

21

21 SHIJI GAOZHIGAOZHUAN DIANZI JISHU GUIHUA JIAOCAI
世纪高职高专电子技术规划教材

电子技术

黄军辉 黄晓红 主编
颜学定 徐献灵 副主编

- 引入工程实践
- 突出基本概念
- 注重技能训练

免费提供

电子教案
习题解答

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪高职高专电子技术规划教材

电子技术

黄军辉 黄晓红 主编
颜学定 徐献灵 副主编

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/黄军辉,黄晓红主编. —北京:人民邮电出版社,2006. 10

21 世纪高职高专电子技术规划教材

ISBN 7-115-14949-6

I. 电... II. ①黄... ②黄... III. 电子技术—高等学校:技术学校—教材

IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 079498 号

内 容 提 要

本书根据教育部制定的电子技术课程的教学基本要求,系统地介绍电子技术的基本概念、基本理论、基本方法及其在实际中的应用。本书主要内容包括常用半导体器件、放大电路基础、集成运算放大器、直流稳压电源、组合逻辑电路、时序逻辑电路等内容。本书集电子技术和应用于一体,按照理论联系实际、循序渐进、便于教与学的原则编写,并注意了对新知识、新技术的融入。

本书叙述简明,概念清楚;知识结构合理,重点突出;内容深入浅出,通俗易懂;例题习题丰富,图文并茂;各章均有学习要求、概述和小结。

本书可与人民邮电出版社出版的《电工技术》教材配套使用,作为高职高专院校及中等职业学校计算机、电子、信息、自动控制、机械等专业的教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考。

21 世纪高职高专电子技术规划教材

电 子 技 术

◆ 主 编 黄军辉 黄晓红

副 主 编 颜学定 徐献灵

责任编辑 赵慧君

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

河北三河市海波印务有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 13.5

字数: 314 千字

2006 年 10 月第 1 版

印数: 1-3 000 册

2006 年 10 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-115-14949-6 / TN · 2798

定价: 19.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223

21 世纪高职高专电子技术规划教材

编 委 会

主 任 王俊鹏

副 主 任 张惠敏 向 伟

编 委 (以姓氏笔画为序)

朱乃立 阮友德 许恒玉 苏本庆 余本海

李存永 肖 琰 邱寄帆 张新成 林训超

胡修池 胡起宙 赵慧君 曾令琴 韩 丽

程 勇 潘春燕

丛书出版前言

遵照教育部提出的以就业为导向,高职高专教育从专业本位向职业岗位和就业为本转变的指导思想,人民邮电出版社协同一些高职高专院校和相关企业共同开发了 21 世纪高职高专电子技术规划教材。

随着职业教育在我国不断深化,各高职高专院校越来越关注人才培养的模式与专业课程设置,越来越关心学生将来的就业岗位,并开始注重培养学生的职业能力。但是我们看到,高职高专院校所培养的人才与市场上需要的技术应用型人才仍存在差距。那么如何在保证知识体系完整性的同时,能在教材中体现正在应用的技术、正在发展的技术和前沿的技术成了本套教材探讨的重点,为此我们在如下几个方面做了努力和尝试。

1. 针对电子类专业基础课程较经典,及知识点又相对统一、固定的特点,采取本科老师与高职高专老师合作编写的方式,借助本科老师在理论方面深厚的功底,在写作质量上进行把关,高职高专老师则发挥其熟悉职业教育教学需求的优势把握教材的广度与深度,力图解决专业基础课程理论与应用相结合的目的。

2. 高职高专教育培养的人才面向生产、管理第一线的技术型人才,基础课程的教学应以必需、够用为原则,以掌握概念、强化应用为教学重点,注重岗位能力的培养。本套教材在保证基本知识点讲解的同时,掌握“突出基本概念,注重技能训练,强调理论联系实际,加强实践性教学环节”的原则,在内容安排上避免复杂的数学推导和计算。

3. 专业课程引入工程实例,强化培养职业能力。让学生了解在实际工作中利用单片机和 PLC 做项目的流程,并通过一系列小的实例逐步让学生产生学习兴趣,并了解开发过程,最后通过一个大的完整案例对学生进行综合培训,从而达到对职业能力的培养。

以上这些仅是高职高专教材出版的初步。如何配合学校做好为国家培养人才的工作,出版高质量的教材将是我们不断追求和奋斗的目标。

我们衷心希望,关注高等职业教育的广大读者能对本套教材的不当之处给予批评指正,提出修改意见,同时也热切盼望从事高等职业教育的老师、企业专家和我们联系,共同探讨相关专业的教学方案和教材编写等问题。来信请发至 zhaohuijun@ptpress.com.cn。

21 世纪高职高专电子技术规划教材编委会

2005 年 8 月

编者的话

针对高等职业教育注重实际技术和能力培养的特点,本书在介绍电子技术基础理论的同时,重点强调基本知识和基本技能。本书首先介绍二极管、三极管、晶闸管、集成运放器等常用电子元器件,以元件—线路—系统为脉络,集中基本电子元件及特征,适当给出工业生产和日常生活中的实用技术,为学生学习后续专业课程打下基础,也为从事有关工作和继续深造作好准备。

为突出高等职业教育的要求,本书具有以下特点。

本书在保持系统性和完整性的基础上尽量压缩、简化理论上的推导过程,增加一些实用性较强、与生产实践相近的实例,同时加强了电子技术中与生产实践相贴近的内容,如对晶闸管及应用等作了详尽的介绍和阐述,并力求通俗易懂,以适应高职高专学生的学习需求,并提供课程设计制作,为学生小产品、小制作和创新的实践能力培养打下基础。

本书充分体现了高职高专教育的特点,集电子技术和应用于一体,注重基础性,保证基础理论以够用为度,强调方法应用;培养学生分析、解决问题的能力;同时突出应用性,注重培养学生分析问题和解决问题及将所学电子技术综合运用能力。本书叙述简明,概念清楚;知识结构合理,重点突出;内容深入浅出,通俗易懂,图文并茂;例题、习题丰富;各章均有学习目标和小结。

参加本书编写的教师有广东农工商职业技术学院黄军辉、徐献灵、张文梅及梁健,广东轻工职业技术学院黄晓红、颜学定、刘鲁,广东工贸职业技术学院刘益标。全书由黄军辉、黄晓红主编,黄军辉负责统稿,华南理工大学符永法教授对本书进行认真阅读并提出修改意见和建议,同时广东农工商职业技术学院与广东轻工职业技术学院、广东工贸职业技术学院等对本书的出版给予了大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之时间比较仓促,误漏之处在所难免,请广大读者批评指正,以便今后加以改进。

编者
2006年6月

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体基本知识	1
1.1.1 本征半导体	2
1.1.2 N 型半导体和 P 型半导体	3
1.2 PN 结	4
1.2.1 半导体中载流子的运动	4
1.2.2 PN 结的形成	4
1.2.3 PN 结的单向导电性	5
1.3 二极管	7
1.3.1 二极管的结构	7
1.3.2 二极管的伏安特性	8
1.3.3 二极管的主要参数	9
1.3.4 二极管的应用	9
1.3.5 半导体器件型号命名方法	11
1.4 特殊二极管.....	12
1.4.1 稳压管	12
1.4.2 发光二极管	13
1.5 晶体管.....	14
1.5.1 晶体管的结构与符号	14
1.5.2 晶体管的电流放大作用	15
1.5.3 晶体管的特性曲线	15
1.5.4 晶体管的主要参数	17
1.6 场效应管.....	19
1.6.1 增强型绝缘栅场效应管	20
1.6.2 耗尽型绝缘栅场效应管	22
1.6.3 场效应管的主要参数	23
1.6.4 场效应管与晶体管的比较	23
本章小结	24
习题	24
第 2 章 基本放大电路	28
2.1 共发射极放大电路.....	28
2.1.1 共射放大电路的组成及每个元器件的作用	29
2.1.2 放大电路的直流通路和交流通路	29

2.1.3	共射放大电路的静态分析	30
2.1.4	共射放大电路的动态分析	32
2.2	静态工作点稳定的放大电路——分压式偏置电路	37
2.2.1	温度变化对静态工作点的影响	37
2.2.2	分压式偏置电路	38
2.2.3	静态分析	39
2.2.4	动态分析	39
2.3	共集放大电路和共基放大电路	41
2.3.1	共集电极放大电路	41
2.3.2	共基放大电路	42
2.3.3	三种组态放大电路的比较	43
2.4	多级放大电路	44
2.4.1	级间耦合方式	44
2.4.2	多级放大电路的动态分析	45
2.5	差动放大电路	47
2.5.1	直接耦合放大电路的零点漂移	47
2.5.2	差动放大电路的组成和工作原理	48
2.5.3	差动放大电路的输入输出方式	49
2.6	功率放大电路	52
2.6.1	功率放大电路的概念	53
2.6.2	互补对称功率放大电路	54
2.6.3	集成功率放大器	56
2.7	场效应管放大电路	58
2.7.1	静态分析	58
2.7.2	动态分析	58
	本章小结	59
	习题	60
第3章	集成运算放大器及应用	67
3.1	集成运算放大器简介	67
3.1.1	集成运算放大器的结构和参数	67
3.1.2	集成运算放大器的符号、类型及主要参数	70
3.1.3	集成运算放大器的理想化条件	72
3.1.4	什么是反馈	72
3.1.5	集成运放的两种工作状态及相应结论	73
3.2	集成运放构成两种基本放大器	75
3.2.1	反相比例运算电路	75
3.2.2	同相比例运算电路	76
3.2.3	运放的两种基本负反馈放大器	76
3.3	集成运放在模拟运算方面的应用	77

3.3.1 用集成运放实现信号的加、减	77
3.3.2 用集成运放实现信号的微分与积分	79
3.4 集成运放的非线性应用(电压比较器及其应用)	80
3.4.1 零电压比较器	81
3.4.2 滞回比较器	82
3.5 用集成运放构成振荡电路	83
3.5.1 产生正弦波振荡的条件	83
3.5.2 RC 振荡电路	84
3.6 使用运算放大器应注意的几个问题	86
本章小结	87
习题	88
第4章 放大电路中的负反馈	92
4.1 反馈的基本概念	92
4.1.1 反馈和反馈支路	92
4.1.2 反馈极性(正、负反馈)	93
4.1.3 交流反馈与直流反馈	94
4.2 负反馈电路的类型	95
4.2.1 反馈在输出端的取样	95
4.2.2 反馈在输入端的接法	96
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	97
4.3.1 负反馈放大器的方框图	97
4.3.2 负反馈放大器的性能	98
4.4 深度负反馈放大电路的分析方法	103
习题	106
第5章 直流稳压电源	108
5.1 整流电路	109
5.1.1 单相桥式整流电路	109
* 5.1.2 三相整流电路	110
5.2 滤波电路	113
5.2.1 电容滤波电路	113
5.2.2 电感滤波电路	114
5.2.3 复式滤波电路	114
5.3 稳压管稳压电路	115
5.3.1 稳压管稳压电路的组成	115
5.3.2 稳压原理	116
5.4 串联型稳压电路	117
5.4.1 基本调整管电路	117
5.4.2 具有放大环节的串联型稳压电路	118
5.4.3 串联型稳压电路的方框图	119

5.5 集成稳压器电路	119
本章小结	122
习题	123
第6章 晶闸管及其变流技术	125
6.1 晶闸管及其工作原理	125
6.1.1 晶闸管的结构	125
6.1.2 晶闸管的工作原理	126
6.1.3 晶闸管触发导通原理	127
6.1.4 晶闸管的主要特性参数	128
6.2 晶闸管整流电路	129
6.2.1 单相半波可控整流电路	129
6.2.2 单相半控桥式可控整流电路	131
6.2.3 三相桥式半控整流电路	132
6.3 晶闸管触发电路及应用实例	133
6.3.1 对触发电路的要求	133
6.3.2 简易的触发电路	133
6.3.3 正弦波同步触发电路	134
6.4 晶闸管交流开关与交流调压	136
6.4.1 双向晶闸管	136
6.4.2 晶闸管交流开关	138
6.4.3 固态开关	138
6.4.4 单相交流调压电路	139
本章小结	140
习题	141
第7章 组合逻辑电路	143
7.1 数字电路概述	143
7.2 数制与编码	144
7.2.1 数制与数制转换	144
7.2.2 编码	146
7.3 逻辑代数	148
7.3.1 基本逻辑关系	148
7.3.2 逻辑运算定理	149
7.3.3 逻辑函数的化简	150
7.4 逻辑门电路	153
7.4.1 基本逻辑门电路	153
7.4.2 CMOS 逻辑门电路	155
7.5 组合逻辑电路的分析与设计	157
7.5.1 组合逻辑电路的分析方法	157
7.5.2 组合逻辑电路的设计	158

7.5.3 编码器	160
7.5.4 译码器	163
习题	165
第8章 时序逻辑电路	168
8.1 双稳态触发器	168
8.1.1 触发器概述	168
8.1.2 基本 RS 触发器	169
8.1.3 同步 RS 触发器	170
8.1.4 JK 触发器	172
8.1.5 D、T 触发器	175
8.2 寄存器	179
8.2.1 寄存器	179
8.2.2 移位寄存器	179
8.3 计数器	182
8.3.1 二进制加法计数器	183
8.3.2 十进制计数器	186
本章小结	188
习题	189
附录1 半导体器件型号命名方法	193
附录2 常用半导体器件的参数	195
附录3 KP 型晶闸管元件主要额定值	200
附录4 KP 型晶闸管元件的其他特性参数	201

第 1 章

半导体器件

用半导体制成的电子器件，统称为半导体器件。半导体器件具有耗电少、寿命长、重量轻、体积小、工作可靠、价格低廉等一系列的优点，因此在电子技术的各个领域得到了广泛应用。

半导体的导电特性和 PN 结的构成是研究各种半导体器件的基础。本章首先讨论半导体的导电特性和 PN 结的基本原理，接着讨论二极管、稳压管、晶体管、绝缘栅场效应管和晶闸管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数。

学习目标：

1. 熟悉下列名词、术语的定义和原理：自由电子和空穴，扩散和漂移，复合，空间电荷区、PN 结、耗尽层、导电沟道、二极管的单相导电性、稳压管的稳压作用、晶体管与 MOS 场效应管的放大作用和三个工作区域。
2. 掌握二极管、稳压管、晶体管、场效应管的外特性、主要参数的物理意义。

1.1 半导体基本知识

存在于自然界的一切物质，按其导电能力的强弱可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。容易导电的物质称为导体，所有的金属都是导体，如铁、铝、铜等。有些物质几乎不传导电流，这类物质称为绝缘体，如塑料、陶瓷、惰性气体等。

还有一类物质，其导电能力介于导体和绝缘体之间，称为半导体。常用的半导体材料很多，如硅、锗、硒、砷化镓及大多数金属氧化物和硫化物。

半导体之所以能够得到广泛的应用，主要是由于半导体具有以下特性。

1. **热敏特性**：半导体的电阻率随着温度变化而显著变化。例如纯锗，当温度从 20°C 升高到 30°C 时，其电阻率约降低一半。利用这种特性制成热敏元件，用于检测温度的变化。当然，这种特性造成半导体器件温度稳定性差。

2. **光敏特性**：某些半导体材料受到光照时，电阻率迅速下降，导电能力显著增强。例如常用的硫化镉 (CdS) 材料，在有光照和无光照的条件下，其电阻率有几十倍到几百倍的差别。利用这种特性制成各种光敏元件，如光敏电阻、光电管等。

3. **掺杂特性**：在纯净的半导体材料中掺入某种微量的杂质元素后，导电能力将猛增几万倍甚至几百万倍。例如，在纯硅中掺入百万分之一的硼，即可使其电阻率从 $0.214 \times 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 下降到 $0.4 \Omega \cdot \text{m}$ 。这是半导体最突出的特性，利用这种特性可以制成多种半导体器件，如二极管、晶体管、场效应管、晶闸管等。

1.1.1 本征半导体

纯净的具有完整晶体结构的半导体称为本征半导体。

最常用的本征半导体是锗和硅晶体。它们都是四价元素，原子最外层轨道上有四个价电子。由于晶体中相邻原子的距离很近，原子的一个价电子与相邻原子的一个价电子容易组合成一个电子对，这对价电子是相邻原子所共有的，这种组合称为共价键结构。因此，在晶体中，一个原子的四个价电子就会分别与其周围的四个原子组成共价键，如图 1-1 所示。

在热力学零度 (-273.16°C) 且没有其他外部能量作用时，价电子被共价键紧紧束缚着，使得半导体中没有可以自由移动的带电粒子。我们知道，物质导电是通过带电粒子的定向运动实现的，运载电荷的粒子称为载流子。此时，晶体中没有载流子，导电能力如同绝缘体。

当半导体温度上升或给半导体施加能量（如光照），一些价电子获得足够的能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子，此过程称为本征激发。自由电子是一种可以参与导电的带电粒子，即载流子。

价电子脱离共价键束缚成为自由电子的同时，在相应共价键中留下一个空位置，称为空穴。邻近原子上的价电子容易填补这个空穴，这样就在邻近原子处留下一个新的空穴，如图 1-2 所示。空穴的运动相当于正电荷的运动。

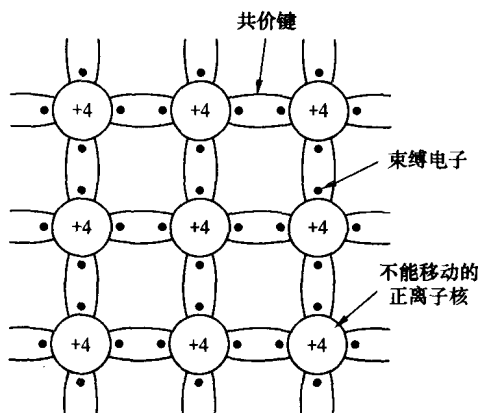


图 1-1 硅或锗晶体共价键结构

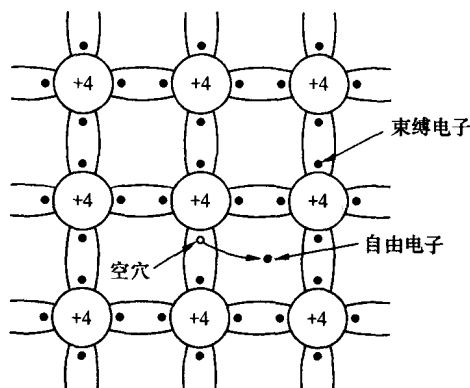


图 1-2 电子和空穴的形成

在外加电场的作用下，带负电的自由电子逆着电场方向作定向运动，形成电子电流；带正电的空穴则顺着电场方向作定向运动，产生空穴电流（实际上是价电子按反方向依次填补空穴的运动所产生的）。由于所带的电荷的不同，虽然它们运动方向相反，产生的电流方向却是相同的。因此，总电流是自由电子电流和空穴电流之和。可见，半导体有自由电子和空穴两种载流子参与导电，这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体和金属在导电原理上的本质差别。

载流子的数量决定了半导体的导电能力，载流子浓度越高，半导体导电能力越强。载流子的数量与温度、光照程度、掺入杂质浓度等因素有关，因此半导体的导电能力也与温度、光照程度、掺入杂质浓度等因素有关。

在本征半导体中，受激后的自由电子和空穴总是成对产生。同时，自由电子在运动过程

中与空穴相遇，自由电子会填补空穴，两者同时消失，称为复合。在一定温度下，载流子的产生与复合达到动态平衡，使得载流子维持在一定的数目上。当温度升高或受到光照时，更多的价电子被激发而挣脱共价键的束缚，产生的自由电子—空穴对的数量增多，复合也会增多。最终，激发和复合在此温度下再次达到平衡，载流子数量增多。

在常温下，本征半导体的导电能力极差。在常温（300K）下，硅的本征载流子浓度为 $n_i = p_i = 1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，而原子密度为 $5.00 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 。载流子浓度与原子密度相比极其微小。随着温度升高，载流子数量增多，半导体导电能力将显著增强。在室温附近，对硅来说，温度每升高 8°C 左右， n_i 增加一倍；对锗来说，温度每升高 12°C 左右， n_i 增加一倍。

1.1.2 N 型半导体和 P 型半导体

室温下，本征半导体的导电能力极差；掺入少量其他元素后，导电能力大大增强。掺入其他元素后的半导体称为杂质半导体。我们根据掺入元素的不同，将它们分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

如图 1-3 所示，在本征硅（或锗）中掺入少量磷（或其他五价元素），则磷原子将取代某些位置上的四价硅原子，形成 N 型半导体。磷原子有五个价电子，其中四个价电子与相邻的硅原子形成共价键，多余的一个价电子很容易挣脱磷原子的束缚而成为自由电子，磷原子失去一个价电子成为不能移动的正离子。磷原子的数量虽然很少，而由此产生的自由电子数量远远大于本征激发产生的空穴数量。N 型半导体中，自由电子的浓度大于空穴的浓度，自由电子为多数载流子，简称多子；本征激发产生的少量空穴为少数载流子，简称少子。例如，在本征硅中掺入十亿分之一的磷，杂质浓度为 $5.00 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ，电子的浓度基本与杂质浓度相同，为 $5.00 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ，而本征激发产生的空穴浓度为 $4.1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 。N 型半导体中自由电子浓度远大于本征半导体中的电子浓度。可见，掺杂可以大大提高半导体的导电能力。

2. P 型半导体

如图 1-4 所示，在本征硅（或锗）中掺入少量硼（或其他三价元素），则硼原子将取代某些位置上的四价硅原子，形成 P 型半导体。硼原子有三个价电子，在与相邻的硅原子形成共价键时，将因缺少一个价电子而形成一个空穴，这个空穴容易吸引邻近共价键上的价电子来填补，使得硼原子得到一个价电子成为不能移动的负离子。硼原子的数量很少，而由此

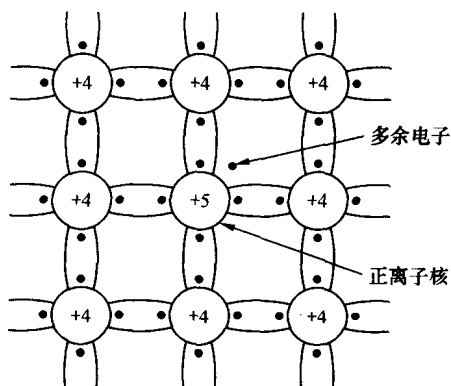


图 1-3 N 型半导体结构示意图

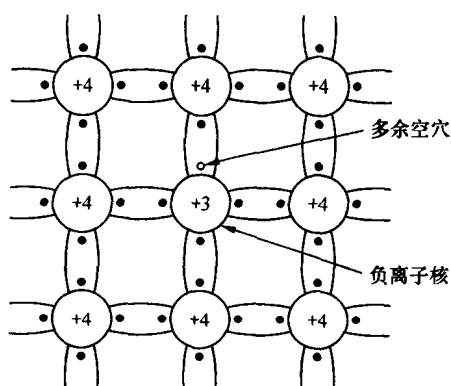


图 1-4 P 型半导体结构示意图

产生的空穴数量却远远大于本征激发所产生的自由电子数量。在 P 型半导体中，空穴是多子，自由电子是少子。P 型半导体中，空穴浓度远远大于自由电子浓度。

综上所述，多子是由掺杂产生，多子数目取决于掺杂浓度，杂质半导体主要靠多子导电。少子是本征激发产生，因此少子数目对温度非常敏感，所以在高温下，半导体器件少子数目增多，器件的稳定性因此而受到影响。

注意，无论是 N 型半导体还是 P 型半导体，虽然有一种占多数的载流子，但对外保持中性。

综上所述，掺入少量的杂质可以使得晶体中的自由电子或空穴的数目激增，大大提高了半导体的导电能力。也就是说，通过改变掺入杂质的浓度可以控制半导体的导电能力

思考与练习

- 1.1.1 什么是本征半导体和杂质半导体？
- 1.1.2 半导体在导电上具有哪些特点？金属导电和半导体导电有什么区别？
- 1.1.3 自由电子导电和空穴导电有什么区别？
- 1.1.4 N 型半导体中的自由电子多于空穴，N 型半导体是否带负电？
- 1.1.5 半导体器件在高温下工作时会出现不稳定的状况的原因。

1.2 PN 结

单一的 N 型或 P 型半导体，还不能直接制成半导体器件。只有将这两种类型的半导体结合在一起，才能制成各种不同特性的半导体器件。

利用掺杂工艺，使得一块半导体的一部分成为 P 型半导体，另一部分成为 N 型半导体，两者的交界面就形成一个具有特殊性质的区域，称为 PN 结。

PN 结是大多数半导体器件的基本结构，如二极管、晶体管和晶闸管分别由一个、两个和三个 PN 结构成。因此，了解 PN 结的形成和性质对于理解大多数半导体器件的工作原理是很重要的。

1.2.1 半导体中载流子的运动

半导体中的载流子存在以下两种运动方式。

1. 载流子的扩散运动

当半导体中载流子浓度存在差异时，载流子将从浓度高的区域运动到浓度低的区域，这种运动称为载流子的扩散运动。

2. 载流子的漂移运动

在半导体两端外加电场时，载流子在电场的作用下做定向运动，这种运动称为载流子的漂移运动。

1.2.2 PN 结的形成

利用掺杂工艺，在一块本征硅片的不同区域分别形成 P 型半导体和 N 型半导体，在两

者的交界面处就形成了PN结。

P型半导体中，空穴很多而自由电子很少；N型半导体中，自由电子很多而空穴很少。形成PN结时，P区的多子空穴扩散到N区，并与N区交界面处的自由电子复合；N区多子自由电子扩散到P区，并与P区交界面处的空穴复合，如图1-5(a)所示。这样，在P区一侧留下不能移动负离子，在N区一侧留下不能移动的正离子。PN交界面处形成了一边带负电荷，一边带正电荷的空间电荷区，同时产生了方向由正电荷区指向负电荷区（即由N区指向P区）的电场，称为内电场，如图1-5(b)所示。在内电场的作用下，P区的少子电子向N区漂移，N区的少子空穴向P区漂移。内电场的出现对两区多子的扩散运动起阻碍作用，却推动了两区少子的漂移运动，使得两区少子越过空间电荷区进入对方区内。很显然，多子的扩散运动方向和少子的漂移运动方向是相反的。

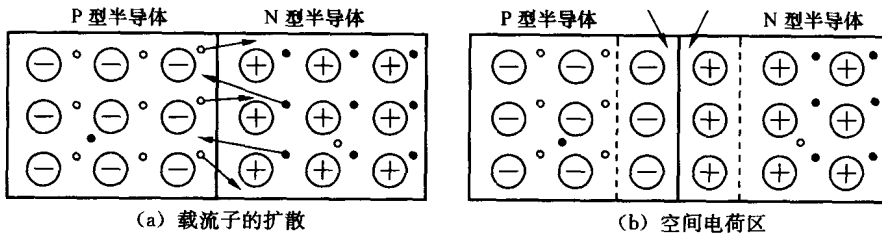


图1-5 PN结的形成

PN结形成之初，多子的扩散运动占绝对优势。随着扩散的进行，空间电荷区将逐渐变宽，内电场逐渐增强；多子的扩散运动将逐渐减弱，少子的漂移运动却逐渐增强。最终实现了多子扩散运动和少子漂移运动的动态平衡，空间电荷区不再扩展，保持一定的宽度。此时，多子的扩散载流子数目和漂荷载流子数目相等，所以流过PN结的净电流为零。这个空间电荷区就称为PN结。

PN结的宽度一般为几微米到几十微米。PN结的内电场的电位差约为零点几伏。

1.2.3 PN结的单向导电性

PN结无外加电压时，多子的扩散运动与少子的漂移运动处于动态平衡状态。

如果在PN结两端外加电压，原有的动态平衡将被破坏，此时，扩散电流不再等于漂移电流，因而PN结将会有电流流过。当外加的电压极性不同时，PN结表现出截然不同的导电特性，即单向导电性。

1. PN结外加正向电压时处于导通状态

如图1-6(a)所示，PN结外加正向电压（即P区接电源的正极，N区接电源的负极），称为正向偏置。外电场与内电场方向相反，有利于多子的扩散，而不利于少子的漂移，空间电荷区变窄，内电场被削弱。多子的扩散运动强于少子的漂移运动，形成了以扩散运动为主的正向电流 I_F 。当外加电压增大到一定数值时，正向电流将急剧增大。此时，外加电压只要有微小的变化，便能使得此 I_F 发生显著的变化，可见，PN结呈现出一个很小的电阻，PN结处于正向导通状态。此时，PN结的正向伏安特性如图1-6(b)所示。

2. PN结外加反向电压时处于截止状态

如图1-7(a)所示，PN结外加反向电压（即N区接电源的正极，P区接电源的负极），称为反向偏置。外电场与内电场方向相同，有利于少子的漂移运动而不利于多子的扩散运

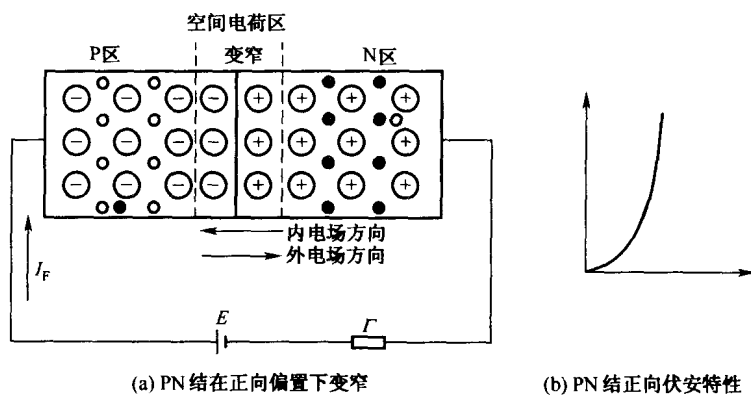


图 1-6 PN 结外加正向电压

动，空间电荷区变宽，内电场被增强。此时，少子漂移运动构成反向电流 I_R 。由于少子在一定的温度下浓度很低，故反向电流 I_R 很小，一般只有 μA 级，PN 结呈现出高电阻特性。由于少子由本征激发产生，它的浓度取决于温度，所以 I_R 几乎不随外加电压的变化而变化，故常称为反向饱和电流 I_s 。可见，PN 结在反向偏置时基本不导电，处于反向截止状态。PN 结的反向伏安特性如图 1-7 (b) 所示。

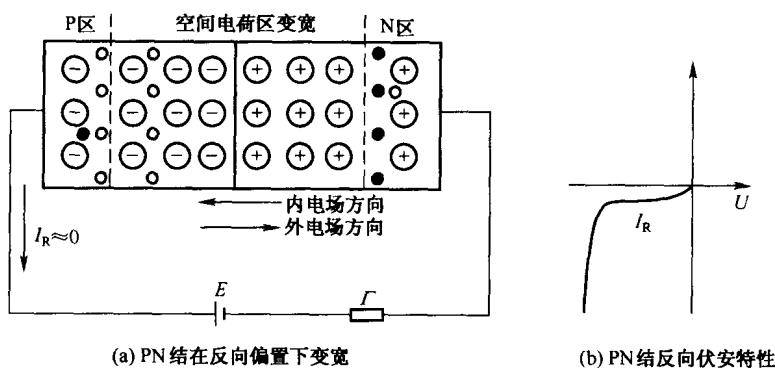


图 1-7 PN 结外加反向电压

综上所述，PN 结正向偏置时，PN 结导通，正向电阻很低，正向电流 I_F 较大；PN 结反向偏置时，PN 结截止，反向电阻很高，反向电流 I_R 很小，这就是 PN 结的单向导电性。单向导电性是 PN 结最基本的特性。

必须指出，当 PN 结的反向电压过大时，反向电流急剧增大，PN 结发生反向击穿现象，单向导电性被破坏。

PN 结内的正负离子层，相当于存储的正负电荷，与极板电容器带电的作用相似，因此 PN 结具有电容效应，这种电容称为结电容或极间电容。

思考与练习

1.2.1 什么是载流子的扩散运动和漂移运动？PN 结的正向电流和反向电流是属于何