



高等职业教育机电类专业“十二五”规划教材

电子技术基础

张 钢 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等职业教育机电类专业“十二五”规划教材

电子技术基础

	张 钢	主 编
赵 峥	任万强	副主编
	毛晓波	主 审

内 容 简 介

本书是根据教育部制定的高等职业教育培养目标和有关文件精神及电子技术课程教学的基本要求,并结合现代电子技术系列课程的教学实际编写的。本书内容包括半导体器件基础、交流放大电路、模拟集成电路、信号产生电路、直流稳压电源、数字逻辑基础、组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、数-模与模-数转换器等。

本书在编写上以培养学生的实际能力为主线,内容上注重实用性和针对性,降低理论分析的难度和深度,理论知识以“必需”和“够用”为尺度,理论和实践结合密切,内容深入浅出,语言通俗易懂,可读性、实用性强。

本书适用于高等专科学校、高等职业院校、独立学院、成人高校的机电类、计算机类、自控类、电气类、能源类、制造类和电子类专业作为电子技术课程的教材,也适用于相关人员作为培训教材和工作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础 / 张钢主编. —北京: 中国铁道出版社, 2013. 1

高等职业教育机电类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-113-15718-0

I. ①电… II. ①张… III. ①电子技术—高等职业教育—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281501 号

书 名: 电子技术基础

作 者: 张 钢 主编

策 划: 何红艳

读者热线: 400-668-0820

责任编辑: 何红艳

编辑助理: 绳 超

封面设计: 付 巍

封面制作: 白 雪

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址: <http://www.51eds.com>

印 刷: 三河市华业印装厂

版 次: 2013年1月第1版

2013年1月第1次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印张: 17.25 字数: 415千

印 数: 3 000册

书 号: ISBN 978-7-113-15718-0

定 价: 33.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话:(010)63550836

打击盗版举报电话:(010)63549504

现代电子技术的发展推动着一个新的时代的到来,各种电子设备与信息技术应用在各个领域中均扮演着重要的角色,发挥着越来越重要的作用。掌握电子技术的基础知识成为工科各专业学生的基本技能要求,因此高职高专院校工科专业普遍开设了“电子技术”、“电子技术基础”、“电工学”或类似课程。

本书是根据教育部制定的高等职业教育培养目标和规定的有关文件精神及电子技术课程教学的基本要求,并结合现代电子技术系列课程的建设实际编写的。编写时既考虑到要使学生获得必要的电子技术基础理论、基本知识和基本技能,也充分考虑到专科生的实际情况,在编写过程中认真贯彻理论以够用为度,加强应用,提高分析和解决实际问题的能力原则。

本书从教材题材特色上看,属于传统改良型,继承传统,推陈出新,贴近时代,汲取中西,有所变革。本书主要讲理论知识,实践环节一般由各校结合设备自备讲义,这样分开比较符合多数院校的现状。在编写上以培养学生的实际能力为主线,内容上注重实用性和针对性,降低理论分析的难度和深度,理论知识以“必需”和“够用”为尺度,编排时适当削减分立元件,重点突出集成电路的特性和应用;内容既适合于传统的课堂教学,又适合于学生预习、复习和自学。各章在基本概念、原理和分析方法的阐述上力求通俗易懂,突出了高职高专的实用性和综合性的特色,既确保了服务于核心知识的学习,又汲取了相关领域的发展趋势及应用现状。尤其通过学以致用可提高学生的学习兴趣以及自主学习的能力。为顺应培养创新型人才的要求,编写者将长期在教学中取得的教学成果和积累的经验融入到教材编写之中。

本书内容包括半导体器件基础、交流放大电路、模拟集成电路、信号产生电路、直流稳压电源、数字与逻辑基础、组合逻辑电路、触发器与时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、数-模与模-数转换器等。建议教学学时为 50~75 学时。各专业可根据需要对内容酌情取舍。

归纳本书的主要特色是:

1. 注重理论与工程实践相结合,重在会用。各章列举大量应用实例,以加深学生对各个单元电路功能的理解。

2. 以集成电路为主,分立元件为辅。各章相应介绍常用的最新模拟集成电路和新的常用电子器件,重在对电路的认知和应用能力的培养。对某些重点教学内容,会在不同的章节不同的情境下用不同的方式加以呈现。

3. 讲授内容与习题融为一体。每章习题中设置填空题、选择题、判断题、分析题与计算题,习题尽量贴近基本应用,不刻意设计难题偏题,便于帮助学生树立信心,总结内容,有所收获,避免所有知识难以学懂的情形。

4. 讲解详尽,深入浅出,便于初学者阅读,也适用于自学。避免了保内容减叙述的弊病。

本书适用于高等专科学校、高等职业院校、独立学院、成人高校的机电类、计算机类、自控类、电气类、能源类、制造类和电子类等专业作为电子技术课程的教材，也适用于相关人员作为培训教材和工作参考书。

全书共分10章。张钢编写第2、3、6、7、8章，任万强编写第1、9章，赵峥编写第5、10章，李晓洁编写第4章及附录。全书由张钢任主编，负责全书的组织、修改和定稿工作。

本教材由毛晓波教授主审，他对书稿进行了认真详尽的审阅，提出了许多很宝贵意见，在此表示深切的谢意。

在本书的编写过程中得到了各方面的大力支持，并参考了一些相关资料（详见本书后面的“参考文献”），在此向相关人员及有关作者表示衷心的感谢，同时感谢中国铁道出版社同志大力支持和扶助。

为了方便教师教学，本书还配有电子教案，有此需要的教师可登录中国铁道出版社天勤教学网（<http://www.51eds.com>）免费下载。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请广大读者批评和指正。

编 者
2012 年 10 月

第1章 半导体器件基础..... 1

- 1.1 半导体基本知识 1
 - 1.1.1 本征半导体 1
 - 1.1.2 杂质半导体 2
 - 1.1.3 PN结及其特性 4
- 1.2 半导体二极管 5
 - 1.2.1 二极管的结构和类型 5
 - 1.2.2 二极管的伏安特性 6
 - 1.2.3 二极管的参数和应用 7
 - 1.2.4 二极管的简易测量 9
- 1.3 特殊二极管 10
 - 1.3.1 稳压二极管 10
 - 1.3.2 发光二极管 11
 - 1.3.3 光电二极管 11
 - 1.3.4 太阳能电池板 12
- 1.4 半导体三极管 13
 - 1.4.1 三极管的结构和符号 13
 - 1.4.2 三极管的电流分配与放大作用 14
 - 1.4.3 三极管的特性曲线 16
 - 1.4.4 三极管的主要参数 17
- 习题 19

第2章 交流放大电路 23

- 2.1 放大电路的组成和基本工作
原理 23
 - 2.1.1 共发射极基本放大电路 23
 - 2.1.2 放大的本质与电路中符号表示 25
- 2.2 放大电路的静态分析 26
 - 2.2.1 用估算法计算静态工作点 26
 - 2.2.2 图解法求静态工作点 27
- 2.3 放大电路的动态分析 27
 - 2.3.1 放大电路的图解分析法 28
 - 2.3.2 影响放大电路工作的主要因素 31

- 2.3.3 放大电路的微变等效电路分析法 32
- 2.3.4 基本放大电路应用实例——简单水位检测与报警电路 35
- 2.4 放大电路的稳定偏置电路 36
 - 2.4.1 稳定的基本原理 36
 - 2.4.2 电路分析计算 37
- 2.5 射极输出器 38
 - 2.5.1 共集电极放大电路的静态分析 39
 - 2.5.2 共集电极放大电路的动态分析 39
- 2.6 多级放大电路 41
 - 2.6.1 多级放大电路的组成特点 41
 - 2.6.2 多级放大电路的技术指标计算 42
 - 2.6.3 放大电路的频率特性简介 44
- 2.7 负反馈放大电路 46
 - 2.7.1 负反馈的基本概念 46
 - 2.7.2 负反馈的分类 47
 - 2.7.3 负反馈放大器典型电路 49
 - 2.7.4 负反馈对放大器性能的影响 50
 - 2.7.5 应用实例——万用表电路中的反馈 53
- 2.8 差分放大电路 54
 - 2.8.1 直接耦合放大电路及其零点漂移问题 54
 - 2.8.2 典型差分放大电路 55
 - 2.8.3 恒流源差分放大电路 58
 - 2.8.4 差分放大电路输入输出方式 59
- 2.9 场效应管及其放大电路 61
 - 2.9.1 绝缘栅场效应管 61
 - 2.9.2 场效应管放大电路 63

习题	64
第3章 模拟集成电路	70
3.1 集成电路基本知识	70
3.2 集成运算放大器的结构和指标	72
3.2.1 集成运放的结构特点	72
3.2.2 集成运放的主要性能指标	74
3.2.3 理想集成运放的概念与特点	74
3.3 集成运放在信号运算方面的应用	77
3.3.1 比例运算电路	77
3.3.2 加法与减法运算电路	79
3.3.3 积分与微分运算电路	80
3.3.4 集成运放应用实例	83
3.4 集成运放的非线性应用	84
3.4.1 单限比较器	84
3.4.2 滞回比较器	87
3.5 集成运放的其他应用	88
3.5.1 有源滤波器	88
3.5.2 电源变换电路	90
3.5.3 集成运算放大器使用时的注意事项	90
3.6 集成功率放大电路	92
3.6.1 功率放大电路的特点和分类	92
3.6.2 互补对称式功率放大电路(OCL)	93
3.6.3 单电源互补对称功率放大电路(OTL)	95
3.6.4 集成功率放大器	98
习题	99
第4章 信号发生电路	105
4.1 正弦波振荡器的工作原理	105
4.1.1 自激振荡器产生振荡的基本原理	105
4.1.2 自激振荡的平衡条件和起振条件	106
4.1.3 振荡电路的组成、分析与分类	107
4.2 RC 正弦波振荡器	107
4.2.1 RC 串并联选频网络	108
4.2.2 RC 桥式振荡器	108
4.3 LC 正弦波振荡器	110
4.3.1 LC 并联谐振回路的基本特性	110
4.3.2 变压器反馈式 LC 振荡电路	111
4.4 石英晶体振荡电路	112
4.5 非正弦波信号发生器	114
4.6 集成函数信号发生器 MAX038	116
习题	118
第5章 直流稳压电源	121
5.1 单相整流电路	122
5.1.1 单相半波整流电路	122
5.1.2 单相桥式整流电路	123
5.2 滤波电路	125
5.2.1 电容滤波电路	126
5.2.2 复式滤波电路	127
5.3 集成稳压器	127
5.3.1 硅稳压管稳压电路	128
5.3.2 $78 \times \times$ 和 $79 \times \times$ 系列的三端集成稳压器	129
5.3.3 三端式可调集成稳压器	131
5.3.4 直流稳压电源应用举例	132
5.4 开关型稳压电源简介	133
习题	135
第6章 数字逻辑基础	138
6.1 数制和码制	139
6.1.1 数制	139
6.1.2 数制的转换	141
6.1.3 码制	143
6.2 逻辑代数基础	144
6.2.1 逻辑变量与逻辑函数	144
6.2.2 逻辑关系和运算	144
6.2.3 逻辑函数的表示方法及其相互转换	148
6.2.4 逻辑代数的基本定律和	

规则	151	7.4.1 二进制译码器	179
6.3 逻辑函数的化简	152	7.4.2 二进制译码器的应用	181
6.3.1 逻辑函数的代数化简	153	7.4.3 二十进制译码器	183
6.3.2 逻辑函数的卡诺图化简	154	7.4.4 显示译码器	184
6.4 基本逻辑门电路	158	7.5 加法器	187
6.4.1 二极管和三极管的开关特性	158	7.5.1 半加器 (Half Adder)	187
6.4.2 晶体二极管与门	159	7.5.2 全加器 (Full Adder)	188
6.4.3 晶体三极管非门 (反相器)	159	7.5.3 超前进位集成加法器	189
6.5 TTL 集成逻辑门电路	160	7.5.4 加法器的应用	189
6.5.1 TTL 与非门电路	160	7.6 数值比较器和数据选择器	190
6.5.2 TTL 三态门	161	7.6.1 数值比较器	190
6.5.3 逻辑门的外特性及主要参数	162	7.6.2 数据选择器	192
6.5.4 TTL 逻辑门使用中的注意事项	164	7.7 中规模组合逻辑电路综合应用举例	194
6.6 CMOS 集成逻辑门电路	165	习题	197
6.6.1 CMOS 反相器 (非门)	165	第 8 章 触发器与时序逻辑电路	201
6.6.2 CMOS 逻辑门使用中应注意的问题	166	8.1 基本 RS 触发器	202
6.6.3 数字集成电路系列介绍	167	8.1.1 由与非门组成的基本 RS 触发器	202
习题	167	8.1.2 基本 RS 触发器逻辑功能的其他表示方法	203
第 7 章 组合逻辑电路	172	8.2 同步触发器	204
7.1 组合逻辑电路的分析	172	8.2.1 同步 RS 触发器	204
7.1.1 组合逻辑电路的一般分析步骤	173	8.2.2 同步 RS 触发器逻辑功能的其他表示方法	205
7.1.2 组合逻辑电路的分析举例	173	8.3 常用钟控触发器	206
7.2 组合逻辑电路的设计	174	8.3.1 维持阻塞边沿 D 触发器	207
7.2.1 组合逻辑电路的一般设计方法	174	8.3.2 边沿 JK 触发器	208
7.2.2 组合逻辑电路的设计举例	175	8.3.3 触发器应用举例	210
7.3 编码器	177	8.3.4 集成触发器简介	211
7.3.1 二十进制编码器	177	8.4 时序逻辑电路的基本概念	212
7.3.2 优先编码器	178	8.4.1 时序逻辑电路的结构与特点	212
7.4 译码器	179	8.4.2 时序逻辑电路的分类	213
		8.4.3 时序逻辑电路功能的描述方法	213
		8.5 时序逻辑电路的分析方法	214
		8.6 异步计数器	217
		8.6.1 二进制异步加法计数器	217

8.6.2 集成异步加法计数器	
74290	219
8.7 同步计数器	221
8.7.1 同步十进制计数器	221
8.7.2 集成同步二进制计数器	
举例	224
8.8 任意进制计数器	225
8.8.1 用异步清零端构成 N	
进制计数器	225
8.8.2 用同步置数端构成 N	
进制计数器	227
8.8.3 多片集成计数器级联实现	
大容量 N 进制计数器	227
8.9 寄存器	230
8.9.1 数码寄存器	230
8.9.2 移位寄存器	231
8.10 时序逻辑电路综合举例	234
8.10.1 数字钟	234
8.10.2 电冰箱制冷温控原理	
电路	235
8.10.3 光电计数系统	236
习题	237
第9章 脉冲波形的产生与变换	243
9.1 集成 555 定时器	243
9.1.1 555 定时器电路结构	243
9.1.2 555 定时器工作原理	244
9.2 单稳态触发器	245
9.2.1 用 555 定时器组成单稳	
态触发器	246
9.2.2 单稳态触发器的应用	247
9.3 施密特触发器	248
9.3.1 用 555 定时器构成施密特	
触发器	248

9.3.2 施密特触发器的应用	
举例	249
9.4 多谐振荡器	250
9.4.1 由 555 定时器构成的多谐	
振荡器	250
9.4.2 多谐振荡器应用实例	251
习题	251
第10章 数-模与模-数转换器	253
10.1 概述	253
10.2 数-模转换器	254
10.2.1 D/A 转换器的原理	254
10.2.2 倒 T 形电阻网络 D/A 转	
换器	255
10.2.3 D/A 转换器的主要技术	
指标	256
10.2.4 集成 D/A 转换器	258
10.3 A/D 转换器	259
10.3.1 A/D 转换的一般步骤和	
采样定理	259
10.3.2 逐次逼近型 ADC	261
10.3.3 主要技术指标	261
10.3.4 集成 A/D 转换器及其	
应用	262
习题	263

附录	265
-----------------	------------

附录 A 国产半导体集成电路型号	
命名(GB 3430—1989)	265
附录 B 半导体器件型号命名	
方法	267

参考文献	268
-------------------	------------

第 1 章

➡ 半导体器件基础



学习目标

• 掌握半导体的基本知识和半导体二极管、三极管等器件的结构、工作原理、特性曲线、主要参数、符号及性能等。熟悉常用电子器件的基本知识。

• 学会合理地选用器件型号。

电子电路中最常用的半导体器件是用半导体材料制成的电子器件。也是构成集成电路的基本单元。常用的半导体器件有二极管、三极管、特殊晶体管等。

1.1 半导体基本知识

导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体。自然界中不同的物质，由于其原子结构不同，因而导电能力也各不相同。半导体的电阻率为 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 。根据导电能力的强弱，可以把物质分成导体、半导体和绝缘体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，如硅、锗、砷化镓以及金属氧化物和硫化物等都是半导体。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是化学成分纯净、物理结构完整的半导体。半导体在物理结构上有多晶体和单晶体两种形态，制造半导体器件必须使用单晶体，即整个一块半导体材料是由一个晶体组成的。制造半导体器件的半导体材料纯度要求很高，要达到 99.999 9% 以上。

1. 结构特点

自然界的一切物质都是由原子组成的，而原子是由带正电荷的原子核和绕核运动着的、与核电荷数相等的电子所组成。电子分层围绕原子核作不停的旋转运动，其中内层的电子受原子核的吸引力较大，外层电子受原子核的吸引力较小，外层电子的自由度较大，因此外层的电子如果获得外来的能量，就容易挣脱原子核的束缚而成为**自由电子**。把最外层的电子称为**价电子**。在电子器件中，用得最多的半导体材料是硅和锗，它们的原子结构如图 1-1 所示。硅和锗都是四价元素，其原子最外层轨道上都具有 4 个价电子。

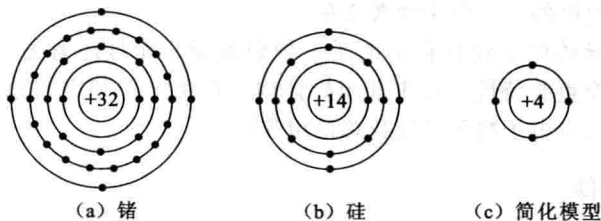


图 1-1 原子结构示意图

价电子的数目越接近8个,物质的化学结构也就越稳固。对于金属材料,其价电子一般较少,因此金属中的价电子很容易变成自由电子,所以金属是良导体;对于单质绝缘体,其价电子数一般多于4个,因此绝缘体中的价电子均被原子核牢牢地吸引着,很难形成自由电子,所以不能导电;对于半导体来说,原子的价电子数为4个,其原子的外层电子既不像金属那样容易挣脱出来,也不像绝缘体那样被原子核紧紧束缚住,因此半导体的导电性能就比较特殊,具备可变性。

当硅或锗被制成单晶体时,其原子有序排列,每个原子最外层的4个价电子不仅受自身原子核的束缚,而且还与周围相邻的4个原子发生联系。这时,每两个相邻原子之间都共用一对电子,使相邻两原子紧密地连在一起,形成**共价键结构**,如图1-2所示。

2. 半导体的导电机理

当本征半导体的温度升高或受到光线照射时,其共价键中的价电子就从外界获得能量。由于半导体原子外层的电子不像绝缘体那样被原子核紧紧地束缚着,因此就有少量的价电子在获得足够能量后,挣脱原子核的束缚而成为**自由电子**,同时在原来共价键上留下了相同数量的空位,这种现象称为**本征激发**。在本征半导体中,每激发出来一个自由电子,就必然在共价键上留下一空位,把该空位称为**空穴**,由于空穴失去电子,因而带正电。可见自由电子和空穴总是成对出现的,称之为**电子-空穴对**,如图1-3所示。

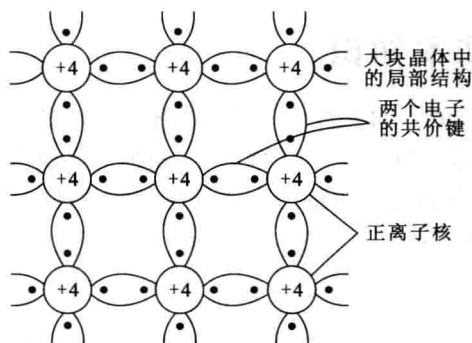


图 1-2 硅和锗的共价键结构

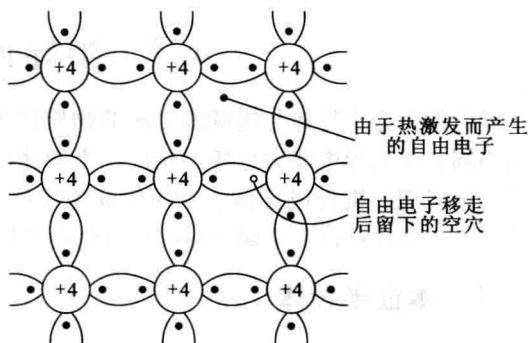


图 1-3 热激发产生电子-空穴对

在产生电子-空穴对的同时,有的自由电子在杂乱的热运动中又会不断地与空穴相遇,重新结合,使电子-空穴对消失,这称为**复合**。在一定温度下**载流子**的产生过程和复合过程是相对平衡的,载流子的浓度是一定的。在常温下,本征半导体受热激发所产生的自由电子和空穴数量很少,同时本征半导体的导电能力远小于导体的导电能力,导电能力很差。温度越高,所产生的电子-空穴对也越多,半导体的导电能力也就越强。

在外电场的作用下,一方面自由电子产生定向移动,形成**电子电流**;另一方面价电子也按一定方向依次填补空穴,即空穴流在键位上产生移动,形成**空穴电流**。

由于电子和空穴所带电荷的极性相反,它们的运动方向也是相反的,因此形成的电流方向是一致的,流过外电路的电流等于两者之和。

综上所述,在半导体中不仅有自由电子一种载流子,而且还有另一种载流子——**空穴**。这是半导体导电的一个重要特性。在本征半导体内,自由电子和空穴总是成对出现的,任何时候本征半导体中的自由电子数和空穴数总是相等的。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在两种载流子,但因本征半导体内载流子的浓度很低,所以导电能

力很差。在本征半导体中,人为有控制地掺入某种微量杂质,即可大大改变它的导电性能。掺入的杂质主要是三价或五价元素。掺入杂质的本征半导体称为**杂质半导体**。按照掺入杂质的不同,可获得N型和P型两种掺杂半导体。

1. P型半导体

在本征半导体(硅或锗的晶体)中掺入三价元素杂质,如硼、镓、铟等,因杂质原子的最外层只有3个价电子,它与周围硅(锗)原子组成共价键时,缺少一个电子,于是在晶体中便产生一个空位。当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时,就有可能填补这个空位,使硼原子成为不能移动的负离子,而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子,形成空穴,如图1-4(a)所示。

这样,掺入硼杂质的硅半导体中就具有数量相当的空穴,空穴浓度远大于电子浓度,这种半导体主要靠空穴导电,称为**P型半导体**。

掺入的三价杂质原子,因在硅晶体中接受电子,故称**受主杂质**。受主杂质都变成了负离子,它们被固定在晶格中不能移动,也不参与导电,如图1-4(b)所示。此外,在P型半导体中由于热运动还产生少量的电子-空穴对。总之,在P型半导体中,不但有数量很多的空穴,而且还有少量的自由电子存在,空穴是**多数载流子**,电子是**少数载流子**。

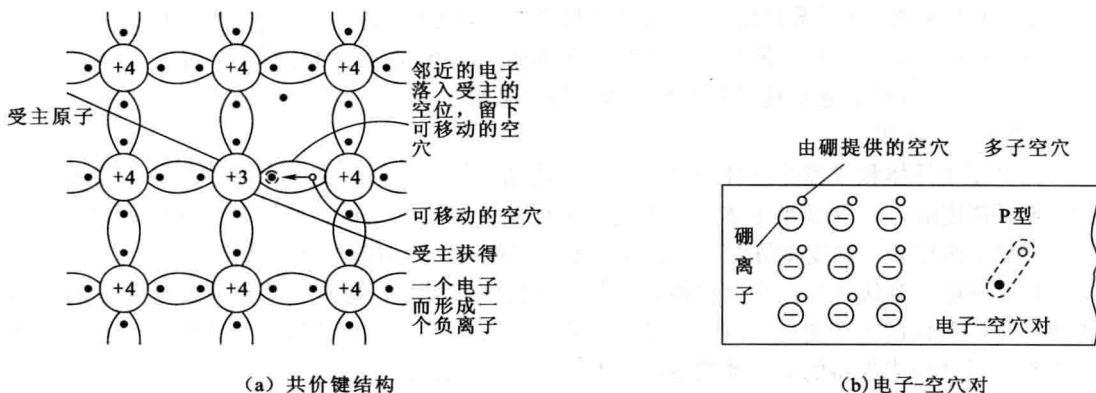


图1-4 P型半导体的共价键结构

2. N型半导体

在本征半导体中掺入五价元素杂质,如磷、锑、砷等。掺入的磷原子取代了某处硅原子的位置,它同相邻的4个硅原子组成共价键时,多出了一个电子,这个电子不受共价键的束缚,因此在常温下有足够的能量使它成为自由电子,如图1-5所示。这样,掺入杂质的硅半导体就具有相当数量的自由电子,且自由电子的浓度远大于空穴的浓度。显然,这种掺杂半导体主要靠电子导电,称为**N型半导体**。

由于掺入的五价杂质原子可提供自由电子,故称为**施主杂质**。每个施主原子给出一个自由电子后都带上一个正电荷,因此杂质原子都变成正离子,它们被固定在晶格中不能移动,也不参与导电。

此外,在N型半导体中热运动也会产生少量的电子-空穴对。总之,在N型半导体中,不但有数量很多的自由电子,而且也有少量的空穴存在,

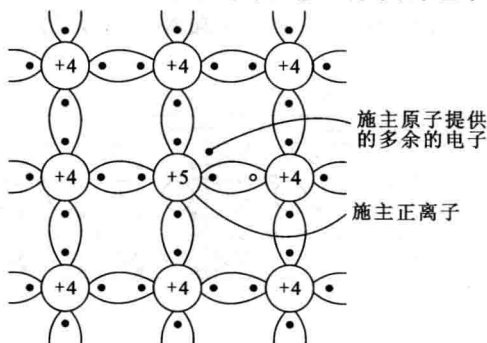


图1-5 N型半导体的共价键结构

自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

必须指出，虽然N型半导体中有大量带负电的自由电子，P型半导体中有大量带正电的空穴，但是由于带有相反极性电荷的杂质离子的平衡作用，无论N型半导体还是P型半导体，对外表现都是电中性的。

3. 半导体的其他主要特性

(1) 热敏性。半导体对温度很敏感。例如纯锗，温度每升高 10°C ，它的电阻率就会减小到原来的一半。由于半导体的电阻对温度变化的反应灵敏，而且大都具有负的温度系数，所以就把它制成了各种自动控制装置中常用的热敏电阻传感器和能迅速测量物体温度变化的半导体点温计等。

(2) 光敏性。与金属不同，半导体对光和其他射线都很敏感。例如一种硫化镉半导体材料，在没有光照射时，电阻高达几十兆欧；受到光照射时，电阻可降到几十千欧，两者相差上千倍。

利用半导体的这种光敏特性可以制成光敏电阻器、光电二极管、光电三极管以及太阳能电池等。

1.1.3 PN结及其特性

单纯的P型或N型半导体仅仅是导电能力增强了，但还不具备半导体器件所要求的各种特性。

如果通过一定的生产工艺把一块P型半导体和一块N型半导体结合在一起，则它们的交界处就会形成PN结，这是构成各种半导体器件的基础。

1. PN结的形成

当P型半导体和N型半导体通过一定的工艺结合在一起时，由于P型半导体的空穴浓度高，电子浓度低，而N型半导体的自由电子浓度高，空穴浓度低，所以交界面附近两侧的载流子形成了浓度差。浓度差将引起多数载流子的扩散运动，如图1-6(a)所示。

有一些电子要从N区向P区扩散，并与P区的空穴复合；也有一些空穴要从P区向N区扩散，并与N区的电子复合。由于电子和空穴都是带电的，因此扩散的结果就使P型半导体和N型半导体原来保持的电中性被破坏。P区一边失去空穴，留下了带负电的杂质离子；N区一边失去电子，留下了带正电的杂质离子。半导体中的离子虽然也带电，但由于物质结构的关系，它们不能任意移动，因此并不参与导电。这些不能移动的带电粒子集中在P区和N区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区，这就是PN结。PN结具有阻碍载流子扩散的特性，PN结的空间电荷区内的载流子浓度已减小到耗尽程度，因此又称为耗尽层。

空间电荷形成了一个由右侧指向左侧的内电场，如图1-6(b)所示。内电场的这种方向，将对载流子的运动带来两种影响：一是内电场阻碍两区多子的扩散运动；二是内电场在电场力的作用下使P区和N区的少子产生与扩散方向相反的漂移运动。

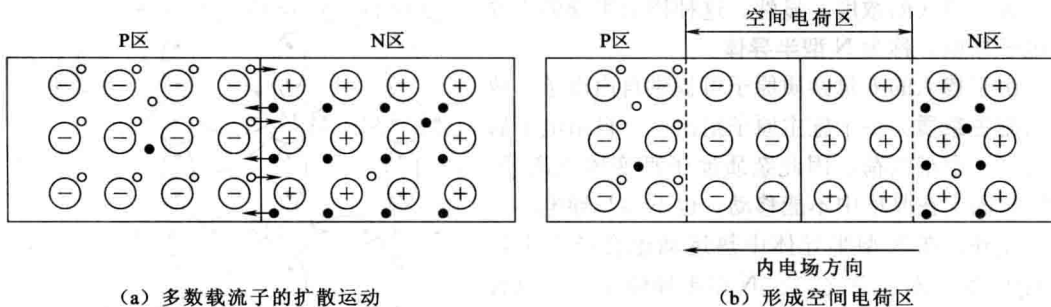


图 1-6 PN 结的形成

PN 结形成的最初阶段,载流子的扩散运动占优势,随着空间电荷区的建立,内电场逐渐增强,载流子的漂移运动也在加强,最终漂移运动将与扩散运动达到动态平衡。

2. PN 结的单向导电性

PN 结上外加电压的方式通常称为偏置方式,如果在 PN 结上加正向电压(又称正向偏置),即 P 区接电源正极, N 区接电源负极,如图 1-7 (a) 所示,这时电源产生的外电场与 PN 结的内电场方向相反,内电场被削弱,使空间电荷区变窄,多子的扩散运动大于漂移运动,形成较大的扩散电流,即正向电流。这时 PN 结的正向电阻很低,处于正向导通状态。正向导通时,外部电源不断向半导体供给电荷,使电流得以维持。

如果给 PN 结加反向电压(又称反向偏置),即 N 区接电源正极, P 区接电源负极,如图 1-7 (b) 所示,这时外电场与内电场方向一致,增强了内电场,使空间电荷区变宽。

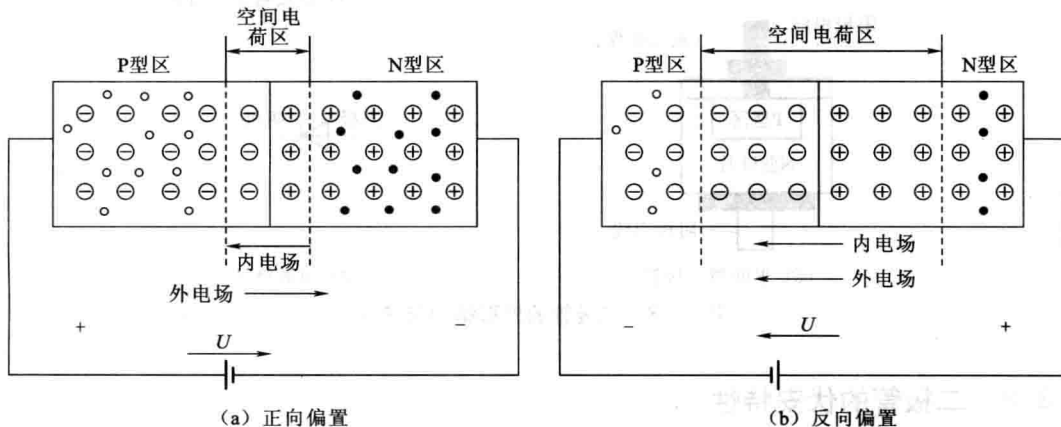


图 1-7 PN 结的单向导电性

这就削弱了多子的扩散运动,增强了少子的漂移运动,从而形成微小的漂移电流,即反向电流。这时 PN 结呈现的电阻很高,处于反向截止状态。反向电流由少子漂移运动形成,少子的数量随温度升高而增多,所以温度对反向电流的影响很大。在一定温度下,反向电流不仅很小,而且基本上不随外加反向电压变化,故称其为反向饱和电流。

由此可见,PN 结在正向电压作用下,电阻很小,PN 结导通,电流可顺利流过;而在反向电压作用下,电阻很大,PN 结截止,阻止电流通过。这种现象称为 PN 结的单向导电性。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和类型

半导体二极管是最简单的半导体器件。它由一个 PN 结、两根电极引线并用外壳封装而成。从 PN 结的 P 区引出的电极称为正极(阳极);从 PN 结的 N 区引出的电极称为负极(阴极)。

几种常见的二极管的外形如图 1-8 所示,二极管的图形符号如图 1-8 (d) 所示。

二极管的种类很多,按制造材料分,有硅二极管和锗二极管等;按用途分,有整流二极管、开关二极管等;按结构工艺分,有面接触型、点接触型等。

常用的较大功率的整流二极管为面接触型结构的。它的 PN 结面积较大,允许流过较大的电流,同时其结电容也大,适应于工作在较低频率(几十千赫以下)。其结构如图 1-8 (b) 所示。

点接触型二极管的结构如图 1-8 (a) 所示。它的 PN 结面积很小, 结电容也小, 适用于高频 (几百兆赫)、小电流 (几十毫安以下) 的场合, 主要应用于高频检波、小功率整流等。

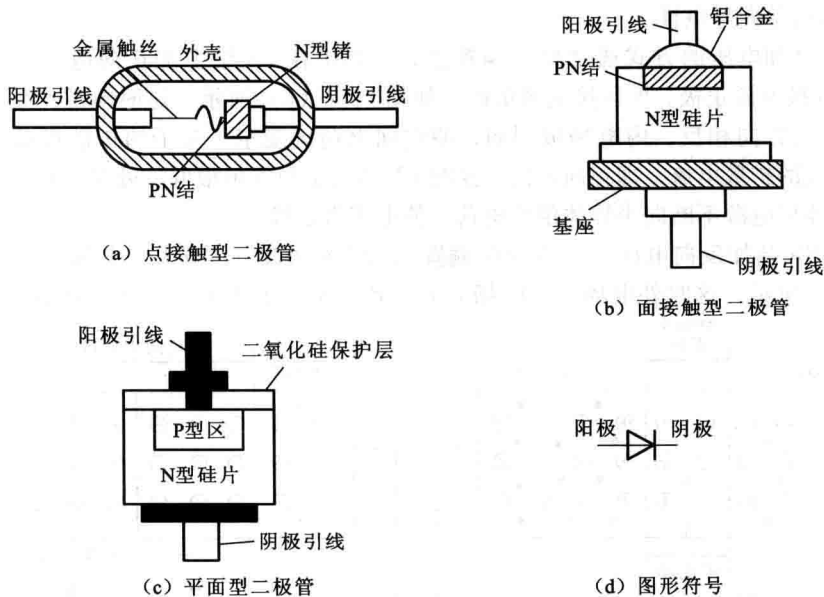


图 1-8 二极管的外形结构与符号

1.2.2 二极管的伏安特性

1. 二极管的伏安特性

实际的二极管伏安特性如图 1-9 所示。

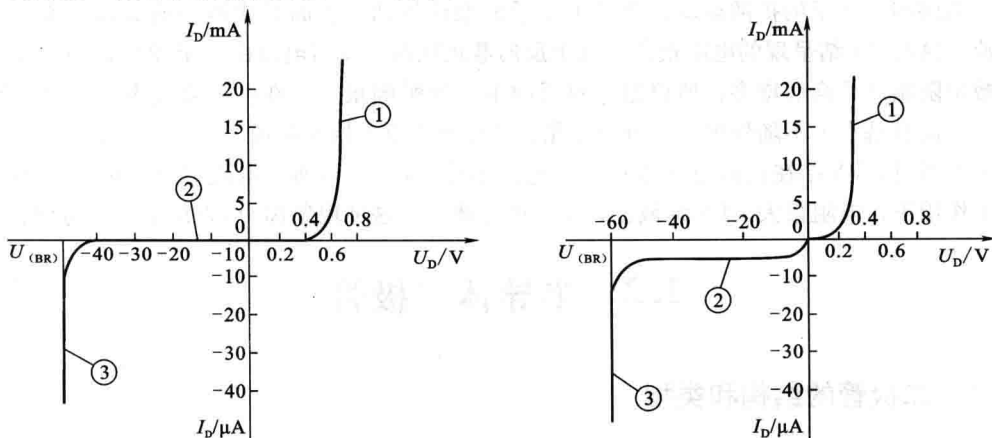


图 1-9 二极管伏安特性曲线

它主要包括三个区域。

(1) 正向特性。当外加正向电压时, 正极 (阳极) 接电源正极, 二极管将导通, 产生正向电流, 如图 1-9 中曲线①段所示。从图中可以看出: 当正向电压数值较小时, 由于外电场较小, 尚不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力, 正向电流几乎为零, 这个区域称

为死区。当正向电压增大超过某一数值后,二极管导通,正向电流随正向电压增加而迅速增大。这个电压 U_{on} 称为门坎电压或阈值电压。

二极管导通后,在正常使用的电流范围内,其正向电压数值很小,且基本上恒定。对于小功率硅管为 $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$ (典型值取 0.7 V),对于锗管,为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ (典型值取 0.3 V)。

(2) 反向特性。当外加反向电压时,正极(阳极)接电源负极,由少数载流子产生反向饱和电流,其数值很小。一般硅管的反向饱和电流比锗管的要小得多。小功率硅管的反向饱和电流约为几百纳安,锗管约为几十微安,如图 1-9 中曲线②所示。

(3) 反向击穿特性。当外加反向电压增大至某一数值 U_{BR} 时,反向电流急剧增大,这种现象称为二极管的反向击穿。 U_{BR} 称为反向击穿电压,如图 1-9 中曲线③所示。二极管的反向击穿电压一般在几十伏至几千伏之间。

在反向击穿时,只要反向电流不是很大,PN 结未被损坏;当反向电压降低后,二极管将退出击穿状态,仍恢复单向导电性。这种击穿又称 PN 结的电击穿。

在反向击穿时,流过 PN 结的电流过大,使 PN 结温度过高而烧毁,就会造成二极管的永久损坏。这种击穿又称 PN 结的热击穿。

2. 温度对二极管特性的影响

当温度变化时,二极管的反向饱和电流与正向压降将会随之变化。

当正向电流一定时,温度每增加 1°C ,二极管的正向压降减少 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$ 。

温度每增高 10°C ,反向电流约增大一倍。

1.2.3 二极管的参数和应用

1. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F 。它是二极管长期运行允许通过的最大正向平均电流。它由 PN 结的面积和散热条件所决定,使用时不得超过此值,否则会烧坏管子。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。它是指允许加在二极管上的反向电压的最大值(峰值)。一般地,最高反向工作电压约为击穿电压的一半。

(3) 反向电流 I_R 。它是在室温下,二极管两端加上规定的反向电压时的反向电流。其数值越小,管子的单向导电性越好。它随温度升高而增大。此外,二极管的参数还有最高工作频率、正向压降、结电容等。

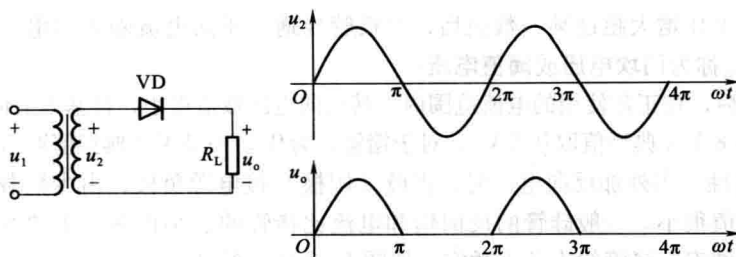
2. 二极管的应用

二极管在使用时,应考虑不超过 I_F 、 U_{BR} 、 U_{RM} 等极限参数,以保证二极管不致于损坏。一般地,硅管适用于正向电流大、反向电压高、反向电流小的场合。锗管适用于正向压降小、工作频率高的场合。下面介绍几种常见的二极管应用电路,如表 1-1 所示。

表 1-1 常用半导体二极管的种类和用途

种 类	普通二极管	整流二极管	开关二极管	稳压二极管
型号列举	2AP1 ~ 2AP9 2CP8 ~ 2CP60	2CZ50 ~ 2CZ60 2DZ2 ~ 2DZ20	2AK1 ~ 2AK20 2CK70 ~ 2CK86	2CW50 ~ 2CW19 2DW1 ~ 2DW19
用 途	高频检波,鉴频限幅,小功率整流等	大小功率的整流	电子计算机,脉冲控制,开关电路等	各种稳压电路

(1) 整流电路。利用二极管的单向导电性,将交流电变换为单向脉动直流电的电路,称为整流电路。常见的有单相半波、全波和桥式整流电路等。图 1-10 所示为常见的半波整流电路及波形。



(a) 半波整流电路

(b) 波形

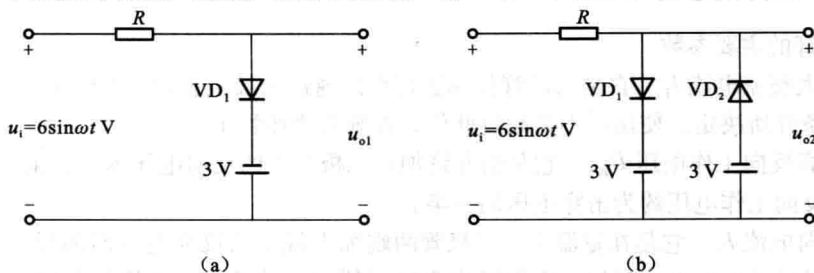
图 1-10 半波整流电路及波形

(2) **限幅电路。**利用二极管正向导通后其两端电压很小且基本不变的特性，可以构成各种限幅电路，使输出电压幅度限制在某一电压值内。

【例 1-1】画出图 1-11 所示电路的输出波形。

解：图 1-11 (a) 的分析：输入电压 u_i 为正弦波，根据二极管的单向导电性，将输入 u_i 与 -3 V 叠加，看看二极管两端是否正向压降，据此判断二极管是否导通。VD₁ 导通时，二极管上压降为 0， u_{o1} 等于 -3 V ；VD₁ 不导通时，二极管截止，相当于断开，故 u_{o1} 等于 u_i ，得出输出电压 u_{o1} 的波形（图 1-12 (a)）。从波形图中可以看出，输出电压幅度在一定范围被限制在 -3 V 上。

对图 1-11 (b) 的分析：正半周时，VD₂ 一直承受反向电压截止，这一路视为断开。当 u_i 大于 3 V 时，二极管 VD₁ 承受正向电压，导通，相当于短路， $u_{o2} = 3\text{ V}$ ；当 u_i 小于 3 V 时，二极管 VD₁ 承受反向电压，截止，相当于断路， $u_{o2} = u_i$ 。

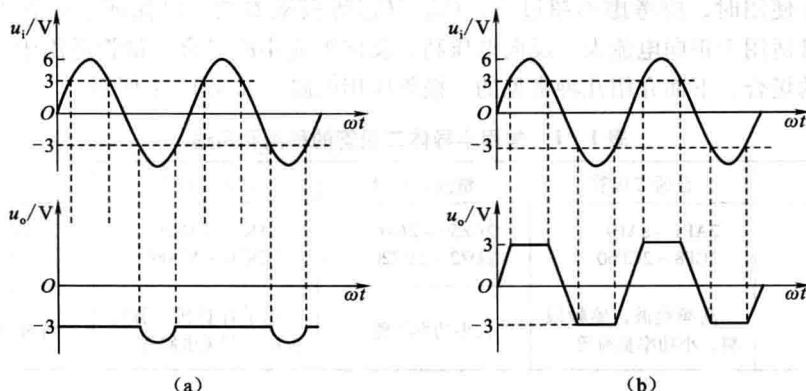


(a)

(b)

图 1-11 例 1-1 电路图

u_{o2} 波形如图 1-12 (b) 所示。负半周分析同理。二极管在该电路中起的是限幅作用。



(a)

(b)

图 1-12 例 1-1 输出波形图