

高职高专机电工程类规划教材

模拟电子技术

林春景 主编

- ISBN 978-7-111-21178-5
- 策划编辑：王海峰
- 封面设计 / 电脑制作：马精明

编辑热线：(010)68354423

地址：北京市百万庄大街22号	邮政编码：100037
联系电话：(010) 68326294	网址： http://www.cmpbook.com
(010) 68993821	E-mail: online@cmpbook.com

定价：20.00 元

ISBN978-7-111-21178-5



9 787111 211785 >

高职高专机电工程类规划教材

模拟电子技术

主 编 林春景
副主编 袁俐萍 张汉杰 何立居
参 编 崔 晓 王凤基 陈晓亮 李克勤



机械工业出版社

本书是为了适应当前高职高专模拟电子电路课程的教学改革而编写的。内容包括：半导体二极管、半导体三极管、放大电路基础、负反馈放大电路、集成运算放大器基本原理和应用、信号产生与变换电路、直流稳压电源、模拟电子系统综合设计训练及基本实验。本书以“讲透基本原理，打好模拟电子电路基础，面向集成电路”为宗旨，强调物理概念的描述，避免复杂的数学推导、重在培养学生的电子技术技能，在若干知识点的阐述上，具有一定的个性特点。

本书适于作为高职高专院校电工电子类、电气类、自动化类、通信工程类、机电一体化等相关专业的教材和教学参考书，也可供其他相关专业选用和社会工程人员阅读。

景春林 主 编

刘 燕 主 编

王 莉 参 审

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术/林春景主编. —北京: 机械工业出版社, 2007. 3

高职高专机电工程类规划教材

ISBN 978-7-111-21178-5

I. 模… II. 林… 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 (2007) 第 036997 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王海峰 责任编辑: 葛晓慧 版式设计: 霍永明

责任校对: 李秋荣 封面设计: 马精明 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2007 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13 印张 · 321 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-21178-5

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 68354423

封面无防伪标均为盗版

前言

本书是根据高职高专培养目标的要求,本着理论够用为度、应用为主、注重实践的教学思想编写的,可作为高职高专的电工电子类、电气类、自动化类、通信工程类、机电一体化等相关专业的模拟电子技术课程教材。

本书的编写人员均来自于高职高专电子技术教学第一线,具有多年教授模拟电子技术课程的理论基础,又有丰富的实践经验。根据高职高专学生理论基础较差的实际情况,本书在编写过程中,简化了繁杂的数学公式推导以及集成电路的内部结构分析,力求简明扼要、深入浅出、通俗易懂、突出重点,加强基本概念、基本原理、基本分析方法的训练和培养;在分析、计算时突出主要矛盾和主要问题,忽略次要因素,注重实际应用及物理概念的清晰;贯彻理论与实践相结合、以应用为目的、理论够用的原则,突出高职高专的教学特色。

本书的内容兼顾了模拟电子技术的新发展,注重介绍模拟电路的新理论、新技术、新器件。为了反映现代电子技术的新成果、新技术,本书介绍了一些常用的最新模拟集成电路,如集成运算放大器、集成三端式稳压器、开关电源等。

为便于教与学,本书每章后面都有小结,并配有多种类型的例题、习题。例题是为巩固基本概念、基础知识、扩充基本内容所用。习题包括为加强理解基本内容而设的习题,也有为加深理解基本理论、基本概念,起到举一反三之功效而设的较难的习题,还有结合实际的应用习题,便于开拓视野,掌握实际应用知识。

本书主要包括:半导体二极管、半导体三极管、放大电路基础、负反馈放大电路、集成运算放大器基本原理和应用、信号产生与变换电路、直流稳压电源、模拟电子系统综合设计训练及基本实验等9部分。

本书由广东白云学院林春景教授担任主编,海军兵种指挥学院袁俐萍副教授、广州大学松田学院张汉杰教授、广州航海高等专科学校何立居副教授担任副主编。广东女子职业技术学院王凤基高级讲师编写第1章,广东白云学院崔晓编写第2、3章,广州大学松田学院陈晓亮编写第4章,广州大学松田学院张汉杰编写第5章,林春景编写第6、7章,袁俐萍与何立居共同编写第8章和第9章。全书由林春景教授统稿。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中难免有不妥之处,恳请读者和使用本书的教师批评、指正,以便我们不断改进。

编者

目 录

前言

第1章 半导体二极管	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 半导体及其特性	1
1.1.2 本征半导体	2
1.1.3 杂质半导体	3
1.1.4 PN结及其单向导电性	5
1.2 半导体二极管	6
1.2.1 二极管的外形、结构及符号	6
1.2.2 二极管的伏安特性	8
1.2.3 二极管的击穿特性	9
1.2.4 二极管的主要参数	10
1.3 二极管电路的分析方法	10
1.4 特殊二极管介绍	13
1.4.1 硅稳压二极管	13
1.4.2 发光二极管	16
1.4.3 光敏二极管	17
1.4.4 变容二极管	17
1.4.5 激光二极管	17
1.5 整流滤波电路	18
1.5.1 整流电路	18
1.5.2 滤波电路	20
1.6 半导体二极管的应用	22
1.6.1 整流	22
1.6.2 钳位	22
1.6.3 限幅	22
小结	23
习题	24
第2章 半导体三极管	29
2.1 晶体管	29
2.1.1 晶体管的工作原理	29
2.1.2 晶体管的特性曲线	32
2.1.3 晶体管的主要参数	34
2.1.4 温度对晶体管参数的影响	36
2.1.5 晶体管在电子技术中的应用	37
2.2 场效应晶体管	37
2.2.1 结型场效应晶体管	38

2.2.2 MOS绝缘栅场效应晶体管	42
2.2.3 场效应晶体管使用注意事项	44
小结	45
习题	45
第3章 放大电路基础	48
3.1 放大电路的基本知识	48
3.1.1 放大电路的基本组成	48
3.1.2 放大电路的工作原理	49
3.1.3 放大电路的主要性能指标	50
3.2 三种基本组态放大电路	53
3.2.1 共发射极放大电路	53
3.2.2 共集电极放大电路	64
3.2.3 共基极放大电路	66
3.2.4 三种晶体管基本放大电路的比 较	68
3.3 互补对称功率放大电路	68
3.3.1 甲类功率放大电路	69
3.3.2 乙类双电源互补对称功率放大电 路	69
3.3.3 集成功率放大器及其应用	72
3.4 多级放大电路	76
3.4.1 多级放大电路的组成	76
3.4.2 多级放大电路主要性能指标及估 算	76
小结	79
习题	80
第4章 负反馈放大电路	85
4.1 负反馈放大电路的组成及基本类型	85
4.1.1 负反馈放大电路的组成及基本 关系	85
4.1.2 负反馈放大电路的基本类型	86
4.1.3 负反馈放大电路的分析	88
4.2 负反馈对放大电路的影响	89
4.2.1 提高增益的稳定性	89
4.2.2 减小失真和扩展通频带	90
4.2.3 改变电路的输入、输出阻抗	91
4.3 负反馈放大电路应用中的几个问题	93

4.3.1 放大电路引入负反馈的一般原理	93	6.3 LC 振荡电路	124
4.3.2 深度负反馈放大电路的特性及性能	93	6.3.1 变压器反馈式 LC 振荡电路	124
4.3.3 负反馈放大电路的稳定性	95	6.3.2 电感反馈式 LC 振荡电路	125
小结	97	6.3.3 电容反馈式振荡电路	126
习题	99	6.3.4 串联改进型电容反馈式 LC 振荡电路	127
第 5 章 集成运算放大器基本原理和应用	101	6.3.5 判断三点式振荡电路是否满足相位平衡条件的简便方法	128
5.1 集成运算放大器的基本工作原理	101	6.4 石英晶体振荡电路	130
5.1.1 集成运算放大器的基本组成	101	6.4.1 石英晶体的结构	130
5.1.2 F007 集成运放内部电路组成介绍	101	6.4.2 晶体的压电效应	130
5.1.3 通用型集成运放的主要特性参数	103	6.4.3 石英晶体谐振电路符号及其性能	131
5.2 基本运算电路	104	6.4.4 石英晶体振荡电路	131
5.2.1 比例运算电路	105	6.5 非正弦信号发生器	133
5.2.2 加法运算电路	107	6.5.1 矩形波发生器	133
5.2.3 差动放大器	108	6.5.2 三角波发生器	134
5.2.4 微分电路和积分电路	109	6.5.3 锯齿波发生器	135
5.3 集成运算放大器小信号交流放大电路	111	6.6 集成函数发生器 8038 简介	136
5.3.1 反相交流放大电路	111	6.6.1 8038 的组成和工作原理	136
5.3.2 同相交流放大电路	112	6.6.2 8038 的典型应用	137
5.4 几种常用的集成运算放大器介绍	112	* 6.7 压控振荡器	138
5.4.1 LM324 运放简介	112	6.7.1 电路组成和工作原理	138
5.4.2 NE5532、NE5534 系列集成运放简介	113	6.7.2 振荡频率	139
小结	116	小结	140
习题	116	习题	141
第 6 章 信号产生与变换电路	119	第 7 章 直流稳压电源	144
6.1 正弦波振荡电路基础知识	119	7.1 概述	144
6.1.1 自激振荡现象	119	7.1.1 演示电路	144
6.1.2 产生正弦波振荡的条件	119	7.1.2 操作过程	144
6.1.3 正弦波振荡的形成过程	120	7.2 直流稳压电源	145
6.1.4 振荡电路的组成	120	7.2.1 直流稳压电源的组成	145
6.1.5 振荡电路的分析方法	120	7.2.2 直流稳压电源的主要技术指标	145
6.1.6 振荡器的稳定性	121	7.3 并联稳压电路及其工作原理	146
6.1.7 正弦波振荡电路的分类	121	7.3.1 电路组成	146
6.2 RC 正弦波振荡电路	122	7.3.2 工作原理	146
6.2.1 RC 桥式振荡电路	122	7.3.3 元器件选择	147
6.2.2 RC 移相式振荡电路	123	7.3.4 并联稳压电源适用场合	148
		7.4 串联反馈型稳压电路	148
		7.4.1 电路组成	148
		7.4.2 工作原理	149
		7.4.3 输出电压计算	149
		7.5 三端集成稳压器	150

7.5.1 三端固定式集成稳压器引脚	150
7.5.2 三端固定式集成稳压器的型号组成及意义	151
7.5.3 三端固定式集成稳压器的应用	151
7.6 三端可调式集成稳压器	154
7.6.1 分类	154
7.6.2 型号组成、引脚意义及应用	154
7.7 开关电源	155
7.7.1 开关电源结构	156
7.7.2 开关型电路的工作原理	156
7.7.3 实例分析	157
小结	159
习题	159
第8章 模拟电子系统的综合设计训练	162
8.1 设计流程	162
8.2 总体方案	162
8.2.1 总体框图	163
8.2.2 总体方案的论证	163
8.3 单元电路的设计	163
8.3.1 确定电路	163

8.3.2 电路元器件参数的估算	164
8.3.3 性能指标的验证及元器件参数的确定	164
8.3.4 设计举例	164
小结	168
习题	168
第9章 基本实验	171
实验1 单级放大器	171
实验2 OTL功率放大器	174
实验3 电流负反馈放大电路和发射极输出器	177
实验4 运算放大器	180
实验5 串联稳压电路	183
实验6 集成电路振荡器	186
实验7 两级放大和电压负反馈电路	189
实验8 差动放大器	191
实验9 集成稳压器	193
实验10 整流滤波电路	195
实验11 运放应用	198
参考文献	202

第1章 半导体二极管

20 世纪的前半世纪, 电子器件普遍使用真空电子管, 但真空电子管存在体积大、耗电多、价格贵等缺点。1948 年世界上诞生了第一个晶体管。由于晶体管以及其他半导体器件体积小、重量轻、耗电少、寿命长、可靠性高、价格低廉等一系列优点, 很快便在电子技术中取代了电真空器件, 从而开始了电子技术发展的新纪元。半导体二极管也称晶体二极管, 是现代科技运用最广泛的电子器件之一, 它的核心部分是 PN 结。因此, 本章先介绍半导体基本知识和 PN 结的形成, 在此基础上再介绍半导体二极管的结构、特性、主要参数和主要用途等。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体及其特性

我们在中学学习过, 自然界中的物质, 按其导电能力可分为导体、半导体和绝缘体三大类。金、银、铜、铁、铝等金属材料是良导体, 是容易导电的物质, 其电阻率为 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$; 塑料、陶瓷、橡胶等材料是绝缘体, 其电阻率为 $10^{10} \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 导电能力很弱; 还有一些物质如硅、锗及有些化合物等, 它们的导电能力介于导体和绝缘体之间, 称为半导体, 其电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。由于绝大多数半导体的原子排列呈晶体结构, 所以半导体也称晶体, 由半导体构成的器件也称晶体管。最常用的半导体材料有锗 (Ge) 和硅 (Si)。

科学家通过实验研究发现, 半导体材料具有以下一些独特的导电特性。

1. 热敏性

所谓热敏性是指半导体的电导率随温度升高 (例如受热辐射) 而显著增大的特性, 即温度升高其导电能力大大加强。温度对半导体材料的导电性能影响很大, 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, 也就是其导电能力增加一倍。硅在 200°C 时的导电能力要比室温时增强几百甚至几千倍。利用半导体对温度十分敏感的特性, 可以制造自动控制中常用的热敏电阻及其他热敏元器件用于检测温度的变化。当然, 这种特性对半导体器件的其他工作性能也有许多不利的影响, 在应用中必须加以克服。

2. 光敏性

有的半导体材料在无光照时电阻率很高, 而一旦受到光线照射后电阻率即显著下降。例如硫化镉材料在一般灯光照射下, 它的电阻率是移去灯光后电阻率的几十分之一或几百分之一。利用这种特性可以制成光敏元器件, 如光敏电阻、光敏二极管、光敏晶体管等, 从而实现路灯、航标灯的自动控制或制成火灾报警装置、光控制开关等。

3. 杂敏性

在纯净的半导体材料中掺入某种微量的元素 (如硼和磷等) 后, 其导电能力将猛增几

万倍甚至百万倍。这是半导体最显著、最突出的特性。例如在纯硅中掺入 $1/10^6$ 的硼，即可使其电阻率从 $0.214 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 下降到 $0.4 \Omega \cdot \text{cm}$ ，其导电能力增强 10^6 倍。掺入的微量元素，我们称之为“杂质”。利用掺“杂”的方法，能制造出各种不同性能、不同用途的半导体器件。

1.1.2 本征半导体

常用的半导体材料有硅 (Si) 和锗 (Ge) 以及化合物砷化镓 (GaAs)、碳化硅 (SiC) 和磷化铟 (InP) 等，其中以硅 (Si) 和锗 (Ge) 最为常用。所谓本征半导体，就是纯净的、不含“杂质”的、而且具有完整晶体结构的半导体。例如纯净的硅 (Si) 和纯净的锗 (Ge) 就是本征半导体材料 (如图 1-1 和图 1-2 所示)。本征半导体需要用复杂的工艺和技术才能制造出来，这也是半导体材料没有比导体和绝缘体材料应用得早的原因。

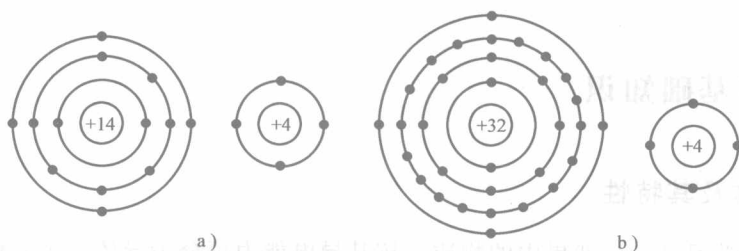


图 1-1 原子结构示意图

a) 硅 b) 锗

1. 本征半导体的结构模型

本征硅原子的最外层轨道上有四个电子，如图 1-1a 和图 1-2 所示。它们受原子核的束缚力最小，称为价电子。从图 1-3 中可看到，硅原子的每一个价电子分别与相邻硅原子的一个价电子组成一个价电子对，这个价电子对为相邻两个原子所共有。价电子对中的每一个价电子，一方面围绕原来的原子核转动，同时又围绕相邻原子核转动，它们同时受到两原子核的吸引作用。我们把这种对共有价电子所形成的束缚作用叫做共价键。每个硅原子的四个价电子都通过共价键与周围的四个原子发生作用，相互结合，形成整齐有序的晶体结构。图 1-3 所示是其晶体结构的示意图。图中画的是二维结构，实际上晶体结构是三维的。



图 1-2 硅原子简化模型图

我们把这种对共有价电子所形成的束缚作用叫做共价键。每个硅原子的四个价电子都通过共价键与周围的四个原子发生作用，相互结合，形成整齐有序的晶体结构。图 1-3 所示是其晶体结构的示意图。图中画的是二维结构，实际上晶体结构是三维的。

2. 本征半导体中的两种载流子——电子和空穴

在温度 $T = 0\text{K}$ (绝对零度) 时，如果没有外界激发，硅原子的所有价电子都被共价键所束缚，不会形成自由电子，因此，称为束缚电子。此时本征半导体硅中没有可以自由运动的带电粒子，因此不会形成传导电流，如同绝缘

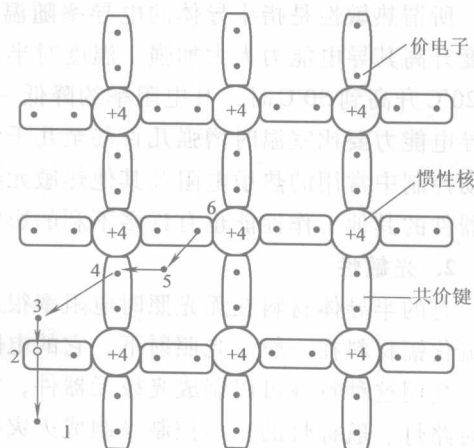


图 1-3 本征硅的共价键结构

体一样。但是与绝缘体材料相比，半导体材料中的价电子受共价键的束缚力较小，只要得到较小的能量，价电子就会摆脱共价键的束缚，成为自由电子。例如硅原子中的价电子只要获得 1.21eV 的能量，就会变成自由电子。因此，在一定温度或在一定强度光的照射下，少数价电子可以从外界获得足够的能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子。当温度达到一定时，较多的价电子都会受到热能激发，变为自由电子，这种物理现象称为本征激发。这种自由电子和金属中的自由电子是一样的，是可以参与导电的。

当一个价电子变为自由电子后，在共价键上留下了一个空位，这个空位被称为空穴。空穴是由自由电子本征激发形成的。

硅原子中，其正负电荷的数量是平衡的。失去一个带负电荷的电子后（同时留下一个空穴），它将多一个正电荷，因此可以说，空穴是带正电的。在半导体材料中，自由电子和空穴的数量是相等的。从宏观上看，它仍然是电中性的。由于共价键中出现了空穴，当外电场作用时，就会有其他相邻共价键的价电子被吸引过来填补这个空位，而在其原有的位置上留下一个空位。图 1-3 中，2 处的电子受到本征激发跑到 1 处，变成自由电子，在 2 处留下空位。出于同样的原因，4 处的价电子受到本征激发跑到 3 处，变成自由电子，来填补 2 处的空位，而在 4 处形成新的空位……。这样，无论从形式上看，还是从实际效果看，都好像是空穴在运动一样。实际上，空穴运动形成的电流是束缚电子运动而形成的电流，这和金属导电的机制是不同的。

空穴和自由电子总是成对出现，因此，叫做电子-空穴对。自由电子和空穴都是可以参与导电的带电粒子，称为载流子。但要注意的是，空穴只是概念上的带电粒子，其运动形成的电流仍然是电子运动形成的。本征半导体在外电场作用下，其电流为电子流与空穴流之和。

如果自由电子与空穴相遇，即电子填补空穴，使电子-空穴对消失，这种现象称之为复合。电子-空穴对的产生与复合，是一对矛盾运动，在一定温度下它们可以达到动态平衡，电子-空穴对的数目相对地保持不变。当温度升高或受到光照时，电子-空穴对的数量增加，本征半导体的导电能力随之增强。虽然本征半导体中有电子和空穴两种载流子，而金属导体中只有电子一种载流子，但由于前者的载流子浓度远远低于后者，所以本征半导体的导电能力还是远远不如金属导体。

1.1.3 杂质半导体

在室温下，本征半导体材料本身的载流子浓度很低，导电能力很差，而且也不好控制，因而本征半导体材料不能用来制造半导体器件。但如果在本征半导体材料中掺入微量的“杂质”元素，可以大大提高半导体的导电能力，而且可以利用“杂质”掺杂的多少来精确地控制半导体的载流子浓度，这使得半导体材料在实际中得到广泛的应用。掺入“杂质”元素后的半导体称为杂质半导体。按照掺入“杂质”元素类型的不同，可以分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

如果在四价的本征半导体硅元素中采用扩散工艺，掺入微量五价元素，如磷（P）、砷（As）等，则在半导体内会产生许多自由电子，这种半导体叫做 N 型半导体，图 1-4 所示为 N 型半导体的内部结构平面示意。当在本征四价硅元素中掺入五价磷（P）后，则磷原子将

会代替原来晶格位置上的硅原子，因磷原子最外层有五个价电子，其中的四个价电子与周围的四个硅原子的价电子组成共价键，另外还有一个价电子无法组成共价键，这个价电子受到的束缚力很小，只要得到微小能量（ 0.05eV 左右）就会变成自由电子，而一般硅原子的价电子变成自由电子则需要得到 1.21eV 的能量。因此，掺入“杂质”后，其自由电子显著增加，上述过程被称为杂质电离。失去一个价电子的磷原子带有一个正电荷，变为正离子。在室温下，N 型半导体中所有的磷原子都会发生杂质电离，使一个价电子变为自由电子。由于杂质元素磷可以提供自由电子，因而称为施主杂质。

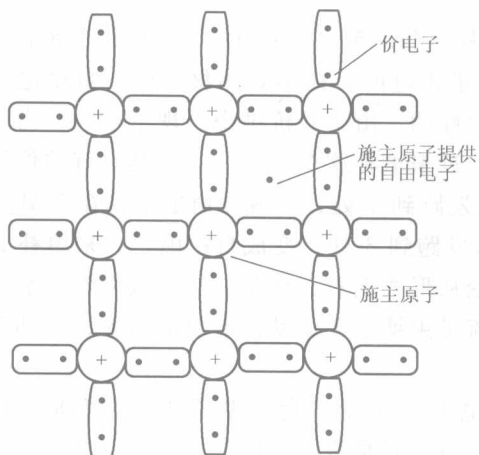


图 1-4 N 型半导体

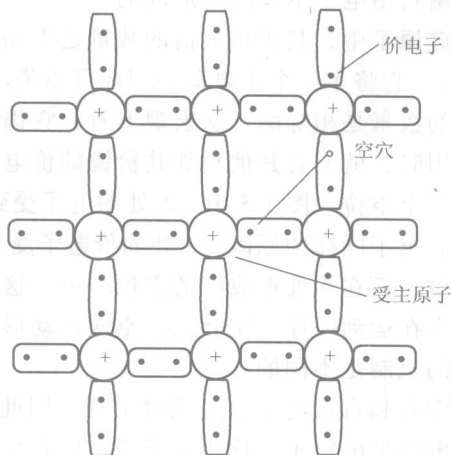


图 1-5 P 型半导体

在 N 型半导体中，载流子电子数远大于空穴数，所以电子是 N 型半导体中的多数载流子，简称“多子”，空穴是 N 型半导体中的少数载流子，简称“少子”。但整个 N 型半导体是呈现电中性的，就像一根未接入电路中的导线呈电中性一样。N 型半导体在外界电场作用下，电子电流远大于空穴电流，它是以电子导电为主的半导体，所以又被称为电子型半导体。半导体中多子的浓度取决于掺入杂质的多少，少子的浓度与温度有密切的关系。

2. P 型半导体

如果在四价的本征半导体硅元素中掺入微量三价元素，如硼（B）、镓（Ga）等，则在半导体内将会产生大量空穴，空穴的数量比自由电子大得多，这种半导体叫做 P 型半导体。图 1-5 所示为 P 型半导体的内部结构示意。当在四价的本征半导体硅元素中掺入微量三价元素，如硼（B）后，则硼原子将会代替原来晶格位置上的硅原子，硼原子最外层有三个价电子，与周围的四个硅原子组成共价键时缺少一个价电子，因而出现了一个空位，相邻共价键上的价电子受激发就会来填补这个空位。这样，硼原子多了一个电子，变成带负电荷的负离子，而失去价电子的硅原子形成了一个空穴，这也是一个杂质电离的过程。在室温下，P 型半导体中的所有硼原子都会发生杂质电离，产生空穴。由于杂质元素硼可以接收自由电子，因而称为受主杂质。

在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，简称“多子”，电子是少数载流子，简称“少子”。但整个 P 型半导体是呈现电中性的。P 型半导体在外界电场作用下，空穴电流远大于电子电流。P 型半导体是以空穴导电为主的半导体，所以它又被称为空穴型半导体。

在半导体中，少数载流子的浓度与本征激发和复合有关，受温度的影响也很大，所以它对半导体器件的温度特性产生很大影响。在同一块半导体材料中，如果既掺入施主杂质又掺入受主杂质后，它会成为哪种半导体材料要由施主杂质和受主杂质的密度决定，哪一种密度高，就成为哪种半导体。由此可见，适当控制掺杂的密度，可以使 P 型和 N 型半导体相互转换。

1.1.4 PN 结及其单向导电性

在本征半导体的材料中掺入“杂质”后，其载流子浓度大大提高，导电能力大大增强。然而，提高导电能力并不是目的，因为其导电能力再强，也远比不上金属导体。单纯的一块 P 型半导体或 N 型半导体，只能作为一个电阻元件，意义不大。但如果通过一定方法使 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起，在其交界处就会形成一种特殊结构——PN 结。PN 结包含的一系列极其重要的物理特性，使它成为现代半导体工业和电子技术的基础。半导体二极管、半导体三极管、晶闸管、集成电路等各种半导体器件都是基于 PN 结制成的。

1. PN 结的形成

在一块完整的本征硅（或锗）片上，用不同的掺杂工艺使其一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，在这两种杂质半导体的交界面附近就会形成一个具有特殊性质的薄层，这个特殊的薄层就是 PN 结。由于 P 区与 N 区之间存在着载流子浓度的显著差异，即 P 区空穴多、电子少，N 区电子多、空穴少，于是在 P 区与 N 区的交界面处发生载流子的扩散运动。所谓扩散运动，就是因浓度差而引起的载流子从浓度高的区域向浓度低的区域运动。扩散的结果使交界面附近的 P 区因空穴减少而呈现负电，N 区因电子减少而呈现正电。这样，在交界面上出现了由正负离子构成的空间电荷区，这就是 PN 结。如图 1-6 和图 1-7 所示。

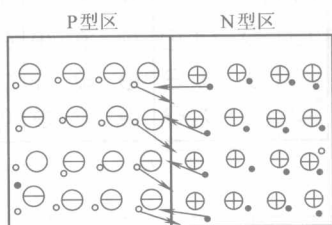


图 1-6 载流子的扩散

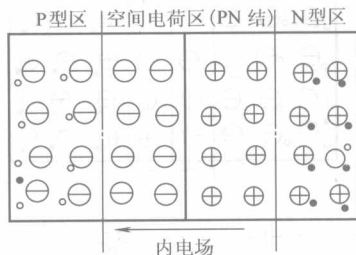


图 1-7 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电性

PN 结形成后，PN 结的空间离子的数量相对稳定，内电场的大小也稳定下来。但如果将 PN 结外接电压后，就会出现一个非常重要的特性——单向导电性。所谓单向导电性，就是电路只允许电流朝一个方向流动的特性。这种特性可由实验得到验证。如图 1-8a 所示，当 P 区接电源正极，N 区接电源负极时，电路中有较大电流流过，电路导通，灯泡亮；当 N 区接电源正极，P 区接电源负极时，电路中只有很小的电流流过，灯泡不亮，如图 1-8b 所示。这是因为，当 P 区接电源正极，N 区接电源负极时，在 P 型区和 N 型区就会形成一个从 P 型区指向 N 型区的外电场。在这个电场作用下，P 型区的空穴就顺着电场方向运动，N 型区的电子就会逆着电场方向运动。在空穴和电子的运动过程中，二者会相互中和，使 PN 结的

空间离子的数量越来越少，这样 PN 结就越来越薄，外电流就顺利流过，如图 1-9 所示。当 N 区接电源正极，P 区接电源负极时，在 P 型区和 N 型区就会形成一个从 N 型区指向 P 型区的外电场。在这个电场作用下，P 型区的空穴就顺着电场方向运动，N 型区的电子就会逆着电场方向运动，使 PN 结的空间离子的数量越来越多，这样 PN 结就越来越厚，外电流就难以流过，如图 1-10 所示。第一种接法叫正向偏置，其外加电压叫正向偏置电压，形成的电流叫做正向电流；第二种接法叫反向偏置，其外加电压叫反向偏置电压，形成的电流叫做反向电流。正向电流大，反向电流很小。而且当外加正向偏置电压稍微增加时，正向电流便迅速上升；而当温度一定时，反向电流几乎不随外加反向偏置电压的变化而变化，所以又称反向饱和电流。反向饱和电流受温度的影响很大，但由于反向电流的值很小，与正向电流相比，一般可以忽略，所以 PN 结反向偏置时，处于截止状态，呈现的电阻很大。因此，PN 结正偏时导通；PN 结反偏时截止，这就是 PN 结的单向导电性。

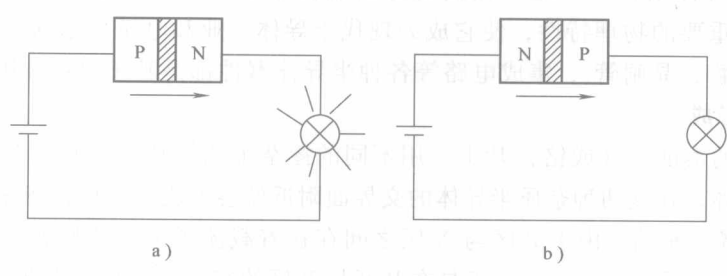


图 1-8 PN 结的单向导电性

a) P 接电源正极灯亮 b) N 接电源正极灯不亮

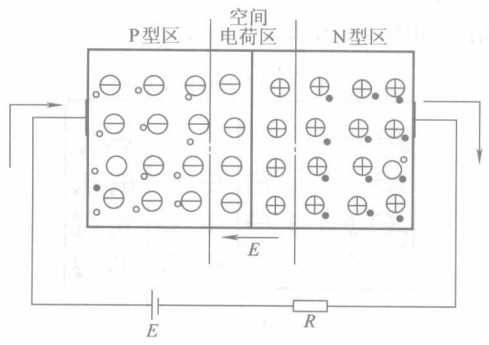


图 1-9 PN 结外加正向电压

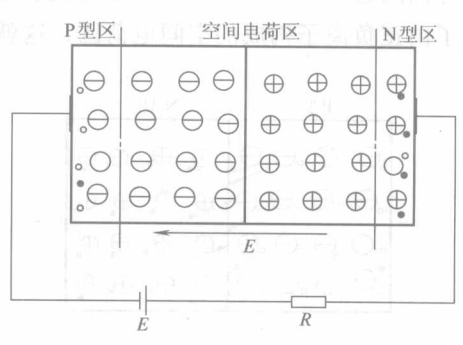


图 1-10 PN 结外加反向电压

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的外形、结构及符号

在 PN 结的两端引出金属电极，外加玻璃、金属或用塑料封装，就做成了半导体二极管。因此，二极管也具有单向导电性。单向导电性是二极管的重要特性，在电子电路中得到了广泛的应用。由于使用的用途不同，二极管的外形也各异，几种常见的二极管外形如图 1-11 所示。

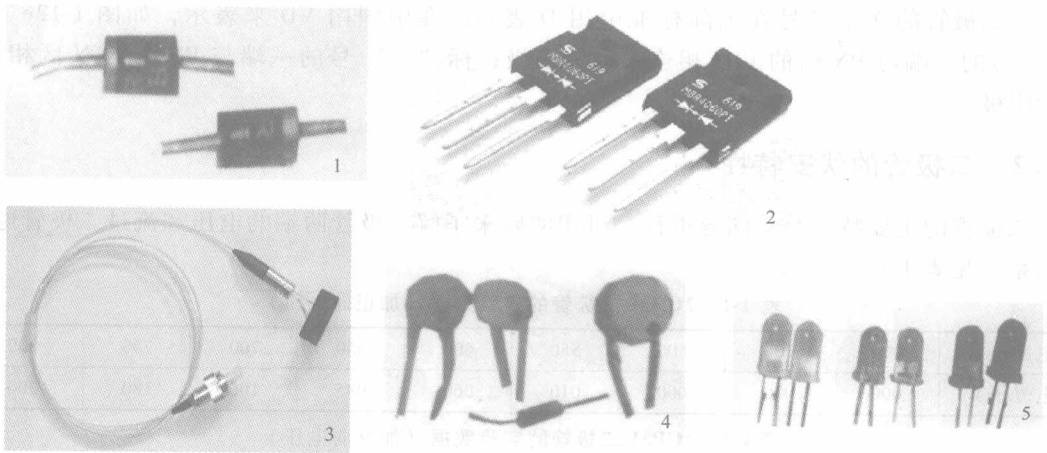


图 1-11 常见二极管外形

1—普通二极管 2—肖特基二极管 3—激光二极管 4—开关二极管
5—发光二极管

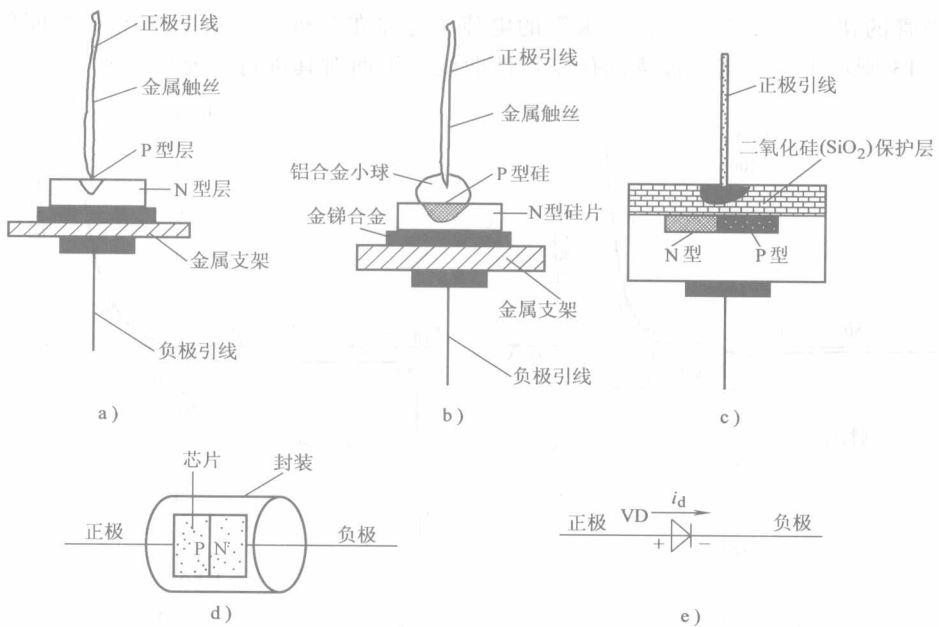


图 1-12 二极管的结构及符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型 d) 二极管简化结构 e) 二极管符号

二极管的结构按 PN 结形成的制造工艺方式可分为点接触型、面接触型和平面型等。点接触型二极管 PN 结的接触面积小，不能通过很大的正向电流和承受较高的反向电压，但它的高频性能好，适宜于在高频检波电路和小功率电路中使用。面接触型二极管 PN 结的接触面积大，可以通过较大电流，能承受较高的反向电压，适宜于在整流电路中使用。平面型二极管适宜用作大功率开关管，在数字电路中有广泛的应用。图 1-12 是二极管的类型结构示意图。二极管有两个电极，由 P 区引出的电极是正极（阳极），由 N 区引出的电极是负极

(阴极)。三角箭头方向表示正向电流的方向，正向电流只能从二极管的正极流入，从负极流出。二极管的文字符号在国际标准中用 D 表示，在中国用 VD 来表示，如图 1-12e。标“+”号的一端与 PN 结的 P 区相连，称为阳极；标“-”号的一端与 PN 结的 N 区相连，称为阴极。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的主要特点是单向导电性。可用实验来了解二极管两端的电压和流过二极管电流的关系，见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 2CP31 二极管的实验数据（加正向电压）

电压/mV	000	100	500	550	600	650	700	750	800
电流/mA	000	000	000	010	060	085	100	180	300

表 1-2 2CP31 二极管的实验数据（加反向电压）

电压/V	0	-10	-20	-60	-90	-115	-120	-125	-135
电流/ μ A	000	1.00	1.00	1.00	1.00	2.50	4.00	15.00	30.00

将实验数据描绘在 $U-I$ 坐标中，就是二极管的伏安特性曲线，如图 1-13 所示。

二极管的伏安特性就是流过二极管的电流 I 与加在二极管两端的电压 U 之间的关系曲线。图 1-13 所示为硅和锗二极管的伏安特性曲线。下面对其进行简要分析。

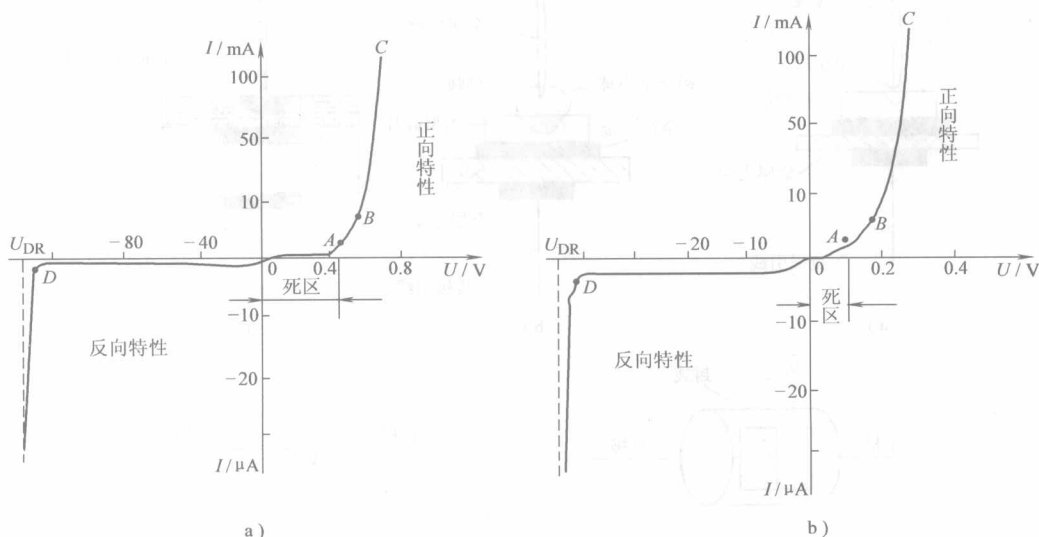


图 1-13 二极管的伏安特性曲线

a) 硅二极管 b) 锗二极管

1. 正向特性（二极管加正向电压时的电流-电压关系）OA 段

当外加正向电压较小时，正向电流非常小，近似为零。在这个区域内二极管实际上还没有导通，二极管呈现的电阻很大，该区域常称为“死区”。硅二极管的死区电压约为 0.5V，锗管的死区电压约为 0.1V。过 A 点后，当外加正向电压超过死区电压后，正向电流开始增加，但电流与电压不成比例。当正向电压大于 0.6V 以后（对锗二极管，此值约为 0.2V），正向电流随正向电压增加而急速增大，基本上是直线关系，这时二极管呈现的电阻很小，可

以认为二极管是处于充分导通状态。在该区域内，硅二极管的导通压降约为 0.7V ，锗二极管的导通压降约为 0.3V 。但是流过二极管的正向电流需要加以限制，不能超过规定值，否则会使 PN 结过热而烧坏二极管。

2. 反向特性（二极管加反向电压时的电流 - 电压关系） OD 段

在所加反向电压下，反向电流的值很小，且几乎不随电压的增加而增大，此电流值被叫做反向饱和电流。此时二极管呈现很高的电阻，近似处于截止状态。硅管的反向电流比锗管的反向电流小，约在 $1\mu\text{A}$ 以下，锗管的反向电流达几十微安甚至几毫安以上。这也是现在硅管应用比较多的原因之一。过 D 点以后，反向电压稍有增大，反向电流就急剧增大，这种现象称为反向击穿。二极管发生反向击穿时所加的电压叫做反向击穿电压。一般的二极管是不允许工作在反向击穿区的，因为这将导致 PN 结的反向导通而使二极管失去单向导电的特性。综上所述，可知二极管的伏安特性是非线性的，二极管是一种非线性器件。在外加电压取不同值时，就可以使二极管工作在不同的区域，从而充分发挥二极管的作用。在实际工程估算中，若二极管的正向导通电压比外加电压小许多时（一般按 10 倍来衡量），常可忽略不计，并将此时的二极管称为理想二极管。

3. 反向击穿特性曲线

反向电压在一定范围内时，反向电流基本不随反向电压增加而增加，但当反向电压超过一定值后（这个电压称反向击穿电压 U_{DR} ），反向电流急剧增大（对应 D 点以后的曲线），二极管失去单向导电性，这种现象称为二极管的反向击穿。普通二极管不允许工作在反向击穿状态。

1.2.3 二极管的击穿特性

如上所述，PN 结的反向电流 I 与所加的反向电压无关。但当反向电压达到一定程度时，反向电流将会突然大幅度增加，这个现象被称为 PN 结的反向击穿。在发生了击穿后，如果反向电压不能及时减小的话，流过 PN 结的反向电流也将一直很大，消耗在 PN 结上的功耗也就很大。这样很快就会使 PN 结发热，超过其功耗限制，造成热击穿。一旦发生了热击穿，PN 结很快就被烧坏。PN 结产生反向击穿有两种情况。

1. 雪崩击穿

当 PN 结两端加的反向电压足够大时，内电场也随之增强，电子和空穴通过空间电荷区时，在内电场的作用下，获得的能量显著增加，运动速度大大加快。这些载流子在运动过程中，会与半导体的晶体原子发生碰撞，将一部分动能转移给共价键中的电子使价电子脱离共价键的束缚，变成自由电子，从而产生了电子-空穴对。新产生的电子-空穴对又会与原有的自由电子和空穴一样，被内电场加速，去撞击其他原子，再产生新的电子-空穴对，这就是载流子的倍增效应。这种现象与高原雪山发生的雪崩类似，因此叫做雪崩击穿。

2. 齐纳击穿

在一些杂质浓度较高的 PN 结中，杂质密度大，空间电荷区中的正负离子密度也大，空间电荷区很薄。这样，只要加上不大的反向电压，就可以使内电场达到足够的场强。这个内电场将会直接把价电子从共价键中拉出来，产生电子空穴对，从而形成较大的反向电流，基于这种现象产生的反向击穿称为齐纳击穿。对于硅 PN 结来说，反向电压在 7V 以上的击穿一般是雪崩击穿，在 4V 以下的反向击穿一般是齐纳击穿。在 $4\sim 7\text{V}$ 之间时，两种击穿可能