



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

模拟电子技术

主 编 张绪光 刘在娥



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

模拟电子技术

主 编 张绪光 刘在娥

副主编 盛 莉 王晓芳 王佐勋



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书主要包括：二极管及其应用电路、晶体管及其放大电路、场效应晶体管及其放大电路、多级放大电路、放大电路的频率响应、集成运算放大器、放大电路中的负反馈、波形发生和变换电路、功率放大电路和直流稳压电源。

本书编写风格新颖、活泼，引例准确、有趣，内容翔实、实用。

本书适合作为本科院校电气信息类专业的教材，也可作为高职高专相关专业的教材，并可供相关专业的科技人员作为参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/张绪光, 刘在娥主编. —北京: 北京大学出版社, 2010.9

(21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-17700-6

I. ①模… II. ①张…②刘… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 167304 号

书 名: 模拟电子技术

著作责任者: 张绪光 刘在娥 主编

策划编辑: 李 虎

责任编辑: 魏红梅

标准书号: ISBN 978-7-301-17700-6/TP · 1128

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 460 千字

2010 年 9 月第 1 版 2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

模拟电子技术是电气信息类专业非常重要的专业技术基础课程。模拟电子技术发展迅速,应用十分广泛,现代一切新的科学技术无不与电有着密切的关系,尤其是计算机技术的迅猛发展与模拟电子技术的发展更为密不可分。然而,传统的模拟电子技术教材所涉及的数学知识和物理知识较多,深奥的理论知识抽象、难度大,不好掌握,直接影响了学生学习本门课程的积极性,制约了学生对知识的综合应用能力和创新意识的提高。因而在不少读者中出现了“望书生畏”、“欺软怕硬”的不良现象。特别是高校中对于专业课程的教学,教材更需要不断更新教学内容,随时添加最新的科研成果,紧扣时代脉搏,将最新科学知识及时传递给学生,使他们永远站在科学技术最前沿。而目前创新型、实用性的教材可谓寥寥无几,很多教材都是以叙述基本的科学原理为主,而较少考虑典型的科学事实和实例。因此,考虑到对创新型应用人才培养的要求,结合多年的教学实践,组织编写本书。本书的编写力求集“知识性、先进性、实用性和趣味性”于一体,尽可能地避免烦琐而枯燥的公式推导,注重引导和启发读者理解和掌握电路的基本概念、基本理论和基本的分析方法。本书具有以下特色。

- (1) 通俗易懂,读者易于学习掌握。
- (2) 引例具有趣味性,能够激发学生的学习兴趣。
- (3) 易于教师引导和教学。
- (4) 配套具有实用性和趣味性的习题,易于培养学生的工程实践能力和创新能力。
- (5) 为便于教师使用,配有完整系统的教学大纲、教学计划及课件等教学参考资料。

本书内容组织遵循从实践中来,到实践中去的认识规律。力求做到由实例引入,提出问题,再进行理论叙述,最后通过具有实用性、趣味性的习题巩固所学的理论知识。

参加本书编写的有:张绪光(第1章和第9章)、刘在娥(第2章和第7章)、盛莉(第3章和第6章)、王晓芳(第5章和第8章)、王佐勋(第4章和第10章)。全书由张绪光、刘在娥审核定稿。

在本书的编写过程中,得到了许多在教学和科研方面作出突出成绩的教师以及北京大学出版社的有关专家的关心和帮助,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,恳请广大师生和读者批评指正。

编 者
2010年6月

目 录

第 1 章 二极管及其应用电路	1	2.4 放大电路的图解分析法	41
1.1 半导体的基本知识	2	2.4.1 静态图解法	41
1.1.1 本征半导体	2	2.4.2 动态图解法	44
1.1.2 杂质半导体	3	2.5 放大电路的估算法	46
1.2 PN 结	5	2.5.1 估算法求静态工作点	46
1.2.1 PN 结的形成	5	2.5.2 放大电路的等效电路分析法	47
1.2.2 PN 结的单向导电性	6	2.6 静态工作点的稳定	51
1.2.3 PN 结的电流方程	7	2.6.1 温度变化对静态工作点的 影响	51
1.3 二极管	8	2.6.2 典型稳定静态工作点的电路	53
1.3.1 二极管的类型和结构	8	2.7 共集放大电路(射极输出器)的 分析及其应用	56
1.3.2 二极管的伏安特性	9	2.7.1 静态分析	57
1.3.3 二极管的主要参数	10	2.7.2 动态分析	57
1.3.4 特殊二极管	12	2.7.3 共集放大电路的应用	58
1.4 二极管的应用电路	16	2.8 共基放大电路的分析	59
小结	18	2.9 三种基本放大电路的比较	61
习题	19	2.10 放大电路应用实例	62
第 2 章 晶体管及其放大电路	22	2.10.1 光控照明电路	62
2.1 晶体管	23	2.10.2 自动灭火的控制电路	62
2.1.1 晶体管的类型和结构	23	小结	63
2.1.2 晶体管的电流放大原理	24	习题	64
2.1.3 晶体管的输入和输出特性 曲线	27	第 3 章 场效应晶体管及其放大电路	71
2.1.4 晶体管的主要参数	31	3.1 场效应晶体管	72
2.2 晶体管放大电路的组成及其 主要性能指标	33	3.1.1 结型场效应晶体管	72
2.2.1 放大电路的组成	34	3.1.2 绝缘栅型场效应晶体管	76
2.2.2 放大电路的主要性能指标	35	3.1.3 场效应晶体管的主要参数	83
2.3 放大电路的工作原理	38	3.1.4 场效应晶体管与晶体管的 比较	85
2.3.1 静态工作与静态工作点	39	3.2 场效应晶体管放大电路	86
2.3.2 动态工作与放大原理	39	3.2.1 放大电路的三种接法	86
2.3.3 直流通路与交流通路	39	3.2.2 共源放大电路	86



3.2.3 共漏放大电路.....	90	5.3.2 场效应晶体管的高频等效模型.....	129
3.2.4 场效应晶体管放大电路的特点.....	92	5.4 单管放大电路的频率响应.....	130
3.3 场效应晶体管的使用注意事项及应用实例.....	93	5.4.1 晶体管共射放大电路的频率响应.....	130
3.3.1 场效应晶体管的使用注意事项.....	93	5.4.2 场效应晶体管共源放大电路的频率响应.....	136
3.3.2 场效应晶体管应用实例.....	94	5.5 多级放大电路的频率响应.....	138
小结.....	94	5.5.1 多级放大电路的幅频特性和相频特性.....	138
习题.....	96	5.5.2 多级放大电路的上限频率和下限频率.....	139
第4章 多级放大电路.....	100	5.6 应用实例.....	139
4.1 多级放大电路的级间耦合方式.....	101	小结.....	142
4.2 多级放大电路的分析方法.....	102	习题.....	143
4.3 差分放大电路.....	105	第6章 集成运算放大器.....	147
4.3.1 零点漂移.....	105	6.1 集成运算放大器简介.....	148
4.3.2 差分放大电路的组成及其工作原理.....	105	6.1.1 集成运算放大器的组成.....	148
4.3.3 典型差分放大电路.....	107	6.1.2 集成运算放大器的电压传输特性.....	149
4.3.4 改进型差分放大电路.....	113	6.1.3 集成运算放大器的主要性能指标.....	149
4.4 放大电路应用实例.....	114	6.1.4 理想集成运算放大器及其分析依据.....	151
4.4.1 家电防盗报警器电路.....	114	6.2 基本运算电路.....	152
4.4.2 水位自动控制电路.....	115	6.2.1 比例运算电路.....	152
小结.....	115	6.2.2 加法运算电路.....	154
习题.....	117	6.2.3 减法运算电路.....	155
第5章 放大电路的频率响应.....	120	6.2.4 积分运算电路.....	157
5.1 频率响应概述.....	121	6.2.5 微分运算电路.....	158
5.1.1 频率响应的概念.....	121	6.3 模拟乘法器及其应用.....	160
5.1.2 RC 高通、低通电路的频率响应.....	122	6.3.1 模拟乘法器简介.....	160
5.2 波特图.....	124	6.3.2 模拟乘法器的应用.....	161
5.2.1 波特图的概念.....	124	6.4 电压比较器.....	163
5.2.2 RC 高通、低通电路的波特图.....	125	6.4.1 电压比较器概述.....	164
5.3 晶体管与场效应晶体管的高频等效模型.....	126	6.4.2 电压比较器的种类及其特性.....	164
5.3.1 晶体管的高频等效模型.....	126		



6.5 有源滤波电路.....	169	7.5.1 反馈系数的估算	201
6.5.1 滤波电路简介.....	169	7.5.2 电压放大倍数的估算.....	204
6.5.2 低通滤波电路.....	170	7.6 负反馈放大电路的应用.....	205
6.5.3 高通滤波电路.....	172	7.6.1 放大电路中引入负反馈的 原则	206
6.5.4 其他滤波电路.....	173	7.6.2 负反馈放大电路中的 自激振荡	206
6.6 集成运算放大器的使用常识.....	176	7.7 负反馈放大电路应用实例.....	208
6.6.1 集成运算放大器的分类 及其选用	176	小结	209
6.6.2 集成运算放大器的 使用要点	177	习题	210
6.7 集成运算放大器应用实例.....	178	第 8 章 波形发生和变换电路	215
6.7.1 温度-电压变换电路.....	178	8.1 正弦波振荡电路	216
6.7.2 峰值检波电路.....	179	8.1.1 正反馈与自激振荡.....	216
小结	179	8.1.2 RC 正弦波振荡电路	217
习题	183	8.1.3 LC 正弦波振荡电路.....	222
第 7 章 放大电路中的负反馈	190	8.1.4 石英晶体振荡电路.....	229
7.1 反馈的基本概念和类型.....	191	8.2 非正弦波发生电路	233
7.1.1 反馈的基本概念.....	191	8.2.1 矩形波发生电路	233
7.1.2 反馈的类型.....	192	8.2.2 三角波发生电路	236
7.2 反馈类型的判断方法.....	192	8.2.3 锯齿波发生电路	238
7.3 集成运算放大电路中的 四种负反馈组态.....	194	8.3 波形变换电路	241
7.3.1 电压串联负反馈.....	194	8.3.1 三角波到锯齿波变换电路.....	241
7.3.2 电压并联负反馈.....	195	8.3.2 三角波到正弦波变换电路.....	243
7.3.3 电流串联负反馈.....	196	8.4 应用实例	244
7.3.4 电流并联负反馈.....	196	小结	245
7.4 负反馈对放大电路性能的影响.....	197	习题	247
7.4.1 负反馈降低放大倍数.....	197	第 9 章 功率放大电路	253
7.4.2 负反馈可以提高放大倍数 的稳定性	197	9.1 功率放大电路的特点.....	254
7.4.3 负反馈稳定输出电压、 输出电流	198	9.2 变压器耦合功率放大电路.....	255
7.4.4 负反馈对输入、输出电阻的 影响	198	9.2.1 变压器耦合单管功率放大 电路	255
7.4.5 负反馈减小非线性失真.....	199	9.2.2 变压器耦合乙类推挽功率 放大电路	257
7.4.6 负反馈展宽通频带.....	200	9.3 互补对称功率放大电路.....	258
7.5 负反馈放大电路放大倍数的 估算	201	9.3.1 OTL 电路.....	259
		9.3.2 OCL 电路	259



9.3.3 互补对称功率放大电路的 最大输出功率和效率	263	10.3.1 电容滤波电路	278
9.3.4 互补对称功率放大电路中 功放管的选择	264	10.3.2 电感滤波电路	281
9.4 集成功率放大电路及其 应用实例	266	10.3.3 复式滤波电路	281
小结	267	10.4 稳压电路	282
习题	269	10.4.1 稳压管稳压电路	282
第 10 章 直流稳压电源	273	10.4.2 串联反馈型稳压电路	283
10.1 直流稳压电源的组成 及其作用	274	10.4.3 串联开关型稳压电路	284
10.1.1 直流稳压电源的组成	274	10.5 集成稳压电源	286
10.1.2 直流稳压电源的作用	274	10.6 直流稳压电源应用实例	288
10.2 整流电路	274	10.6.1 三端集成稳压器的 扩展用法	288
10.2.1 单相半波整流电路	274	10.6.2 6~30V、500mA 稳压电源 电路	290
10.2.2 单相桥式整流电路	276	小结	290
10.3 滤波电路	278	习题	291
		部分习题答案	296
		参考文献	301

第 1 章

二极管及其应用电路

二极管、晶体管和场效应晶体管等均是常用的半导体器件，它们所用的材料都是经过特殊工艺进行加工且导电性能可控的半导体材料。本章将从半导体的基本知识入手，首先介绍半导体的导电特性、PN结的形成及其特性，然后介绍二极管的结构、特性曲线和主要参数，从而为学习晶体管和场效应晶体管等其他半导体器件及其应用电路打下基础。



教学目标与要求

- 熟悉半导体的导电特性。
- 掌握PN结的特性。
- 了解二极管的结构，掌握其工作原理、特性曲线及其主要参数。
- 掌握稳压二极管的稳压特性，了解其主要参数；了解发光二极管、光电二极管等半导体器件的结构、工作原理及其应用场合。



引 例

人们经常使用充电器给手机电池充电，如图1.1(a)所示；当人们走进市区广场、银行和体育场等公共场所时，会在LED显示屏上看到各种各样的公益性或商业性的广告，如图1.1(b)所示；收音机经调谐后就能欣赏到优美动听的电台文艺节目；计算机具有强大的数据运算和处理功能，已经成为人们工作、学习和生活中不可缺少的一部分，如图1.1(c)所示。所有这些功能的实现均与二极管的作用有关。虽然二极管的结构简单，但其应用却相当广泛，在许多电子产品中均会用到二极管。



(a) 手机充电器



(b) LED 显示屏



(c) 计算机

图 1.1 二极管的应用实例



1.1 半导体的基本知识

自然界中的物体按导电能力大致可分为导体、绝缘体和半导体三大类。

在导体(如金属导体铝、铜等)中,由于原子外层的电子受原子核的束缚力很小,电子极易挣脱原子核的束缚而成为自由电子,在外电场的作用下定向移动形成电流,导体中自由电子的浓度很高,故其电阻率很低,导电能力很强。在绝缘体(如玻璃、橡胶和塑料等高分子物质)中,原子的外层电子受原子核的束缚力很强,极难挣脱原子核的束缚而成为自由电子,故其电阻率极高,导电能力极差。而半导体(如硅、锗、大多数的金属氧化物和硫化物等)原子的外层电子既不像导体原子的外层电子被束缚得那么松,也不像绝缘体原子的外层电子被束缚得那么紧,故其导电能力介于导体和绝缘体之间。

半导体之所以在电子技术中获得了广泛的应用,并不是因为其导电能力介于导体和绝缘体之间,而是因为半导体具有多变特性。例如,当环境温度升高时,某些半导体材料的导电能力明显变化,称为热敏特性。如钴、锰、铜、钛等氧化物随着环境温度的升高,其导电能力显著增强。利用热敏特性可制成热敏电阻。当受到光照时,某些半导体材料的导电能力明显变化,称为光敏特性。如硫化镉、硒化镉等半导体随着光照的增强,其导电能力显著增强。利用光敏特性可制成光敏电阻。在纯净的半导体中掺入微量的、有用的杂质时,其导电能力显著增强,称为掺杂特性。利用掺杂特性可以制成具有不同用途的半导体器件,如二极管、晶体管和场效应晶体管等。

半导体的这种多变特性,是由半导体的特殊结构所决定的。位于元素周期表中第四主族的硅和锗是最常用的半导体材料,下面以硅材料为例对半导体的导电原理作一简单的介绍。

1.1.1 本征半导体

无杂质的、具有单晶体结构的半导体称为本征半导体。

硅原子最外层有四个电子(即价电子)。在提纯杂质硅,并按特定的工艺制成单晶体后,其原子便由杂乱无章的排列状态变成非常整齐的状态,硅单晶体结构示意图如图 1.1.1 所示。其中,每个硅原子与周围相邻的四个硅原子相联系,每两个硅原子共用一对价电子,这种结合方式称为共价键。

在硅的单晶体中,硅原子的价电子受到共价键的束缚,且共价键具有很强的束缚力。在常温或一定的光照下,有少量的价电子获得足够的能量后,便挣脱共价键的束缚(称为受到激发)而成为自由电子。值得注意的是,在该自由电子原来的位置上留下了一个空位,称为空穴,如图 1.1.2 所示。由于具有空穴的原子失掉了一个电子带正电,故它又会吸引相邻硅原子的价电子填补该空穴,从而在此邻近原子中又出现新的空穴,这个新的空穴又会被另一个价电子填补,如此不断地进行下去。我们将价电子填补空穴的运动,想象为空穴在运动,空穴的运动方向与填补空穴的价电子运动方向相反。显然,空穴所带的电量与电子所带的电量大小相等、极性相反,即空穴是带正电荷的。自由电子在运动的过程中,也有可能与空穴重新结合,从而使自由电子和空穴同时消失,称为复合。在外电场的作用下,

自由电子和空穴均能定向移动而形成电流。其中,自由电子定向移动的方向与外电场的方向相反,而形成的电流称为电子电流;空穴定向移动的方向与外电场的方向相同,而形成的电流称为空穴电流。总的电流等于电子电流和空穴电流之和。

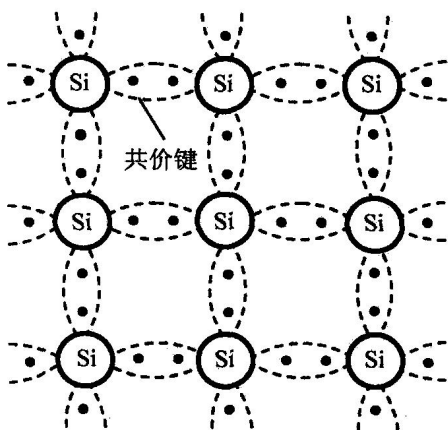


图 1.1.1 硅单晶体结构示意图

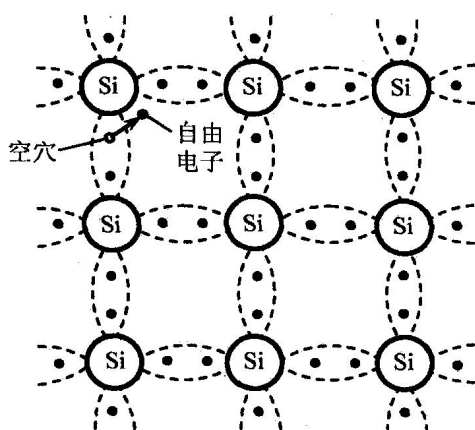


图 1.1.2 硅单晶体中自由电子和空穴

在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对出现的,即自由电子和空穴的数量相等,且自由电子和空穴不断地产生,又不断地复合。光照越强或环境温度越高,自由电子和空穴的浓度就越高,导电能力就越强。当环境温度一定时,自由电子和空穴的产生率和复合率便达到了动态平衡,自由电子和空穴的浓度便保持不变。因此,在本征半导体中,自由电子和空穴的浓度相等,且是温度的函数,温度越高,自由电子和空穴的浓度就越高,导电能力就越强。可以证明,在一定的范围内,当温度升高时,自由电子和空穴的浓度与温度之间近似地按指数函数规律升高。

能够运载电荷而形成电流的粒子称为载流子。可见,在本征半导体中,存在两种载流子,即自由电子和空穴,且自由电子和空穴均能参与导电;而在金属导体中,只有一种载流子——自由电子参与导电,这也是半导体与金属导体导电的本质区别。

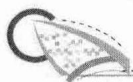
需要指出,在0K(即-273℃)时,本征半导体中的价电子完全被束缚在共价键中,没有可自由移动的载流子,在外电场的作用下无电流形成。

1.1.2 杂质半导体

由于本征半导体受到激发时所产生的自由电子和空穴的数量很少,故其导电能力仍然不强。为了提高半导体的导电能力,可以通过扩散工艺在本征半导体中掺入微量的、有用的杂质,从而形成杂质半导体。根据所掺入杂质元素的不同,可形成N型半导体和P型半导体两种。

1. N型半导体

在硅单晶体中掺入微量的五价元素(如磷),就形成了N型半导体,如图1.1.3所示。当磷原子取代硅原子的位置时,它与周围四个相邻硅原子以共价键结合。由于磷原子核外有五个价电子,还有一个多余电子不被共价键所束缚,在常温下,这个多余电子很容易挣



脱磷原子核的束缚而成为自由电子,从而使磷原子成为不能自由移动的正离子。这样,一个磷原子就能提供一个自由电子,从而使自由电子的浓度远大于空穴的浓度,导电能力显著增强。在这种半导体中,所掺入杂质磷原子的浓度越高,自由电子的浓度就越高,自由电子与空穴复合的机会就越大,空穴的浓度就越低。自由电子就成为这种半导体的多数载流子,简称多子;空穴是少数载流子,简称少子。由于这种杂质半导体主要靠自由电子导电,故称为电子型半导体或 N° 型半导体。

2. P型半导体

在硅单晶体中掺入微量的三价元素(如硼),就形成了P型半导体,如图1.1.4所示。当硼原子取代硅原子的位置时,由于硼原子核外有三个价电子,当它与周围四个相邻硅原子以共价键结合时,因缺少一个价电子而留下一个空位,在常温下,这个留有空位的硼原子很容易接受邻近硅原子的价电子来填补该空位,从而使硼原子变成不能自由移动的负离子。同时,在这个邻近硅原子中出现了一个空穴。这样,一个硼原子就能提供一个空穴,从而使空穴的浓度远大于自由电子的浓度,导电能力显著增强。在这种半导体中,所掺入杂质硼原子的浓度越高,空穴的浓度就越高,自由电子与空穴复合的机会就越大,自由电子的浓度就越低。空穴是多子,自由电子是少子。由于这种杂质半导体主要靠空穴导电,故称为空穴型半导体或 P° 型半导体。

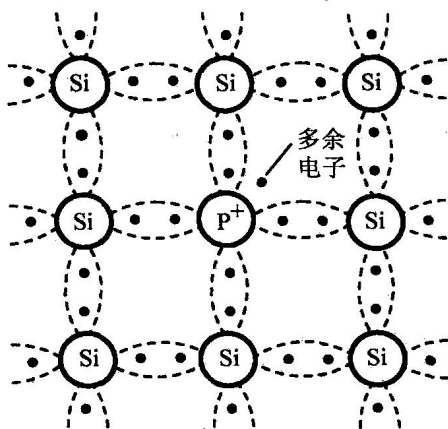


图 1.1.3 在硅单晶体中掺入磷元素

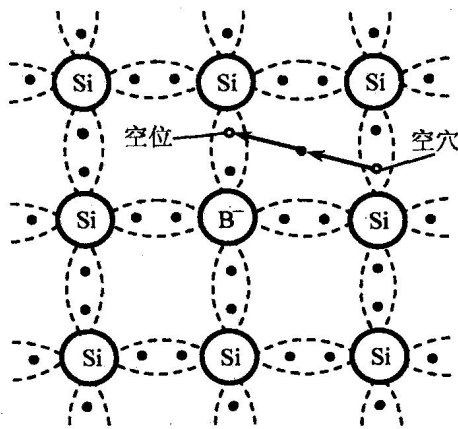


图 1.1.4 在硅单晶体中掺入硼元素

【特别提示】

- 在杂质半导体中,多子的浓度基本上取决于所掺杂质原子的浓度,而少子的浓度很低,且随杂质原子浓度的升高而降低,随温度的升高而升高。
- 在杂质半导体中,有多子和少子,尽管多子和少子所带的电量不等,但整块杂质半导体对外不显电性,而呈电中性。

① N 是英文 Negative(负)的首个字母,因电子带负电而得名。

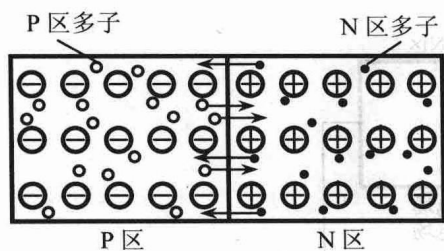
② P 是英文 Positive(正)的首个字母,因空穴带正电而得名。

1.2 PN 结

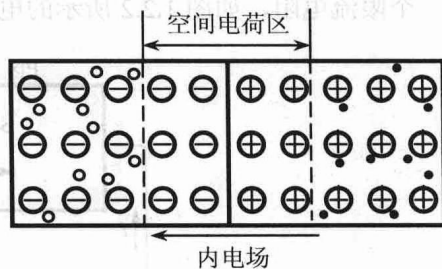
单块的杂质半导体(P 型半导体或 N 型半导体)仅仅能够做到导电能力的提高,在电路中只起电阻的作用。若把一块 P 型半导体和一块 N 型半导体制作在一起,则在交界面处就会形成 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。为更好地理解半导体器件的工作原理有必要了解 PN 结的形成过程。

1.2.1 PN 结的形成

物质从浓度高的地方向浓度低的地方的运动称为扩散运动。若把一块 P 型半导体和一块 N 型半导体制作在一起,则在分界面两侧的 P 区和 N 区就会出现多子的扩散运动,如图 1.2.1(a)所示。图中带圆圈的负号表示 P 区中不能移动的杂质负离子,带圆圈的正号表示 N 区中不能移动的杂质正离子。P 区的多子是空穴,少子是自由电子;N 区的多子是自由电子,少子是空穴。为清晰起见,少子在图中并未标出,但少子是存在的。由于 P 区中的空穴浓度高,自由电子的浓度低,而 N 区中的自由电子浓度高,空穴的浓度低。这样,P 区的多子——空穴向 N 区扩散,并与 N 区中的自由电子复合;而 N 区的多子——自由电子向 P 区扩散,并与 P 区中的空穴复合。扩散和复合的结果是,在分界面两侧出现了不能移动的正负离子区,称为空间电荷区。N 区出现正离子区,P 区出现负离子区,如图 1.2.1(b)所示。



(a) 交界面处多子的扩散运动



(b) 动态平衡时的 PN 结

图 1.2.1 PN 结的形成

在空间电荷区形成的电场,是由载流子的扩散和复合形成的,而不是外加的,故称为内电场。内电场的方向是从 N 区指向 P 区。显然,内电场对多子的扩散运动起阻碍作用,故空间电荷区又称为阻挡层。但这个内电场能将 N 区中的少子——空穴(包括从 P 区扩散过来的空穴)拉向 P 区,将 P 区中的少子——自由电子(包括从 N 区扩散过来的自由电子)拉向 N 区。载流子在电场力作用下的这种运动称为漂移运动。

随着扩散运动的不断进行,空间电荷区逐渐变宽,内电场逐渐增强,漂移运动逐渐加强。当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时,就建立了一定宽度的空间电荷区,这个一定宽度的空间电荷区称为 PN 结,如图 1.2.1(b)所示。在动态平衡时,由扩散运动而形成的扩



散电流和由漂移运动而形成的漂移电流大小相等、方向相反,互相抵消,PN结中无电流通过。由此可见,PN结是由多子的扩散运动和少子的漂移运动在达到动态平衡时而形成的一定宽度的空间电荷区。

由于空间电荷区内载流子的数量极少,在讨论PN结的导电特性时,常将空间电荷区内载流子的数量忽略不计,而只有不能移动的正负离子,故空间电荷区又称为耗尽层。

1.2.2 PN结的单向导电性

若在PN结两端所施加的电压极性不同,则PN结就会表现出截然不同的导电特性,即呈现单向导电性。

1. PN结正向偏置

若在PN结两端加以电压,且P区接电源的正极,N区接电源的负极,称为给PN结外加正向电压,也称为正向偏置,如图1.2.2所示。此时,外加电压所形成外电场的方向与内电场的方向相反,对内电场起削弱作用。在外电场的作用下,P区的空穴和N区的自由电子将进入空间电荷区,分别抵消不能移动的负离子和正离子,从而使空间电荷区变窄。这就打破了扩散运动和漂移运动之间的动态平衡,从而使扩散运动占优势。P区的多子——空穴向N区扩散,N区的多子——自由电子向P区扩散,从而形成正向电流(方向为从P区指向N区),外加电源不断地提供电荷,使电流得以维持。PN结正向偏置时,PN结所呈现的正向电阻很小(理想时,可视为零),PN结处于导通状态。

由于PN结的正向电阻很小,为防止PN结通过过大的正向电流而损坏,在回路中应串联一个限流电阻,如图1.2.2所示的电阻 R 。

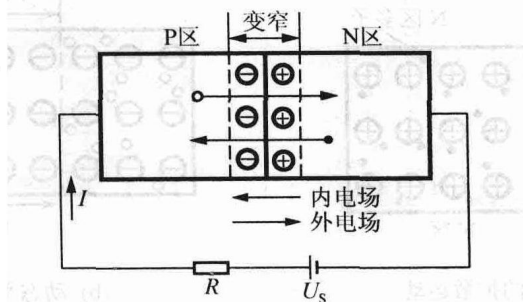


图 1.2.2 PN结正向偏置

【特别提示】

- PN结的正向电流可视为由多子的扩散运动形成的。

2. PN结反向偏置

若将外加电压的极性接反,即N区接电源的正极、P区接电源的负极,称为给PN结外加反向电压,也称为反向偏置,如图1.2.3所示。此时,外加电压所形成外电场的方向与内电场的方向相同,对内电场起加强作用。在外电场的作用下,P区的空穴和N区的自由电子便远离空间电荷区,从而使空间电荷区变宽。这就打破了扩散运动和漂移运动之间

的动态平衡,使漂移运动占优势。P区的少子——自由电子向N区漂移,N区的少子——空穴向P区漂移,从而形成反向电流(方向是从N区指向P区)。由于少子数量极少,故反向电流极小(理想时,可视为零),PN结处于截止状态。PN结反向偏置时,PN结所呈现的反向电阻很大(理想时,可视为无穷大)。

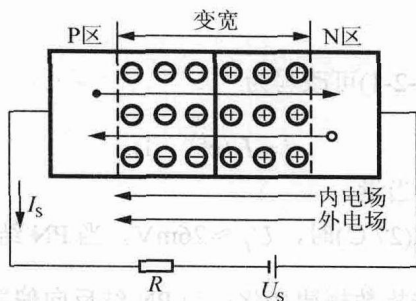


图 1.2.3 PN 结反向偏置

PN 结的反向电流又称为反向漏电流。由于当环境温度一定时,反向电流在反向电压的一定范围内基本不变,故反向电流又称为反向饱和电流。

综上所述,PN 结正向偏置时处于导通状态,反向偏置时处于截止状态。因此,PN 结具有单向导电性。

顺便指出,若 PN 结的端电压发生变化,则空间电荷区的宽度也随着发生变化,空间电荷区的电荷将增加或减少,这一现象犹如电容的充放电一样,故可将空间电荷区宽窄的变化等效为电容,称为势垒电容,用 C_b 表示。利用 PN 结反向偏置时的势垒电容随反向电压的变化而明显变化的特点可以制作压控变容二极管。变容二极管在电调谐电路中应用得较为广泛;若外加到 PN 结上的正向电压发生变化时,P 区的自由电子和 N 区的空穴的数量将增加或减少,则可将扩散区内载流子数的这种变化等效为电容,称为扩散电容,用 C_d 表示。势垒电容和扩散电容都是非线性的。PN 结的结电容 C_j 等于势垒电容 C_b 与扩散电容 C_d 之和,即

$$C_j = C_b + C_d$$

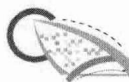
PN 结的结电容与结面积、介电常数等因素有关。通常,PN 结的结电容很小(结面积小的为 1pF 左右,结面积大的为几皮法~几百皮法),对低频信号呈现很高的容抗,可将其作用忽略不计,只有当工作频率较高时才考虑结电容的作用。

【特别提示】

- PN 结的反向电流可视为由少子的漂移运动形成的。
- 当环境温度升高时,少子的浓度升高,反向电流增大,故温度对反向电流的影响很大,这是导致半导体器件温度稳定性差的根本原因。

1.2.3 PN 结的电流方程

若通过 PN 结电流的参考方向为由 P 区指向 N 区,且 PN 结的端电压与通过 PN 结的电流取关联参考方向,则可以证明,通过 PN 结的电流 i 与其端电压 u 之间的关系为



$$i = I_s (e^{\frac{qu}{kT}} - 1) \quad (1-2-1)$$

式中 I_s ——通过 PN 结的反向饱和电流；
 k ——玻耳兹曼常数($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)；
 q ——电子的电量；
 T ——热力学温度。
 若令 $U_T = kT/q$ ，则式(1-2-1)可改写为

$$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-2-2)$$

式中 U_T ——温度 T 的电压当量。

常温下，即温度 $T=300\text{K}(27^\circ\text{C})$ 时， $U_T \approx 26\text{mV}$ 。当 PN 结正向偏置，且 $u \gg U_T$ ①时， $i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}}$ ，电流 i 随电压 u 按指数规律变化；当 PN 结反向偏置，且 $|u| \gg U_T$ 时， $i \approx -I_s$ 。可以利用式(1-2-1)来制作温度传感器(如 AD590 集成温度传感器)，以便对温度进行测控。

1.3 二极管

半导体二极管又称为晶体二极管，简称二极管(Diode)。二极管常见的几种外形如图 1.3.1(a)所示。

二极管实质上就是一个 PN 结。因此，二极管也具有单向导电性。它是以 PN 结为管心，两端各引出一个电极，并用管壳封装、加固而成，如图 1.3.1(b)所示。从 P 区引出的电极称为阳极，从 N 区引出的电极称为阴极。二极管的图形符号如图 1.3.1(c)所示。其中，三角形箭头表示二极管正向电流的方向。

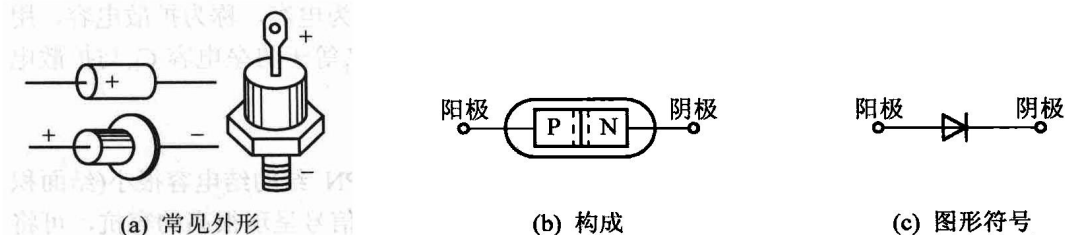


图 1.3.1 二极管的常见外形、构成及图形符号

1.3.1 二极管的类型和结构

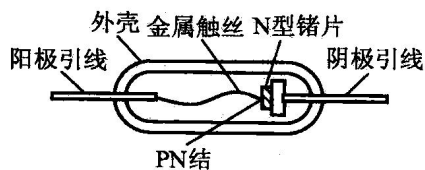
根据所用半导体材料的不同，二极管可分为硅管和锗管两类。大功率的整流器件一般均采用硅管。

根据用途的不同，二极管可分为普通管、整流管和开关管等。

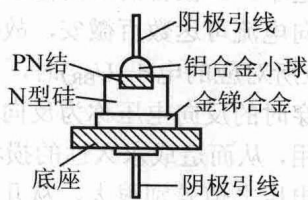
根据内部结构的不同，二极管可分为点接触型、面接触型和平面型三类。图 1.3.2(a)

① 在电子电路中，对于两个同量纲的物理量 X_1 和 X_2 ，若 $X_1 > (5 \sim 10)X_2$ ，则可认为 $X_1 \gg X_2$ 。

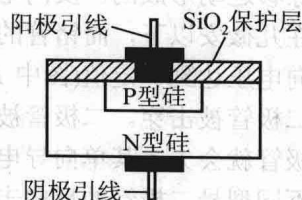
所示是点接触型二极管。由一根金属丝与半导体相接触形成一个 PN 结。点接触型二极管多为锗管。由于点接触型二极管的 PN 结结面积很小,不允许通过大电流,但结电容小,故多用于高频信号的检波和小功率的电路中。图 1.3.2(b)所示是面接触型二极管,面接触型二极管多为硅管。由于面接触型二极管的 PN 结结面积大,允许通过大电流,又由于结电容也较大,故多用于低频大电流的整流电路中,一般不能用于高频电路。图 1.3.2(c)所示为平面型二极管,具结面积较大的可用于大功率的整流电路中,而结面积较小的可作为数字电路中的开关管使用。



(a) 点接触型二极管



(b) 面接触型二极管



(c) 平面型二极管

图 1.3.2 二极管的结构类型

1.3.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性曲线是指通过二极管的电流与二极管端电压之间的关系。要正确使用二极管,就需正确理解其伏安特性曲线。可以用实验的方法测试出二极管的伏安特性曲线,如图 1.3.3 所示。

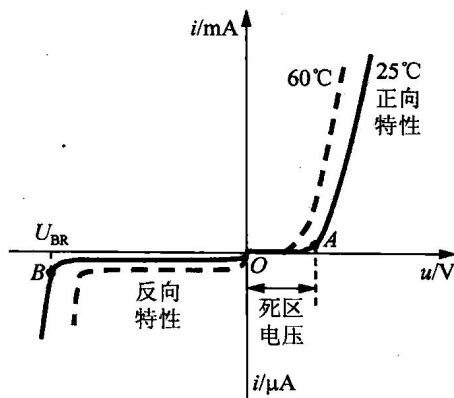


图 1.3.3 二极管的伏安特性曲线

由图 1.3.3 可以看出,伏安特性曲线过原点,说明当 PN 结的端电压为零时,多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡,扩散电流和漂移电流大小相等、方向相反,相互抵消,故通过 PN 结的电流为零。

正向特性是指当二极管正向偏置时的伏安特性。从图中可以看出,当正向电压较低时,通过二极管的正向电流很小,几乎为零(图中的 OA 段),该段曲线所对应的电压称为死区电压(或称为开启电压)。硅管的死区电压约为 $0.5V$,锗管的死区电压约为 $0.1V$ 。这是因为