的构成	(167)
6.3 LC 正弦振荡电路	(168)
6.3.1 LC 并联回路的基本特性	(168)
6.3.2 变压器反馈式 LC 正弦波振荡电路	(169)
6.3.3 电感三点式正弦振荡电路	(170)
6.3.4 电容三点式正弦振荡电路	(171)
6.4 石英晶体振荡器	(171)
6.4.1 石英晶体的基础知识	(172)
6.4.2 石英晶体正弦振荡电路	(173)
本章小结	(174)
习题 6	(174)
第 7 章 稳压电源	(177)
7.1 电源概述	(177)
7.1.1 电源装置的种类	(177)
7.1.2 稳压电源的发展概况	(178)
7.1.3 稳压电源的主要指标	(178)
7.2 直流稳压电源	(179)
7.2.1 直流稳压原理	(179)
7.2.2 直流稳压电路的组成	(180)
7.2.3 性能较好的稳压电源	(191)
7.3 集成稳压电源	(191)
7.3.1 多端输出电压可调集成稳压器	(191)
7.3.2 三端固定输出集成稳压器	(193)
7.4 开关型稳压电源	(198)
7.4.1 开关电源的基本原理	(198)

7.4.2	脉冲变压器耦合开关稳压电路	(198)
7.4.3	开关稳压电源的基本组成	(199)
7.4.4	开关稳压电源的优点	(201)
7.4.5	集成开关稳压电源设计实例	(201)
7.5	UPS 电源	(202)
7.5.1	不停电电源的种类	(202)
7.5.2	UPS 电源的基本工作原理	(202)
7.5.3	后备式 UPS 电源和在线式 UPS 电源的区别	(203)
本章小结		(205)
习题 7		(206)
附录 A 半导体器件型号命名方法		(208)
附录 B 常用半导体器件的参数		(209)
附录 C 部分国产集成运算放大器参数表		(212)
附录 D 国内、外集成运算放大器型号对照表		(213)
附录 E 国产半导体集成电路型号命名法		(215)
附录 F 部分习题答案		(217)

注:加“*”号的酌情选读

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器件,它是现代电子技术的主要组成部分。半导体器件具有体积小、重量轻、耗电少、寿命长、工作可靠等突出优点,因而在现代科学技术各个领域得到广泛应用。随着电子技术的飞速发展,各种新型半导体器件不断产生,尤其是大规模和超大规模集成电路不断更新换代,使电子仪器或设备趋于微型化,各种性能指标有了较大提高,因此电子技术处于当代高新技术不可取代的先导地位。

本章首先简要介绍半导体的基本知识,然后重点讨论半导体器件的PN结、物理特性、工作原理、特性曲线和工作参数,最后介绍几种不同类型的半导体器件。

1.1 半导体器件的基本知识

1.1.1 半导体器件的导电特性

自然界中物质种类繁多,就其导电性能而言,大体可分为导体、绝缘体及半导体三类。金、银、铜、铝、银等金属材料都是良导体,电阻率在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间;而云母、塑料、陶瓷、橡胶等物质的电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,很难导电,所以称为绝缘体。另一类材料为半导体,因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间,由此得名,如半导体硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等;其他掺杂或制成其他化合物半导体材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中,目前最常用的半导体材料是硅。半导体电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。

除此之外,半导体材料还具有如下特性。

(1)在纯净半导体中掺入微量的某种杂质,如在纯净硅中掺入百万分之一的硼后,电阻率从 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 降到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 左右,它的导电能力可增加百万倍。

(2)环境温度升高时,半导体材料的导电率会明显增加,可以利用这种热敏效应制成各种热敏元件。

(3)光照不仅可以改变半导体的导电率,还可以产生电动势。利用半导体的光电效应可制成光敏电阻、光电池、光敏二极管、光敏三极管等,为人类利用太阳能提供广阔前景。

(4)一些半导体材料还具有压敏、气敏等特性。

半导体材料具有上述特性的原因在于半导体特殊的导电机理。

1.1.2 本征半导体

1. 半导体的晶体结构

构成半导体器件的材料中,最多的是硅,其次是锗,其原子结构中各有4个价电子,都是四价元素,其原子呈中性,如图1.1所示。外层价电子受原子核束缚最小,半导体的导电性质与价电子有关。原子排列既整齐又紧密,原子间的外层轨道产生交叠。原来属于每个原子的价电子可以转移到相邻的原子中;这些电子为整个晶体的所有原子共有,这一特征称为电子的共

有化运动。如图 1.2 所示,两相邻原子各有一个价电子为两个原子直接共有,形成晶格中原子间的一种组成结构,这种结构称为“共价键”,图中为“共价键”平面结构。

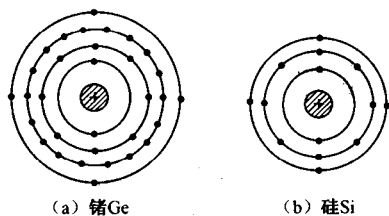


图 1.1 硅和锗的原子结构简化模型

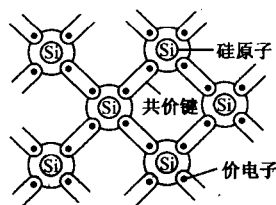


图 1.2 硅的二维晶体结构

值得注意的是,硅或锗的晶体结构是由三维空间内规则排列的、重复的单元晶格组成的。单元晶格为立体结构,每个顶点有一个原子。

2. 本征半导体

本征半导体是完全纯净的,具有完整晶体结构的半导体。在本征半导体晶体结构中,原子最外层共有 8 个价电子,处于较为稳定的状态。但是共价键中的电子不像在绝缘体中的价电子那样被束缚得很紧。在热力学温度 $T=0\text{ K}$ (K 为开尔文) 和没有外界影响的条件下,它的价电子均束缚在共价键中,不存在自由运动的电子。但当温度升高,如上升到室温,或者受到光线照射时,某些共价键中的价电子从外界获得了足够的能量,从而挣脱共价键的束缚,离开原子而成为自由电子,同时在共价键中留下相同数量的空位,这种现象称为本征激发,如图 1.3 所示。

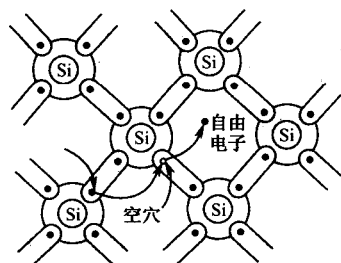


图 1.3 空穴和自由电子形成

当电子挣脱共价键束缚成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,这个空位称为空穴。在一般情况下,原子呈中性。但当电子挣脱共价键束缚而成为自由电子后,原子的中性便被破坏,呈现带正电特性。

在外加电场或其他能源的作用下,有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子填补这个空穴,而这个电子原来的位置即共价键中出现另一个空穴,它也可以由相邻原子中的价电子递补,在该原子中又出现一个空穴,如此继续下去,使共价键中出现一定的电荷迁移。空穴与电子的运动方向相反。

空穴运动相当于正电荷运动。

这样,当半导体两端外加电压时,半导体中将出现两部分电流:一部分是自由电子定向运动形成的电子电流,另一部分是共价键中价电子递补空穴形成的空穴电流。这里空穴可以看成带正电的电荷,其电量与电子相等,符号相反。在外电场作用下,可以在半导体中自由地运动,并形成导电电流。因此,自由电子和空穴都称为载流子。

但是,在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现的,同时又不断复合。因此在任何时刻,本征半导体中自由电子和空穴的总数相等,只不过总数是非常小的。随着温度升高,由热激发产生的电子与空穴对数目增加,导电性能提高,所以温度对半导体器件的性能影响很大。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体中电子、空穴对非常少,导电性能很差。若在本征半导体中掺入微量杂质,即

其他元素,就会使半导体的导电性能发生显著变化。

由于掺入杂质不同,杂质半导体可分为 P 型半导体和 N 型半导体两大类。

1. P 型半导体

在硅或锗的本征半导体中掺入微量的三价元素硼(或铝、镓等),如图 1.4(a)所示,其杂质硼原子只有三个价电子,与周围的硅原子形成共价键结构。由于硼原子数目比硅原子少得多,因此整个晶体结构基本不变,只是某些位置上的硅原子被硼原子取代了。但是,在形成的共价键结构中,其中一个键上缺少一个电子,而产生一个空穴,如图 1.4(b)所示。硼杂质的每个原子都可能提供一个空穴,因而使掺入杂质的硅中的空穴大为增加。这种杂质半导体主要靠空穴导电,空穴为多数载流子,电子为少数载流子。所以这种半导体称为空穴型半导体或 P 型半导体。在共价键结构中,相邻共价键结构中的价电子受到热激发或在其他激发条件下获得能量时,可能填补这个空位,使硼原子成为不能移动的负离子,原来的硅原子形成空穴,半导体呈现中性。

由图 1.4 可见,硼原子因接受电子称为受主杂质或 P 型杂质。

注意:① P 型半导体中空穴移动时,并不产生新的自由电子,只是原来晶体本身产生少量电子—空穴对。② P 型半导体中空穴数量的多少取决于掺入杂质的多少。

2. N 型半导体

在硅或锗的晶体中掺入五价元素磷(或砷、锑等),如图 1.5(a)所示。杂质原子取代晶格中某些硅原子的位置,它的 5 个价电子中,有 4 个与周围的硅原子形成共价键,有一个价电子处于共价键之外。杂质原子对这个多余价电子束缚力较弱。在室温下,这个多余的价电子能被激发成自由电子,因此杂质原子变成带正电荷的离子。杂质原子可以提供电子,故称为施主原子或施主杂质,即 N 型杂质。含有 N 型杂质的半导体称为 N 型半导体,如图 1.5(b)所示。在这种杂质半导体中,电子浓度比同一温度下的本征半导体的电子浓度高许多倍,从而大大加强了半导体的导电能力。因此 N 型半导体中,电子为多数载流子,空穴为少数载流子。

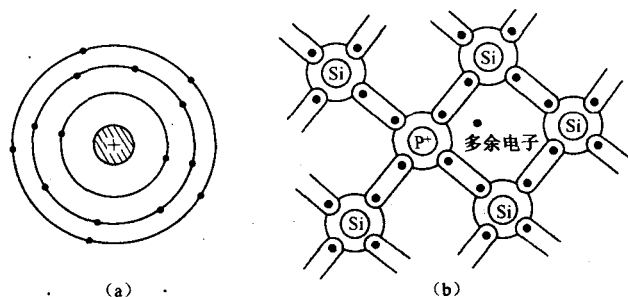


图 1.5 硅晶体中掺磷出现自由电子

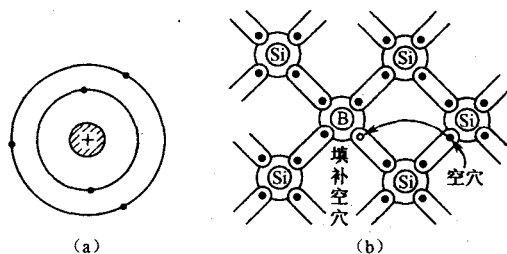


图 1.4 硅晶体中掺硼形成空穴

1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成

本征半导体掺杂后,形成了 P 型或 N 型半导体。在室温下,受主杂质电离为带正电的空穴和带负电的受主负离子,施主杂质电离为带负电的自由电子和带正电的施主离子。除此之

外,P型和N型半导体中还有受本征激发产生的电子和空穴对,但是其数目较P型半导体中的空穴或者N型半导体中的电子少得多。

应该注意,半导体中正负电荷数目是相等的,它们的作用互相抵消,因而保持电中性。所以不论P型硅还是N型硅,都不能直接用于制造半导体器。通常在一块晶体上,采用掺杂工艺形成P型和N型半导体,在其交接处形成PN结。PN结是制成各种半导体器件的基础。

在一块晶片上,可以同时制成P型和N型半导体。P型半导体含有受主杂质,多数载流子是空穴,少数载流子是电子。N型半导体含有施主杂质,则多数载流子是电子,而少数载流子是空穴。这里少数载流子是指本征激发产生的载流子。

在P型半导体和N型半导体结合后,交界面两侧就出现多数载流子电子和空穴浓度的差别,N型区内电子多,空穴少;P型区内空穴多,电子少。这种浓度差导致N型区的电子向P型区运动,P型区的空穴向N型区移动,如图1.6所示。扩散到P型区的电子与空穴复合而消失,同时,P型区的空穴扩散到N型区后与电子复合。因此,在交界面附近区域,不论N型区还是P型区,原先的电中性都被破坏了。P型区失去空穴,留下了带负电的杂质离子,用 $\ominus$ 表示;N型区失去了电子,留下了带正电的杂质离子,用 $\oplus$ 表示。半导体中的离子虽然带有正电或负电,但是它们是不可任意移动的,因此并不参与导电。这些不可移动的带电粒子称为空间电荷,它们集中在N型区和P型区交界面附近,并形成很薄的空间电荷区,这个区域称为PN结。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并被复合而消失,或者说消耗尽了,所以空间电荷区也称耗尽区。这个区域载流子极少,电阻率很高。

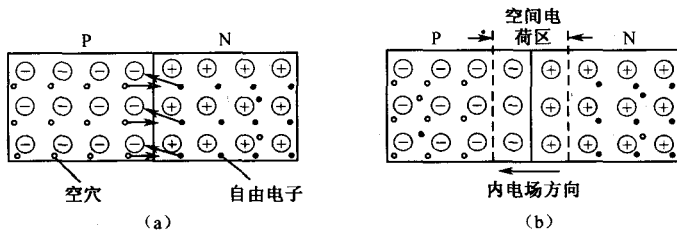


图 1.6 PN 结的形成

出现空间电荷区后,自然形成电场,由N型区指向P型区,称之为内电场。内电场方向与多数载流子的扩散方向相反,使得交界区附近空间电荷区加宽,电场增强,扩散阻力增大,阻挡扩散运动。所以有时也称空间电荷区为阻挡层。另一方面,内电场可以推动P型区内的少数载流子(自由电子)和N型区内的少数载流子(空穴)使之越过空间电荷区向对方运动。这种在内电场作用下,少数载流子有规则的运动称为漂移运动。漂移运动方向与扩散运动方向相反。从N型区漂移到P型区的空穴补充了原来交界区上失去的空穴,而从P型区漂移到N型区的电子补充了交界区失去的电子,从而使空间电荷减少,空间电荷区变窄,其作用正好与扩散运动相反。

由此可见,扩散运动与漂移运动互相联系,又相互矛盾。扩散运动使空间电荷区加宽,内电场增强,对扩散运动阻力加大;漂移运动使空间电荷区变窄,电场减弱,易于扩散。最后扩散运动和漂移运动达到动态平衡,使得P型区的多数载流子(空穴)向N型区扩散的数量与N型区的少数载流子(空穴)向P型区漂移的数量相等(自由电子也如此)。达到动态平衡后,空间电荷区的宽度基本上稳定,即PN结也处于稳定状态。

1.2.2 PN 结单向导电特性

当 PN 结在无外加电压时,半导体的扩散和漂移运动处于动态平衡。下面讨论外加电压情况。

1. 外加正向电压

在图 1.7 中,P 型区接电源的正极,N 型区接电源的负极,形成的外加电场与 PN 结内部电场方向相反,打破了 PN 结的平衡状态。在外电场作用下,P 型区的多数载流子(空穴)进入空间电荷区,抵消部分 N 型区的负空间电荷。同时 N 型区的自由电子进入空间电荷区,抵消部分 P 型区的正空间电荷,致使空间电荷区变窄,内电场被削弱,耗尽层载流子增加,电阻减小。多数载流子的扩散运动增强,形成较大的扩散电流,即正向电流,所以这个方向的外加电压称为正向偏置,如图 1.7(a)所示。这时扩散运动大于漂移运动,N 型区电子不断扩散到 P 型区,P 型区空穴不断扩散到 N 型区,PN 结内的电流由扩散电流决定。在外电路上形成流入 P 型区的电流,称为正向电流 I 。当外加电压增大时,PN 结内电场进一步减弱,扩散电流随之增大。在正常工作范围内,PN 结上外加电压只要稍有变化,便能引起电流的显著变化,即外加电压增大,则正向电流显著增大。

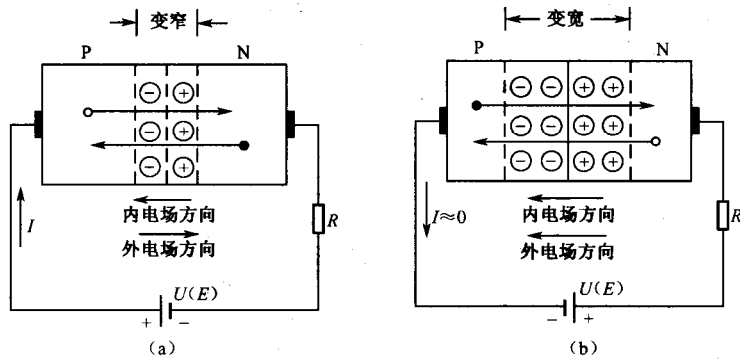


图 1.7 PN 结外加电压

当外加正向电压时,少数载流子形成的漂移电流方向与扩散电流方向相反,漂移电流数值很小,忽略不计。

2. 外加反向电压

将外加电压正极接 N 型区,负极接 P 型区,如图 1.7(b)所示,在 PN 结上形成的外加电场的方向与 PN 结内电场方向一致,破坏了扩散与漂移运动的平衡。在这种外加电场的作用下,P 型区内的空穴和 N 型区内电子离开 PN 结,使空间电荷增加,空间电荷区变宽,内电场增强。此时 PN 结处于反向偏置,使得多数载流子扩散运动难于进行。另一方面,内电场增强也加强了少数载流子的漂移运动。在外电场的作用下,N 型区中的少数载流子(空穴)越过 PN 结进入 P 型区,P 型区中的少数载流子(自由电子)越过 PN 结进入 N 型区,在电路中形成反向电流。但是少数载流子数量很少,因此反向电流很微弱,一般为微安数量级。少数载流子是由价电子获得热能,挣脱共价键的束缚而产生的。环境温度越高,少数载流子数量越多,所以温度对反向电流影响很大。

因此,PN 结在反向偏置时,呈现很大的电阻,此时基本不导电。PN 结在正向偏置时,PN 结电阻很小,正向电流很大。所以 PN 结具有单向导电性。

1.3 半导体二极管

1.3.1 半导体二极管的基本结构

半导体二极管是由 PN 结加上相应的电极引线,并外加管壳密封而成的。目前制成的半导体二极管就其结构而言,可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管如图 1.8(a)所示。由图可见,它由一根很细的金属触丝(如三价元素铝)和一块半导体(如锗)表面接触,然后在正方向瞬时通过大电流,使金属触丝和半导体熔接在一起,并且形成了 PN 结。这种 PN 结面积很小,极间电容小,并且不能承受高的反向电压和大电流。但它的高频性能好,可以用于高频检波和数字电路中的开关器件,也可以用于小功率整流等。

面接触型或面结型二极管的 PN 结采用金属扩散法或合金法制成,其结构如图 1.8(b)所示。将铝球置于 N 型硅片上,加热使之熔化,与铝球接触的硅片有部分熔入液体铝球中,成为铝合金熔液。温度降低时,溶解在铝球里的硅原子沿着 N 型硅的边缘重新结晶,结晶成的固体硅含有大量铝原子,相当于在硅中掺入大量三价杂质。这部分结晶硅成为 P 型硅,称为 P 型再结晶层,它与 N 型硅形成 PN 结。这种二极管 PN 结面积大,可承受较大的电流,极间电容也大,因此适用于大功率整流低频电路。二极管的符号如图 1.8(c)所示。

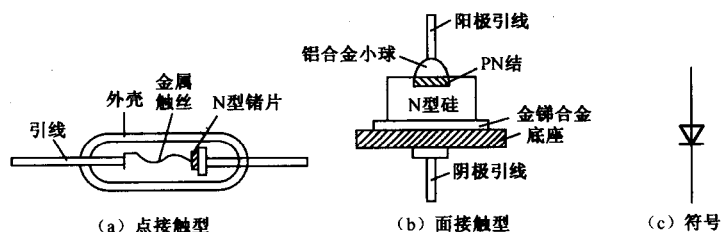


图 1.8 半导体二极管

1.3.2 半导体二极管的伏安特性

二极管两端的电压与通过的电流之间的关系可用伏安特性曲线加以说明。其伏安特性曲线

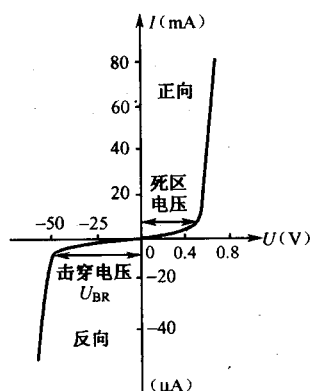


图 1.9 二极管特性曲线

线是用图示仪或采用逐点测量方法测绘出来的,硅二极管 2CP10 伏安特性曲线如图 1.9 所示。由图可见,其伏安特性曲线可分为正向特性、反向特性和反向击穿特性三部分,下面分别加以讨论。

1. 正向特性

二极管是用 PN 结制成的,具有单向导电性。由图 1.9 可见,在加以较低的正向电压,如零点几伏电压时,流过二极管的电流很大,因此其正向电阻很小。

在伏安特性起始部分,当正向电压较小时,加在 PN 结两端的外电场还不足以克服 PN 结内电场。因此,这时的正向电流几乎为零,二极管呈现大的内阻。当正向电压超过一定数值后,其外电场大大加强,使得内部电场被抵消,电流迅速增大。

这里的一定数值正向电压称为死区电压或门限电压,其值大小与环境温度及材料有关。锗管死区电压约为 0.2 V,硅管死区电压约为 0.5 V。

2. 反向特性

当二极管加以反向电压时,P 型半导体中的少数载流子(电子)和 N 型半导体中的少数载流子(空穴)易于漂移运动,通过 PN 结形成很小的反向饱和电流,这种电流随着温度上升而增大。这是由于少数载流子的数目随着温度的增加按指数规律增长。并且这种电流基本上不随反向电压增大而增大,与反向电压大小无关,电流已达到饱和,所以称为反向饱和电流。

一般硅管的反向饱和电流很小,锗管反向饱和电流较大。例如,硅管 2CK 系列,在常温下,反向饱和电流小于 $1\ \mu\text{A}$;而锗管 2AP 系列,在常温下,反向饱和电流为 $100\ \mu\text{A}$ 。

3. 反向击穿特性

在温度一定的条件下,当反向电压增大时,少数载流子数目有限,所以开始一段的反向电流变化不大。当反向电压增大到一定值时,反向电流剧增,此时二极管被反向电压击穿,即电击穿,如图 1.9 所示。产生反向击穿时,加在二极管两端的反向电压称为反向击穿电压。击穿时,反向电流很大,电压又很高,因此消耗在 PN 结上的功率很大,容易使 PN 结发热,超过它的耗散功率而过渡到热击穿。结温升高使反向电流更大,促使结温进一步升高,从而很快使 PN 结烧毁。

产生 PN 结电击穿的原因是,在强电压的作用下,大大增加了自由电子和空穴的数目,引起反向电流的急剧增大,产生反向击穿。击穿又分为如下两种类型。

(1) 雪崩击穿。当 PN 结反向电压增大时,空间电荷区中的电场随之增强。通过空间电荷区的电子和空穴,在电场作用下,获得的能量增大,它又碰撞其他原子。当电子和空穴能量足够大时,碰撞可使共价键中的电子激发形成新的电子空穴对,这是载流子的倍增效应。在反向电压增大到某一值时,载流子倍增好似在陡峭雪山的山坡上发生雪崩一样,载流子增加得很多,反向电流急剧增大,于是 PN 结发生雪崩击穿。

(2) 齐纳击穿。当 PN 结两边掺杂密度很大时,在 PN 结加有较大的反向电压情况下,PN 结空间电荷区中存在着强的电场。它能够破坏共价键,将束缚电子分离出来,造成电子空穴对增加,形成较大的反向电流,产生击穿现象。

一般,二极管的击穿多数是雪崩击穿,只有特殊二极管(如稳压管)才会产生齐纳击穿。

应该指出,雪崩击穿和齐纳击穿都属于电击穿,电击穿是可逆的。一旦反向电压减小,管子可恢复原来状态。但是反向电流与反向电压之积不能超过 PN 结允许的耗散功率,否则会出现热击穿,使管子烧坏,因此必须避免。

1.3.3 半导体二极管的主要参数

1. 主要参数

二极管特性除用伏安特性曲线表示外,还可以用一些数据定量描述,这些数据即为二极管参数。

(1) 最大整流电流 I_{OM} 。最大整流电流是指二极管长时间使用时,允许流过它的最大正向平均电流。电流流过 PN 结要引起管子发热,电流超过允许值时,将使 PN 结过热,造成管子损坏。例如,2CP10 型硅二极管的最大整流电流为 $100\ \text{mA}$ 。

(2) 反向击穿电压 U_{BR} 。指二极管反向击穿时的电压值。击穿时,反向电流剧增,破坏了二极管单向导电性,并且二极管因过热而烧坏。