



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21

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

# 模拟电子技术基础

杨碧石 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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪高职高专电子技术规划教材

# 模拟电子技术基础

杨碧石 主编

人民邮电出版社  
北京

## 图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础 / 杨碧石主编. —北京: 人民邮电出版社, 2008.4

21 世纪高职高专电子技术规划教材. 普通高等教育“十一五”国家级规划教材.

ISBN 978-7-115-17472-7

I. 模… II. 杨… III. 模拟电路—电子技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 008071 号

## 内 容 提 要

本书介绍半导体的基本知识及其放大电路的基本概念、分析方法和电路指标计算。全书共 10 章。主要内容包括半导体二极管及基本应用电路, 三极管及基本放大电路, 放大电路的频率响应, 集成运算放大器, 模拟信号运算与处理电路, 反馈放大电路, 信号发生电路, 功率放大电路, 直流稳压电源等。本书每章后面都有思考题与习题、实验与实训, 便于读者巩固所学理论知识, 提高分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高职高专院校及应用型本科院校电子、电气、自动化、计算机等有关专业的教材, 也可供自学者、科技人员参考。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪高职高专电子技术规划教材

### 模拟电子技术基础

- 
- ◆ 主 编 杨碧石  
责任编辑 王 平
  - ◆ 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>  
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: 14.25  
字数: 340 千字 2008 年 4 月第 1 版  
印数: 1—3 000 册 2008 年 4 月河北第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-17472-7/TN

定价: 22.00 元

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

反盗版热线: (010) 67171154

# 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 琬 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

## 从书出版前言

遵照教育部提出的高职高专教育以就业为导向,从专业本位向职业岗位和就业为本转变的指导思想,人民邮电出版社与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。

随着职业教育的不断改革深化,各高职高专院校越来越关注人才培养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。如何在保证知识体系完整的同时,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,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,力图达到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是面向生产、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,按照“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,最后通过一个大的完整案例对学生进行综合培训,从而达到对学生职业能力的培养。

以上这些仅是我们高职高专教材出版的初步探索。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](mailto: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

---

随着电子技术的发展，高职高专院校的许多专业相继开设了电子技术课程。电子技术分为“模拟电子技术”和“数字电子技术”，它们均是学习其他有关课程的基础。本书只讨论“模拟电子技术”。

本书是根据《高职高专教育专业人才培养目标及规格》要求，结合作者多年的教学改革和实践经验，以培养高素质、应用型、具备综合工作能力的人才为出发点编著而成的。

编著本书时我们注意精选内容，突出重点，加强基本概念、基本原理、基本分析方法、基本单元电路的训练和培养。由于本课程的工程性较强，因此在分析、计算时往往突出主要矛盾和主要问题，而忽略其次要因素，所以不追求数学上的严密性，而主要着重实用性及基本概念的清晰。

全书共分10章，第1章主要讲述半导体二极管及基本应用；第2、3章主要讨论了三极管基本放大电路的组成原理、工作状态的分析以及放大电路的指标计算。这两章内容是学好本课程的基础；第4章为放大电路的频率响应；第5章为集成运算放大器；第6章为模拟信号运算与处理电路；第7章为负反馈放大电路，负反馈是改善放大电路性能的重要措施；第8章为信号发生电路；第9章为功率放大电路；第10章为直流稳压电源。

本教材由杨碧石主编。在本书编著过程中，得到了戴春风、赵青、姜源等老师和许多专家及同行的大力支持和帮助，并提出了一些宝贵意见，在此，向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免会有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。可通过E-mail发至：[ntybs@126.com](mailto:ntybs@126.com)和[ntybs@mail.ntvc.edu.cn](mailto:ntybs@mail.ntvc.edu.cn)。

编者

2007年11月

# 目 录

第 1 章 半导体二极管及基本应用 .....	1
1.1 半导体的特性 .....	1
1.1.1 本征半导体 .....	2
1.1.2 杂质半导体 .....	2
1.1.3 PN 结的形成 .....	4
1.1.4 PN 结的单向导电性 .....	4
1.2 半导体二极管 .....	5
1.2.1 二极管的伏安特性 .....	6
1.2.2 二极管的主要参数 .....	7
1.3 半导体二极管的基本应用 .....	7
1.3.1 整流电路 .....	7
1.3.2 检波电路 .....	9
1.3.3 限幅电路 .....	10
1.4 特殊二极管 .....	10
1.4.1 稳压二极管 .....	10
1.4.2 变容二极管 .....	12
1.4.3 发光二极管 .....	13
1.4.4 光电二极管 .....	13
1.4.5 激光二极管 .....	14
思考题与习题 .....	14
实验与实训 .....	16
第 2 章 半导体三极管及基本放大电路 .....	17
2.1 双极型三极管 .....	18
2.1.1 三极管的结构和符号 .....	18
2.1.2 三极管的电流分配与放大原理 .....	18
2.1.3 三极管的特性曲线和主要参数 .....	21
2.1.4 特殊三极管简介 .....	23
2.2 共发射极基本放大电路 .....	24
2.2.1 共发射极放大电路的组成 .....	25
2.2.2 单管共射放大电路的放大原理 .....	26
2.3 放大电路的静态分析 .....	26
2.3.1 用估算法确定静态工作点 .....	26
2.3.2 用图解法确定静态工作点 .....	27

2.4	放大电路的动态分析	28
2.4.1	图解法	28
2.4.2	微变等效电路法	32
2.5	工作点稳定电路	37
2.5.1	温度对静态工作点的影响	37
2.5.2	静态工作点稳定电路	37
2.6	放大电路的三种基本组态	40
2.6.1	共集电极放大电路	40
2.6.2	共基极放大电路	42
2.6.3	三种基本组态的比较	43
2.7	多级放大电路	44
2.7.1	多级放大电路的组成	44
2.7.2	多级放大电路的分析计算	45
	思考题与习题	46
	实验与实训	49
<b>第3章</b>	<b>场效应管及基本放大电路</b>	<b>51</b>
3.1	绝缘栅场效应管	51
3.1.1	N沟道增强型MOS管	52
3.1.2	N沟道耗尽型MOS管	54
3.1.3	P沟道MOS管简介	55
3.2	结型场效应管	56
3.2.1	结型场效应管工作原理	56
3.2.2	结型场效应管特性曲线	57
3.2.3	场效应管主要参数	57
3.3	场效应管放大电路	58
3.3.1	场效应管的偏置及其电路的静态分析	59
3.3.2	场效应管的微变等效电路	60
3.3.3	共源极放大电路	61
3.3.4	共漏极放大电路	63
3.3.5	共栅极放大电路	64
	思考题与习题	65
	实验与实训	67
<b>第4章</b>	<b>放大电路的频率响应</b>	<b>68</b>
4.1	频率响应的一般概念	68
4.1.1	幅频特性和相频特性	68
4.1.2	通频带	69
4.1.3	频率失真	69
4.1.4	波特图	69
4.2	三极管的频率参数	73



4.2.1 共射截止频率	74
4.2.2 特征频率	74
4.2.3 共基截止频率	74
4.3 单管共射放大电路的频率响应	75
4.3.1 混合 $\pi$ 等效电路	75
4.3.2 阻容耦合单管共射放大电路的频率响应	76
4.3.3 直接耦合单管共射放大电路的频率响应	78
4.4 多级放大电路的频率响应	79
4.4.1 多级放大电路的幅频特性和相频特性	79
4.4.2 多级放大电路的上限频率和下限频率	79
思考题与习题	79
<b>第 5 章 集成运算放大器</b>	<b>81</b>
5.1 集成运算放大器的特点及基本组成	81
5.1.1 集成运算放大器的基本特点	81
5.1.2 集成运算放大器的基本组成	82
5.2 电流源电路	82
5.2.1 镜像电流源	83
5.2.2 比例电流源	83
5.2.3 微电流源	84
5.3 差动放大电路	85
5.3.1 差动放大电路的静态分析	85
5.3.2 差动放大电路差模信号的动态分析	86
5.3.3 差动放大电路共模信号的动态分析	87
5.3.4 带恒流源的差动放大电路	89
5.4 集成运算放大器中的中间级和输出级电路	91
5.4.1 复合管电路	91
5.4.2 集成运算放大器的输出电路	92
5.5 通用集成运算放大器	92
5.5.1 通用型集成运算放大器 F007	93
5.5.2 集成运算放大器的主要参数	95
5.5.3 理想运算放大器	96
5.5.4 集成运放使用中的几个问题	97
思考题与习题	99
实验与实训	102
<b>第 6 章 模拟信号运算与处理电路</b>	<b>103</b>
6.1 基本运算电路	103
6.1.1 比例运算电路	103
6.1.2 求和运算电路	105
6.1.3 积分与微分运算电路	107

6.2 对数和指数运算电路	111
6.2.1 对数运算电路	111
6.2.2 指数运算电路	112
6.3 模拟乘法器及其应用	112
6.3.1 乘法器的工作原理	112
6.3.2 乘法器应用电路	113
6.4 有源滤波器	114
6.4.1 滤波电路的作用和分类	115
6.4.2 低通滤波器	115
6.4.3 高通滤波器	116
6.4.4 带通滤波器	117
6.4.5 带阻滤波器	117
6.5 电压比较器	118
6.5.1 过零比较器	118
6.5.2 单限比较器	119
6.5.3 滞回比较器(施密特触发器)	119
6.5.4 窗口比较器	121
6.5.5 集成电压比较器	122
6.6 信号检测系统中的放大电路	123
6.6.1 测量放大器	123
6.6.2 电荷放大器	125
6.6.3 隔离放大器	125
思考题与习题	127
实验与实训	131
<b>第7章 反馈放大电路</b>	<b>134</b>
7.1 反馈的概念	135
7.1.1 反馈的基本概念	135
7.1.2 反馈的一般表达式	136
7.2 负反馈放大电路的组态	137
7.2.1 电压串联负反馈放大电路	137
7.2.2 电压并联负反馈放大电路	138
7.2.3 电流串联负反馈放大电路	139
7.2.4 电流并联负反馈放大电路	139
7.3 负反馈对放大电路工作性能的影响	140
7.3.1 提高放大倍数的稳定性	140
7.3.2 减小非线性失真	141
7.3.3 拓宽频带	142
7.3.4 改变输入电阻和输出电阻	142
7.4 深度负反馈放大电路的分析计算	144

7.4.1	利用关系式 $A_f \approx 1/F$ 估算反馈放大电路的电压放大倍数	144
7.4.2	利用关系式 $X_i \approx X_f$ 估算反馈放大电路的电压放大倍数	145
7.4.3	深度负反馈放大电路计算举例	145
7.5	负反馈放大电路的自激振荡和消除方法	147
7.5.1	产生自激振荡的条件和原因	147
7.5.2	消除自激振荡的常用方法	147
	思考题与习题	149
	实验与实训	152
<b>第 8 章</b>	<b>信号发生电路</b>	<b>154</b>
8.1	正弦波信号发生器	154
8.1.1	正弦波振荡电路的基本概念	155
8.1.2	RC 正弦波振荡电路	156
8.1.3	LC 正弦波振荡电路	158
8.1.4	石英晶体振荡电路	164
8.2	非正弦信号发生电路	166
8.2.1	方波发生电路	166
8.2.2	三角波发生电路	168
8.2.3	压控振荡器	169
	思考题与习题	171
	实验与实训	173
<b>第 9 章</b>	<b>功率放大电路</b>	<b>176</b>
9.1	功率放大电路的特点及分类	176
9.1.1	功率放大电路的基本要求	176
9.1.2	功率放大电路的分类	177
9.2	互补对称式功率放大电路	178
9.2.1	OCL 乙类功率放大电路	178
9.2.2	OCL 功率放大电路参数分析计算	179
9.2.3	OCL 甲乙类功率放大电路	181
9.2.4	单电源功率放大电路	182
9.2.5	前置级为运放的功率放大电路	183
9.3	集成功率放大电路	183
9.3.1	集成功率放大器 LM386 简介	184
9.3.2	集成功率放大器 LM386 的应用	185
	思考题与习题	186
	实验与实训	188
<b>第 10 章</b>	<b>直流稳压电源</b>	<b>190</b>
10.1	直流稳压电源的基本组成	190
10.2	滤波电路	191
10.2.1	电容滤波电路	191

10.2.2	LC 滤波电路	194
10.2.3	RC 滤波电路	195
10.3	串联型直流稳压电路	195
10.3.1	电路组成和工作原理	195
10.3.2	输出电压的调节范围	196
10.3.3	调整管的选择	197
10.3.4	稳压电源过载保护电路	198
10.4	集成稳压器	199
10.4.1	三端集成稳压器的组成	199
10.4.2	三端集成稳压器的应用	201
10.4.3	三端式可调集成稳压器	204
10.5	开关型稳压电路	205
10.5.1	开关型稳压电路的特点和分类	205
10.5.2	开关型稳压电源的基本工作原理	206
	思考题与习题	208
	实验与实训	210
	部分参考答案	213
	参考文献	216

# 第 1 章

## 半导体二极管及基本应用

本章主要介绍半导体的特性和半导体二极管。

半导体中存在两种载流子，即自由电子和空穴，电子带负电，空穴带正电。纯净的半导体称为本征半导体，它的导电能力很差。掺有其他元素的半导体称为杂质半导体，其导电能力与掺杂的浓度有关。纯净的半导体中掺入不同的杂质元素，可以得到 N 型半导体和 P 型半导体，N 型半导体中多数载流子是自由电子，P 型半导体中多数载流子是空穴。

采用一定的工艺措施，使 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起，在二者的交界处形成一个空间电荷层—PN 结，这是制造各种半导体器件的基础。

PN 结的基本特点是具有单向导电性，PN 结正向偏置时导通，反向偏置时截止。

半导体二极管就是利用一个 PN 结加上外壳，引出两个电极而制成的，故具有单向导电性，半导体二极管的性能可用其伏安特性来描述，其伏安特性有正向特性和反向特性，分别描述半导体二极管正偏和反偏时的工作性能。

半导体二极管可以用于整流和检波等电路。除普通半导体二极管外，本章还将介绍特殊半导体二极管如稳压二极管、变容二极管、发光二极管、光电二极管等的工作原理和基本应用。

半导体器件是组成各种电子电路包括模拟和数字电路、分立元件和集成电路的基础。本章在讨论半导体的特性的基础上，介绍半导体二极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数及基本应用。

### 1.1 半导体的特性

在物理学中已知，自然界的各种物质，根据其导电能力的差别，可分为导体、绝缘体、半导体三大类。物质的导电性能决定于原子结构的最外层电子，导体一般为低价元素，它们的最外层电子极容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，并在外电场的作用下产生定向移动，形成电流；高价元素（如惰性气体）或高分子物质（如橡胶），它们的最外层电子所受的原子核束缚力很强，很难成为自由电子，所以这些物质的导电性能很差，是绝缘体。而半导体一般为四价元素的物质，例如硅、锗。硅和锗的原子序数分别为 14 和 32。但它们有一个共同点，即原子最外层的轨道上均有 4 个价电子，所以称它们为四价元素。硅（锗）的原子在空间排列成规则的晶格，结构为晶体结构。它们最外层的价电子之间以共价键的形式结合起来，

结构比较稳定。

半导体其导电能力介于导体和绝缘体之间，而且其导电能力在外界其他因素的作用下会发生显著的变化。例如，半导体中加入杂质（称为“掺杂”）后其导电能力（电导率）发生明显的变化，各种不同器件的制作，正是利用了掺杂来改变和控制半导体的导电率；温度的变化也会使半导体的导电率发生变化，利用这种热敏效应，可以制作出热敏元件，但热敏效应也会使半导体器件的热稳定性下降；光照也可以改变半导体的导电率，利用这种光电效应，可以制作出光电二极管、光电三极管、光电耦合器和光电电池等。综上所述，半导体具有掺杂性、热敏性和光敏性 3 个特性。

### 1.1.1 本征半导体

纯净的、不含其他杂质的半导体称为本征半导体。本征半导体在热力学温度  $T=0\text{K}$ （相当于  $-273^{\circ}\text{C}$ ）时不导电，如同绝缘体一样。本征半导体在环境温度升高或光照的作用下，将有少数价电子获得足够的能量，以克服共价键的束缚而成为自由电子。在没有外加电场时自由电子做无规则的运动。价电子离开共价键后，在该共价键处留下一个空位，这种带正电荷的空位称为“空穴”。相邻共价键中的价电子可以在获得能量后移至有空穴的共价键，并在原来的位置上产生一个新的空穴。这种新的空穴可以在外加电场作用下运动，价电子运动填补一个空穴后，在原来所处位置上产生一个新的空穴，空穴运动的方向与价电子运动的方向相反。在没有外加电场时，如同自由电子一样，空穴在晶体中也做无规则的运动，对外部不显现电流。

当有外加电场时，自由电子和空穴都在电场的作用下做定向运动：自由电子带负电逆电场方向而运动，而空穴带正电表现为顺电场方向而运动。这种定向运动叠加在原来的无规则运动上，对外部显现电流。自由电子和空穴都是载运电流的粒子，统称为载流子。将自由电子移动形成的导电现象简称为电子导电，而将空穴移动形成的导电现象简称为空穴导电。

不难看出，在本征半导体中自由电子与空穴总是成对出现的，成为电子-空穴对。本征半导体具有一定的导电能力，但因其自由电子的数量很少，所以导电能力很弱。产生电子-空穴对的物理现象称为激发，激发数目的多少与温度有关。在实际的半导体中，除了产生电子-空穴对以外，还存在一个逆过程。这就是自由电子也会释放能量而进入有空穴的共价键，同时消失一个自由电子和空穴，这种现象称为复合。当温度一定时，激发与复合的数量相等，维持动态平衡。

### 1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在着两种载流子，但因本征半导体载流子的浓度很低，所以它的导电能力很差。但是在本征半导体中掺入某种特定的杂质后，其导电性能将发生质的变化。利用这一特性，可以制成各种性能的半导体器件。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质性质的不同，可以分为电子型半导体和空穴型半导体。载流子以电子为主的半导体称为电子型半导体或 N 型半导体；载流子以空穴为主的半导体称为空穴型半导体或 P 型半导体。

#### 1. N 型半导体

在本征半导体（四价硅或锗的晶体）中掺入少量的五价杂质元素，如磷、锑和砷等，则原

来晶格中的某些硅原子将被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层有5个价电子，因此，它与周围4个硅原子组成共价键时多余一个电子。这个电子不受共价键束缚，而只受自身原子核的吸引。这种束缚力比较微弱，因此，只需较小的能量便可激发使其成为自由电子（如在室温下即可成为自由电子）。因为五价杂质原子可以提供电子，所以称为“施主原子”或“施主杂质”。五价原子提供一个电子（成为自由电子）后，本身因失去电子而成为正离子，但并不产生新的空穴，因为五价原子周围的共价键中没有空穴，这与本征半导体成对产生载流子的原理有所不同。

在这种杂质半导体中，除了由本征激发产生电子-空穴对外，还有五价原子提供的大量自由电子，因而自由电子的浓度将大大高于空穴的浓度，所以主要依靠电子导电，故称为电子型半导体或N型半导体。N型半导体中的自由电子称为“多数载流子”（简称“多子”），而其中的空穴称为“少数载流子”（简称“少子”）。

## 2. P型半导体

在本征半导体中掺入少量的三价杂质元素，如硼、锡和铟等，可以形成P型半导体。此时杂质原子的最外层有3个价电子，因此，它与周围4个硅原子组成共价键时，由于缺少一个电子而形成空穴。因为三价杂质原子提供一个空穴而可以接受一个电子，所以称为“受主原子”或“受主杂质”。在这种杂质半导体中，空穴的浓度将大大高于自由电子的浓度。因主要依靠空穴导电，故称为空穴型半导体或P型半导体。P型半导体中的空穴称为“多数载流子”（简称“多子”），而其中的自由电子称为“少数载流子”（简称“少子”）。

在杂质半导体中，多数载流子的浓度主要取决于掺入的杂质浓度；而少数载流子的浓度主要取决于温度。

对于杂质半导体来说，无论是N型半导体或P型半导体，从总体上看，仍然保持着电中性。以后，为简单起见，通常只画出其中的正离子和等量的自由电子来表示N型半导体；同样，只画出负离子和等量的空穴来表示P型半导体，杂质半导体（N型、P型）的简化表示方法分别如图1.1(a)和(b)所示。

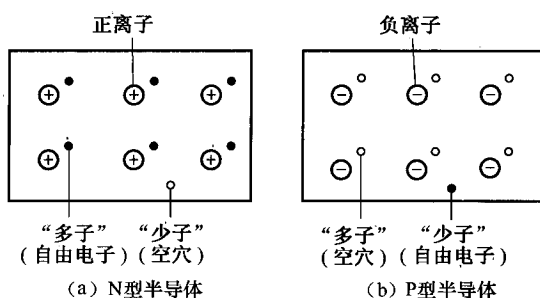


图 1.1 杂质半导体的简化表示法

总之，在纯净的半导体中掺入杂质以后，其导电性能将大大改善。例如，在四价的硅原子中掺入百万分之一的三价杂质硼原子后，在室温时的电阻率与本征半导体相比，将下降到五十万分之一，可见导电能力大大提高了。当然，仅仅提高导电能力不是最终目的，因为导体的导电能力更强。杂质半导体的奇妙之处在于，掺入不同性质、不同浓度的杂质，并使P型半导体和N型半导体采用不同的方式组合，可以制造出形形色色、品种繁多、用途各异的半导体器件。

### 1.1.3 PN 结的形成

将 P 型半导体与 N 型半导体在保证晶格连续的情况下结合在一起，在其交界面形成一个具有特殊导电性能的区域—PN 结。PN 结是构造半导体器件的基本单元。

半导体内的电流就其实质来说，和导体中的电流一样，都是电子在移动。但半导体中电子的移动比导体要复杂得多。首先，导体中只有自由电子导电，而半导体中，除了自由电子形成电流外，还有空穴运动形成电流。其次，导体中是自由电子在电场作用下运动产生电流，而在半导体中有两种运动产生电流。

在 P 型半导体和 N 型半导体交界面两侧，电子和空穴的浓度截然不同，P 型区内空穴浓度远远大于 N 型区，N 型区内电子浓度远远大于 P 型区。由于存在浓度差，所以 P 型区内空穴向 N 型区扩散，N 型区内电子向 P 型区扩散。这种由于存在浓度差引起的载流子从高浓度区域向低浓度区域的运动称为扩散运动，所形成的电流称为扩散电流。

P 型区的空穴向 N 型区扩散并与 N 型区的电子复合，N 型区的电子向 P 型区扩散并与 P 型区的空穴复合。P 型区一边失去空穴，留下了带负电的“受主杂质离子”；N 型区一边失去电子，留下了带正电的“施主杂质离子”。这些带电的杂质离子，由于物质结构的关系，不能随意移动，不参与导电。因而在交界面附近出现了带离子集中的薄层，称为空间电荷层，又称耗尽层或阻挡层，如图 1.2 所示。空间电荷区的左半部是带负电的杂质离子，右半部是带正电的杂质离子，从而在空间电荷区中就形成了一个由 N 型区指向 P 型区的内建电场，称为内电场。在内电场的作用下，N 型区中的“少子”空穴向 P 型区漂移，P 型区中的“少子”电子向 N 型区漂移。载流子在内电场作用下的这种运动称为漂移运动，所形成的电流称为漂移电流。

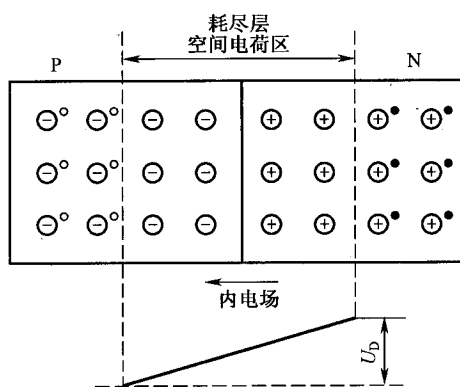


图 1.2 PN 结的形成

综上所述，在半导体 PN 结中进行着两种载流子运动，多数载流子的扩散运动和少数载流子的漂移运动，而两种运动相互制约，最终两种载流子运动达到动态平衡。达到动态平衡后的 PN 结，内建电场的方向由 N 型区指向 P 型区，说明 N 型区的电位比 P 型区高，这个电位差称为电位势垒  $U_D$ （又称“导通电压”或“死区电压”）。电位势垒与材料有关，硅材料约为  $0.6V \sim 0.8V$ ，锗材料约为  $0.2V \sim 0.3V$ 。

### 1.1.4 PN 结的单向导电性

假设在 PN 结加上一个正向电压，即电源的正极接 P 型区，电源的负极接 N 型区。PN 结的这种接法称为正向接法或称正向偏置（简称正偏）。

正向接法时，外电场的方向与 PN 结中内电场的方向相反，因而削弱了内电场。此时，在外电场的作用下，P 型区中的空穴向右移动，与空间电荷区内的一部分负离子中和；N 型区中的电子向左移动，与空间电荷区内的一部分正离子中和。结果，由于多子移向了耗尽层，使空间电荷区的宽度变窄，于是电位势垒也随之降低，这将有利于多数载流子的扩散运动，



而不利于少数载流子的漂移运动。因此，回路中的扩散电流将大大超过漂移电流，最后形成一个较大的正向电流，其方向在PN结中是从P型区流向N型区。

正向偏置时，只要在PN结两端加上一定的正向电压（大于电位势垒），即可得到较大的正向电流。为了防止回路中电流过大，一般可接入一个电阻。

假设在PN结上加上一个反向电压，即电源的正极接N型区，而电源的负极接P型区，这种接法称为反向接法或反向偏置（简称反偏）。

反向接法时，外电场的方向与PN结中内电场的方向一致，因而增强了内电场的作用。此时，外电场使P型区中的空穴和N型区中的电子各自向着远离耗尽层的方向移动，从而使空间电荷区变宽，同时电位势垒也随之增高，其结果将不利于多数载流子的扩散运动，而有利于少数载流子的漂移运动。因此，漂移电流将超过扩散电流，于是在回路中形成一个基本上由少数载流子运动产生的反向电流，方向在PN结中是从N型区流向P型区。因为少数载流子的浓度很低，所以反向电流的数值非常小。在一定温度下，当外加反向电压超过某个值（大约零点几伏）后，反向电流将不再随着外加反向电压的增加而增大，所以又称为反向饱和电流，通常用符号 $I_S$ 表示。正因为反向饱和电流是由少数载流子产生的，所以对温度十分敏感。随着温度的升高， $I_S$ 将急剧增大。

综上所述，当PN结正向偏置时，回路中将产生一个较大的正向电流，PN结处于导通状态；当PN结反向偏置时，回路中的反向电流非常小，几乎等于零，PN结处于截止状态。可见，PN结具有单向导电性。

## 1.2 半导体二极管

在PN结的外面装上管壳，再引出两个电极，就可以做成半导体二极管（以下称作二极管）。图1.3所示为二极管的图形符号，其中正极（阳极）从P型区引出，负极（阴极）从N型区引出。

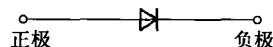


图 1.3 二极管的符号

二极管的类型很多，从制造二极管的材料来分，有硅二极管和锗二极管。从管子的结构来分，主要有点接触型和面结型。点接触型二极管的特点是PN结的面积小，因而，管子中不允许通过较大的电流，但是因为它们的结电容也小，可以在高频下工作，适用于检波电路。面接触型二极管则相反，由于PN结的面积大，故允许流过较大的电流，但只能在较低频率下工作，可用于整流电路。此外还有一种开关型二极管，适于在脉冲数字电路中作为开关管。常用的几种二极管的外形如图1.4所示。

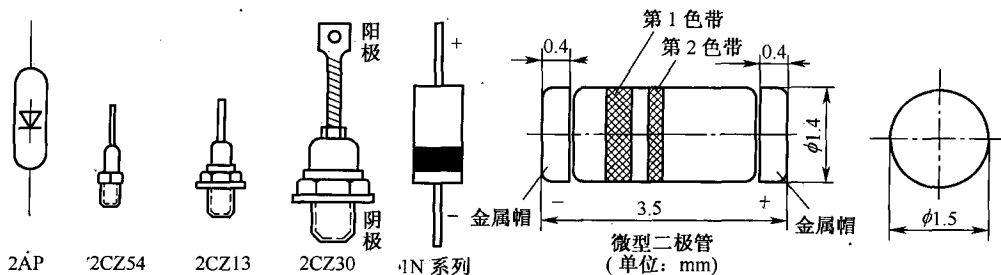


图 1.4 几种常用二极管的外形图