

电子信息科学与电气信息类基础课程

# 模拟电子技术

(第三版)

高吉祥 主编 刘安芝 副主编  
唐朝京 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 模拟电子技术

(第三版)

主编 阎石 副主编 张毅刚  
主审 蔡天石



清华大学出版社

www.tup.com.cn

电子信息科学与电气信息类基础课程

# 模拟电子技术

(第三版)

高吉祥 主编  
刘安芝 副主编  
周 妮 陈 和 朱卫华 等编  
唐朝京 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是根据教育部颁布的电子技术基础课程教学基本要求编写。全书共8章主要内容有:半导体器件、放大电路的基础、放大电路的频率响应、集成运算放大电路、放大器中的反馈、集成运算放大器的应用、功率放大电路和直流稳压电源。

本书内容简明扼要,深入浅出,便于自学,同时注意实际应用能力的培养。可作为高等学校电气类、电子类、自动化类、计算机类和其他相近专业的基础教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

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。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/高吉祥主编. —3版. —北京:电子工业出版社,2011.7

电子信息科学与电气信息类基础课程

ISBN 978-7-121-06375-6

I. ①模… II. ①高… 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(2011)第133669号

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

开 本:787×980 1/16 印张:18.25 字数:632千字

印 次:2011年7月第1次印刷

印 数:5 000册 定价:36.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn),盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。

## 第三版前言

《模拟电子技术》一书自 2004 年出版以来,已使用了 7 个年头,被许多高校采用为主教材,深受广大读者的喜爱,并反馈了一些宝贵意见。在初版、二版的基础上,再次进行修订,使本书更加符合当前电子技术基础课程教学的需要。

第三版修订工作的指导思想是,主要依据教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教指委关于高等学校理工科电子信息类专业基础课程教学的基本要求,同时继续遵循本书前两版的编写原则:“确保基础、精选内容、加强概念、推陈出新、联系实际、侧重集成、避免遗漏、防止重复、统一符号、形成系统”。经过近 10 年的努力,模拟电子技术系列教程已经完成,其中包括主教材、辅助教材、实验教材、拓宽教材、教师参考用书及多媒体课件。

本书是为高等学校电气类、电子类、自动化类、计算机类和其他相近专业而编著的教材。全书分为 8 章。第 1 章半导体器件,主要介绍半导体的特性、半导体二极管单向导电的机理、伏安特性和主要参数,还介绍了各类二极管、双极型三极管和场效应管的结构、工作原理、伏安特性和主要参数。第 2 章放大电路的基础,主要介绍了晶体三极管(或场效应管)共射极(或共源极)电路的组成、工作原理和基本分析方法,并对工作点的稳定问题进行讨论。然后介绍了单管共集电极(或场效应管共漏极)放大电路以及晶体三极管共基极放大电路的组成、工作原理和分析方法。最后对多级放大电路进行简单介绍。第 3 章放大电路的频率响应,主要介绍了频率响应的一般概念、三极管的频率参数和单管共射放大电路的频率响应。而后对多级放大电路的频率响应进行了介绍。第 4 章集成运算放大电路,主要介绍了集成电路的特点及基本电路结构,电流源电路、差动放大电路、直流电平移动电路、复合管结构电路以及输出电路,并对 F007 和 C14573 集成运放电路进行了具体分析。最后介绍了集成运放的主要参数和电路模型。第 5 章放大器中的反馈,主要介绍了反馈的概念和一般表达式,负反馈放大电路的 4 种组态,深度负反馈放大电路的计算以及负反馈对放大电路性能的影响。而后介绍了负反馈放大电路产生自激的原因及消除方法。第 6 章集成运算放大器的应用,主要介绍了运算电路,信号处理中的放大电路,有源滤波电路,电压比较器,模拟乘法器,正弦波发生器,非正弦波发生器以及波形变换电路。第 7 章功率放大电路,主要介绍了互补对称式功率放大电路和集成功率放大电路。第 8 章直流稳压电源,主要介绍了直流电源的组成,小功率整流滤波电路,硅稳压管稳压电路,串联型直流稳压电路,集成稳压器以及开关型稳压电路。

根据实际需要,本书第三次修订增加如下内容:

1. 第 1 章 1.2.6 光敏二极管,1.2.7 发光二极管,1.3.6 特殊三极管(光敏三极管和光耦合器);
2. 附录;
3. 习题参考答案。

为了使教师能教好和学生能学好模拟电子技术,与本教材相配套的教材有:

1. 实验教材:《电子技术基础实验与课程设计》(第三版),高吉祥,库锡树主编,北京:电子工业出版社,2011.2。
2. 辅助教材:《模拟电子技术学习辅导及习题详解》,高吉祥主编,电子工业出版社,2000年6月出版。
3. 拓宽教材:《全国大学生电子设计竞赛培训系列教程—模拟电子线路设计》,高吉祥主编,电子工业出版社,2007年5月出版。
4. 教师参考用书:主教材与辅助教材习题详细解答。
5. 多媒体课件:模拟电子技术讲课光盘。

其中实验教材、辅助教材、拓宽教材可直接与电子工业出版社联系订购。教师参考用书、多媒体课件(光盘)若有该学校教务处出具的用书证明,可与电子工业出版社或主编高吉祥联系免费赠送。

本书第一版由国防科技大学、南华大学联合编著,高吉祥主编,高天万副主编,陈和、朱卫华等编著。第1、2、3章由高吉祥、刘希顺执笔,第4、5、6由高天万、高吉祥、盛义发执笔,第7章由陈和执笔,第8章由朱卫华执笔,在编著过程中得到南华大学凌球校长和国防科技大学电子科学与工程学院唐朝京院长的大力支持和具体指导。本书由唐朝京主审,刘安芝、唐东、陆珉及北京理工大学张晋民教授等人为本教材的编写做了大量的工作,一并表示感谢!

本书第三版的修订由高吉祥、刘安芝、周妮、向腊完成。由于编者的水平有限,仍有不少错误和缺点,敬请广大读者给予批评指正,帮助我们不断加以改进。

作者  
2011年6月

# “电子技术基础”系列教材 成果鉴定意见

2009年3月29日,国防科技大学在长沙主持召开“以人才培养为目标,以教学改革为契机,建设高水平电子技术基础系列教材”成果鉴定会,鉴定委员会听取了系列教材建设的成果汇报,审查了系列教材总结报告和相关材料,经讨论,一致认为该成果具有以下主要特色及创新点:

## 1. 总体结构设计思想清晰,注重系统配套

该系列教材横向包括5个子系列,即电路分析基础系列、模拟电子技术基础系列、数字电子技术基础系列、高频电子线路系列和全国大学生电子设计竞赛培训系列;每个子系列纵向又分为6个部分,即主干教材、学习辅导及习题详解、实验教材、教师参考用书及配套多媒体课件光盘。整套教材总体结构全面系统,配套性好。

## 2. 重基础和基本技能训练

该系列教材既保留了对经典基础知识论述精辟、配套习题丰富的特点,又特别注重对学生基本实践技能的培养,为每门课的重点内容均编写了相应的实验指导内容,强化了学生基本实验技能的训练。

## 3. 注重学生创新能力的培养,拓宽学生的知识面

系列教材在四门主干教材的基础上,增加了电子设计竞赛培训教程等拓宽教材,编写了大量综合设计实验及课程设计,引进了许多新技术、新方法、新器件及新设计思路的讲解。实践证明:该系列教材极大地拓宽了学生知识面,促进了学生创新能力的培养。

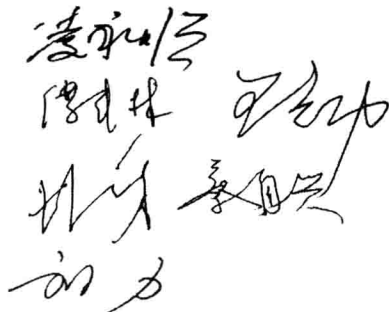
## 4. 教学、科研和设计相结合,构建特色鲜明的教材体系

系列教材在编写过程中立足于电子信息科技发展前沿,依托高水平科研成果,将科研成果有机融合到教材编写中,形成了教材建设、教学实践和科学研究相互促进的良性互动机制。

鉴定委员会一致认为:该系列教材系统性强、配套性好,具有很高的实用和推广价值。其中《高频电子线路》属“十一五”国家级规划教材,在国内同类教材中具有一流水平,《全国大学生电子设计竞赛培训系列教程》(共5册)填补了此类教材编写的空白。该系列教材现已正式出版16种,发行17万余册,对推进教学改革,促进人才培养起到了重要作用。

鉴定委员会主任:

委员:



凌和军  
廖林 王劲  
刘... 李...  
...力

# 目 录

<b>第 1 章 半导体器件</b> ..... (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)	
1.2 半导体二极管 ..... (4)	
1.2.1 PN 结及其单向导电性 ..... (4)	
1.2.2 二极管的伏安特性 ..... (6)	
1.2.3 二极管的主要参数 ..... (7)	
1.2.4 稳压管 ..... (8)	
1.2.5 变容二极管 ..... (10)	
1.2.6 光敏二极管 ..... (12)	
1.2.7 发光二极管 ..... (13)	
1.3 双极型三极管 ..... (15)	
1.3.1 三极管的结构 ..... (15)	
1.3.2 三极管的放大作用和 载流子的运动 ..... (16)	
1.3.3 三极管的特性曲线 ..... (19)	
1.3.4 三极管的主要参数 ..... (23)	
1.3.5 PNP 型三极管 ..... (25)	
1.3.6 特殊三极管 ..... (26)	
1.4 场效应三极管 ..... (28)	
1.4.1 结型场效应管 ..... (28)	
1.4.2 绝缘栅型场效应管 ..... (32)	
1.4.3 场效应管的主要参数 ..... (38)	
本章小结 ..... (39)	
习题一 ..... (40)	
<b>第 2 章 放大电路基础</b> ..... (44)	
2.1 放大的概念 ..... (44)	
2.2 放大电路的主要技术 指标 ..... (45)	
2.3 单管共发射极放大电路 ..... (47)	
2.3.1 单管共发射极电路的 组成 ..... (47)	
2.3.2 单管共发射极放大电路的 工作原理 ..... (48)	
2.3.3 放大电路的基本分析 方法 ..... (48)	
2.4 静态工作点的稳定问题 ..... (61)	
2.4.1 温度对静态工作点的 影响 ..... (61)	
2.4.2 静态工作点稳定电路 ..... (62)	
2.5 单管共集电极电路和共基极 放大电路 ..... (64)	
2.5.1 单管共集电极放大 电路 ..... (64)	
2.5.2 单管共基极放大电路 ..... (67)	
2.5.3 三种基本组态的比较 ..... (69)	
2.6 场效应管放大电路 ..... (71)	
2.6.1 场效应管的特点 ..... (71)	
2.6.2 共源极放大电路 ..... (72)	
2.6.3 分压—自偏压式共源 放大电路 ..... (74)	
2.6.4 共漏极放大电路 ..... (77)	
2.7 多级放大电路 ..... (78)	
2.7.1 多级放大电路的耦合 方式 ..... (78)	
2.7.2 多级放大电路的电压 放大倍数和输入、输出 电阻 ..... (83)	
本章小结 ..... (83)	
习题二 ..... (85)	
<b>第 3 章 放大电路的频率响应</b> ..... (90)	
3.1 频率响应的一般概念 ..... (90)	
3.1.1 幅频特性和相频特性 ..... (90)	
3.1.2 下限频率、上限频率和 通频带 ..... (90)	
3.1.3 频率失真 ..... (91)	



3.1.4 波特图 .....	(91)	电路 .....	(115)
3.2 三极管的频率参数 .....	(95)	4.4 直流电平移动电路 .....	(115)
3.2.1 共射截止频率 .....	(95)	4.5 复合管结构 .....	(116)
3.2.2 特征频率 .....	(95)	4.6 集成运算放大器的输出电路 ..	(117)
3.2.3 共基截止频率 .....	(96)	4.7 集成运算放大电路简介 .....	(118)
3.3 单管共射放大电路的频率 响应 .....	(97)	4.7.1 F007 双极型集成运算 放大器 .....	(118)
3.3.1 混合 $\pi$ 形等效电路 .....	(97)	4.7.2 CMOS C14573 集成运算 放大电路 .....	(120)
3.3.2 阻容耦合单管共射放大 电路的频率响应 .....	(99)	4.8 集成运算放大器的主要参数 ..	(120)
3.3.3 直接耦合单管共射放大 电路的频率响应 .....	(104)	4.9 集成运算放大器的电路模型 ..	(122)
3.4 多级放大电路的频率响应 .....	(104)	4.9.1 集成运算放大器的开环 电压传输特性 .....	(122)
3.4.1 多级放大电路的幅频 特性和相频特性 .....	(104)	4.9.2 集成运算放大器线性工作 的低频模型 .....	(122)
3.4.2 多级放大电路的上限 频率和下限频率 .....	(105)	4.9.3 集成运算放大器的 理想化模型 .....	(123)
本章小结 .....	(106)	本章小结 .....	(123)
习题三 .....	(106)	习题四 .....	(124)
<b>第 4 章 集成运算放大电路</b> .....	<b>(108)</b>	<b>第 5 章 放大器中的反馈</b> .....	<b>(127)</b>
4.1 集成电路的特点及基本电路 结构 .....	(108)	5.1 反馈的概念和一般表达式 .....	(127)
4.1.1 集成电路的特点 .....	(108)	5.2 负反馈放大电路的组态 .....	(128)
4.1.2 参数补偿式运算放大器 的基本结构 .....	(108)	5.2.1 电压串联负反馈放大 电路 .....	(128)
4.2 电流源电路 .....	(109)	5.2.2 电压并联负反馈放大 电路 .....	(129)
4.2.1 比例电流源 .....	(109)	5.2.3 电流串联负反馈放大 电路 .....	(130)
4.2.2 微电流源 .....	(110)	5.2.4 电流并联负反馈放大 电路 .....	(131)
4.2.3 精密镜像恒流源电路 ..	(110)	5.3 深度负反馈放大电路的计算 ..	(133)
4.3 差动放大电路 .....	(111)	5.4 负反馈对放大电路性能的 影响 .....	(134)
4.3.1 差动放大电路的静态 分析 .....	(112)	5.4.1 提高放大倍数的 稳定性 .....	(135)
4.3.2 差动放大电路对差模 信号的放大作用 .....	(112)	5.4.2 减小非线性失真和抑制 干扰 .....	(135)
4.3.3 差动放大电路对共模 信号的抑制作用 .....	(113)	5.4.3 展宽通频带 .....	(136)
4.3.4 单端输入差动放大 电路 .....	(114)	5.4.4 改变输入电阻和输出	
4.3.5 具有恒流源的差动			

电阻 .....	(138)	6.5.1 模拟乘法器简介 .....	(177)
5.5 负反馈对放大电路的自激及 消除 .....	(142)	6.5.2 变跨导模拟乘法器工作 原理 .....	(178)
5.5.1 自激的原因和产生 条件 .....	(142)	6.5.3 模拟集成乘法器 .....	(180)
5.5.2 利用环路增益波特图判别 是否产生自激振荡 .....	(142)	6.5.4 乘法器的主要参数 .....	(183)
5.5.3 负反馈放大电路自激 振荡的消除方法 .....	(143)	6.5.5 乘法器的应用举例 .....	(183)
本章小结 .....	(145)	6.6 正弦波发生器 .....	(189)
习题五 .....	(146)	6.6.1 反馈振荡器的原理 .....	(190)
<b>第 6 章 集成运算放大器的应用</b> .....	(149)	6.6.2 RC 正弦波振荡电路 .....	(191)
6.1 运算电路 .....	(149)	6.6.3 LC 正弦振荡器 .....	(196)
6.1.1 比例运算电路 .....	(149)	6.6.4 石英晶体振荡器 .....	(205)
6.1.2 求和电路 .....	(152)	6.7 非正弦波发生电路 .....	(213)
6.1.3 微分和积分电路 .....	(154)	6.7.1 矩形波发生电路 .....	(213)
6.1.4 对数和指数运算 电路 .....	(156)	6.7.2 三角波发生电路 .....	(214)
6.1.5 乘法与除法电路 .....	(159)	6.7.3 锯齿波发生电路 .....	(215)
6.2 信号处理中的放大电路 .....	(160)	* 6.8 利用集成运放实现信号变换的 电路 .....	(215)
6.2.1 集成运放性能对运算 误差的影响 .....	(160)	6.8.1 电流—电压的相互变换 电路 .....	(215)
6.2.2 精密放大电路 .....	(161)	6.8.2 电压—频率变换电路 .....	(217)
6.2.3 电荷放大器 .....	(162)	本章小结 .....	(219)
* 6.2.4 隔离放大器 .....	(163)	习题六 .....	(221)
* 6.2.5 放大电路中的干扰和 噪声及其抑制措施 .....	(164)	<b>第 7 章 功率放大电路</b> .....	(228)
6.3 滤波电路 .....	(165)	7.1 概述 .....	(228)
6.3.1 滤波电路的基本 知识 .....	(165)	7.1.1 对功率放大电路的一般 要求 .....	(228)
6.3.2 低通滤波电路 .....	(167)	7.1.2 功率放大器提高效率的 主要途径 .....	(229)
6.3.3 其他滤波电路 .....	(170)	7.2 互补对称式功率放大器 .....	(230)
6.4 电压比较器 .....	(174)	7.2.1 无输出电容的互补 对称式功率放大器 (OCL 电路) .....	(230)
6.4.1 单限比较器 .....	(174)	7.2.2 无输出变压器的互补 对称式功率放大器 (OTL 电路) .....	(231)
6.4.2 滞回比较器 .....	(175)	7.2.3 桥式推挽功率放大 电路(BTL) .....	(232)
6.4.3 窗口比较器 .....	(175)	7.2.4 互补对称式功率放大器 的效率 .....	(233)
6.4.4 集成电压比较器 .....	(176)		
6.5 乘法器及应用 .....	(177)		

7.2.5 OTL 电路中晶体管 的选择 .....	(233)	8.4.2 输出电压的调节范围 ...	(252)
7.3 集成功率放大电路 .....	(235)	8.4.3 调整管的选择 .....	(253)
7.3.1 集成功率放大器 LM386 简介 .....	(235)	8.4.4 稳压电路的过载保护 ...	(255)
7.3.2 集成功率放大电路的 应用 .....	(236)	8.5 集成稳压器 .....	(257)
本章小结 .....	(239)	8.5.1 三端集成稳压器的 组成 .....	(257)
习题七 .....	(239)	8.5.2 三端集成稳压器的主要 参数 .....	(258)
<b>第 8 章 直流稳压电源</b> .....	<b>(241)</b>	8.5.3 三端集成稳压器的 应用 .....	(259)
8.1 直流电源的组成 .....	(241)	8.6 开关型稳压电路 .....	(261)
8.2 小功率整流滤波电路 .....	(242)	8.6.1 开关型稳压电路的特点和 分类 .....	(262)
8.2.1 单相桥式整流电路 .....	(242)	8.6.2 开关型稳压电路的组成和 工作原理 .....	(263)
8.2.2 滤波电路 .....	(243)	本章小结 .....	(264)
8.3 硅稳压管稳压电路 .....	(247)	习题八 .....	(265)
8.3.1 稳压电路的主要指标 ...	(247)	<b>附录 习题参考答案</b> .....	<b>(270)</b>
8.3.2 硅稳压管的伏安特性 ...	(248)	<b>常用文字符号说明</b> .....	<b>(277)</b>
8.3.3 硅稳压管稳压电路 .....	(248)	<b>参考文献</b> .....	<b>(282)</b>
8.4 串联型直流稳压电路 .....	(251)		
8.4.1 电路组成和工作原理 ...	(251)		

# 第 1 章 半导体器件

**内容提要:** 半导体器件是组成各种电子电路的基础。本章首先介绍半导体的特性, 半导体中载流子的运动, 阐明 PN 结的单向导电性; 然后介绍半导体二极管、稳压管、变容二极管、双极型三极管, 以及场效应三极管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

## 1.1 半导体的特性

自然界的各种物质, 根据其导电能力的差别, 可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。通常将电阻率小于  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  的物质称为导体, 例如银、铜和铝等金属材料都是良好的导体。电阻率大于  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  的物质一般称为绝缘体, 例如橡胶、塑料等。导电性能介于导体和绝缘体之间的一大类物质统称为半导体。大多数半导体器件所用的主要材料是硅(Si)和锗(Ge)。

半导体的导电性能是由其原子结构决定的。以硅为例, 它的原子序数是 14, 在硅原子中共有 14 个电子围绕原子核旋转, 最外层轨道上有 4 个电子, 如图 1.1.1(a) 所示。原子外层轨道上的电子通常称为价电子。锗的原子序数是 32, 但它与硅有一个共同点, 即原子最外层轨道上也有 4 个价电子, 所以硅和锗都是 4 价元素。为了方便起见, 常常用带 +4 电荷的正离子和周围的 4 个价电子来表示一个 4 价元素的原子, 如图 1.1.1(b) 所示。

在硅(或锗)的晶体中, 原子在空间排列成规则的晶格。其中每个原子最外层的价电子, 不仅受到自身原子核的束缚, 同时还受到相邻原子核的吸引。因此, 价电子不仅围绕自身的原子核运动, 同时也出现在围绕相邻原子核的轨道上。于是, 两个相邻的原子共有一对价电子, 这一对价电子组成所谓的共价键, 如图 1.1.2 所示。在硅晶体中, 每个原子都和周围的 4 个原子用共价键的形式互相紧密地联系在一起。

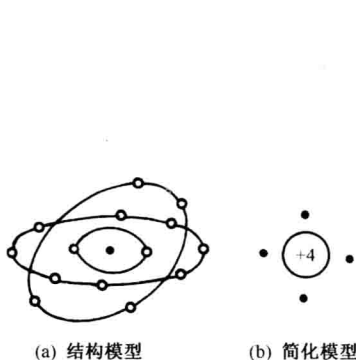


图 1.1.1 硅原子的结构模型和简化模型

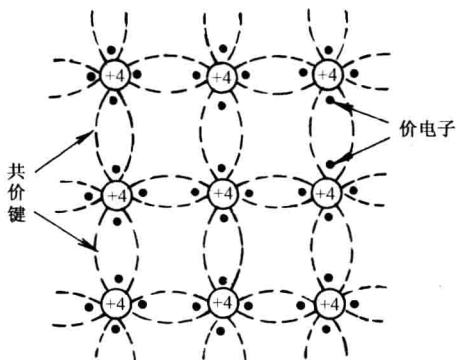


图 1.1.2 晶体中的共价键结构

### 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**。对于本征半导体来说,由于晶体中共价键的结合力很强,在热力学温度零度(即  $T=0\text{K}$ , 相当于  $-273^{\circ}\text{C}$ )时,价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚,因此,晶体中没有自由电子。所以,在  $T=0\text{K}$  时,半导体不能导电,如同绝缘体一样。

如果温度逐渐升高,例如在室温条件下,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**。此时,本征半导体具有一定的导电能力,但因自由电子的数量很少,因此它的导电能力比较微弱。

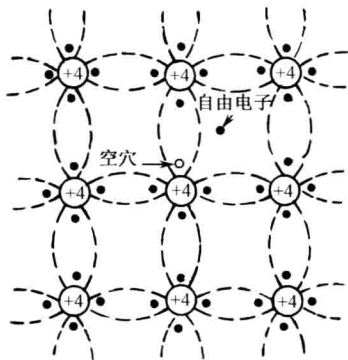


图 1.1.3 本征半导体中的自由电子和空穴

当一部分价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时,在原来的共价键中留下一个空位,这种空位称之为**空穴**,如图 1.1.3 所示。由于存在这样的空位,附近共价键中的电子就比较容易进来填补,而在附近的共价键中留下一个新的空位,其他地方的电子又有可能来填补后一个空位。从效果上看,这种具有电子的填补运动,相当于带正电荷的空穴在运动一样。为了与自由电子的运动区别开来,称之为空穴运动,并将空穴看成为带正电的载流子。

由此可见,半导体中存在着两种载流子:带负电的自由电子和带正电的空穴。在本征半导体中,自由电子和空穴总是成对地出现,成为**电子—空穴对**,因此,两种载流子浓度是相等的。分别用  $n$  和  $p$  表示电子和空穴的浓度,并用  $n_i$  和  $p_i$  分别表示本征半导体中电子和空穴的浓度,可得到  $n_i = p_i$ 。

由于物质的运动,半导体中的电子—空穴对不断地产生,同时,当电子与空穴相遇时又因为复合而使电子—空穴对消失。在一定温度下,上述产生和复合两种运动达到了平衡,使电子—空穴对的浓度一定。可以证明,本征半导体中载流子的浓度,除与半导体材料本身的性质有关以外,还与温度密切相关,而且随着温度的升高,基本上按指数规律增加。因此,本征载流子的浓度对温度十分敏感。例如,硅材料,大约温度每升高  $8^{\circ}\text{C}$ ,本征载流子的浓度  $n_i$  增加一倍;对于锗材料,大约温度每升高  $12^{\circ}\text{C}$ ,  $n_i$  增加一倍。

### 1.1.2 杂质半导体

本征半导体中虽然存在两种载流子,但因本征载流子的浓度很低,所以总的来说导电能力很差。但是,如果在本征半导体中掺入某种特定的杂质,成为**杂质半导体**后,情况就会改观,它们的导电性能将发生质的变化。

#### 1. N 型半导体

如果在 4 价硅或锗的晶体中掺入少量的 5 价杂质元素,如**磷、锑、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出一个电子。这个电子不受共价键的束缚,只受自身原子核的吸引。而原子核的这种束缚力比较微弱,在室温下即可成为自由电子,如图1.1.4所示。在这种杂质半导体中,电子的浓度将大大高于空穴的浓度,即 $n \gg p$ ,因而主要依靠电子导电,故称为**电子型半导体**或**N型半导体**。其中的5价杂质原子可以提供电子,所以称为**施主原子**。N型半导体中的电子称为**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)。

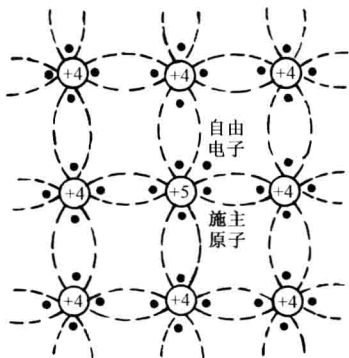


图 1.1.4 N型半导体的晶体结构

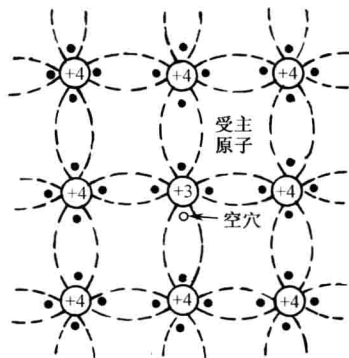


图 1.1.5 P型半导体的晶体结构

## 2. P型半导体

如果在硅(或锗)的晶体中掺入少量的3价杂质元素,如硼、镓、铟等,此时杂质原子的最外层只有3个价电子,当它和周围的硅原子组成共价键时,由于缺少一个电子而形成空穴,如图1.1.5所示。因此,在这种杂质半导体中,空穴的浓度将比电子的浓度高得多,即 $p \gg n$ ,因而主要依靠空穴导电,所以称为**空穴型半导体**或**P型半导体**。这种3价的杂质原子能够产生多余的空穴,起着接受电子的作用,所以称为**受主原子**。在P型半导体中,多数载流子是空穴,而少数载流子是电子。

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;同样地,只画出负离子和等量的空穴来表示P型半导体,分别如图1.1.6(a)和(b)所示。

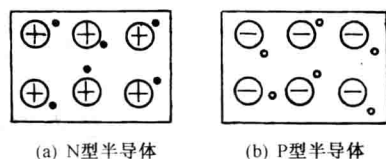


图 1.1.6 杂质半导体的简化表示法

总之,在纯净的半导体中掺入杂质以后,导电性能将大大改善。例如,在4价的硅中掺入百万分之一的3价杂质硼后,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:本征半导体掺入不同性质、不同浓度的杂质后,并对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。

## 1.2 半导体二极管

半导体二极管正是利用这样的杂质半导体做成的。首先来研究一下,当P型半导体和N型半导体结合在一起时,将会发生什么情况。

### 1.2.1 PN结及其单向导电性

如果将一块半导体的一侧掺杂成为P型半导体,而另一侧掺杂成为N型半导体,则在二者的交界处将形成一个PN结。

#### 1. PN结中载流子的运动

在P型和N型半导体的交界面两侧,由于电子和空穴的浓度相差悬殊,所以N型区中的多数载流子(电子)要向P型区扩散;同时,P型区中的多数载流子(空穴)也要向N型区扩散,如图1.2.1(a)所示。当电子和空穴相遇时,将发生复合而消失。于是,在交界面两侧形成一个由不能移动的正、负离子组成的**空间电荷区**,也就是PN结,如图1.2.1(b)所示。由于空间电荷区内缺少可以自由运动的载流子,所以又称为**耗尽层**。在扩散之前,无论P型区还是N型区,从整体来说,各自都保持着电中性。因为在P型区中,多数载流子空穴的浓度等于负离子的浓度与少数载流子的电子的浓度之和;而在N区中,电子(多数载流子)的浓度等于正离子的浓度与空穴(少数载流子)的浓度之和。但是,由于多数载流子的扩散运动,电子和空穴因复合而消失,空间电荷区中只剩下不能参加导电的正、负离子,因而破坏了P型区和N型区原来的电中性。在图1.2.1(b)中,空间电荷区的左侧(P区)带负电,右侧(N区)带正电,因此,在二者之间产生了一个电位差 $U_D$ ,称为**电位壁垒**。它的电场方向是由N区指向P区,这个电场称为**内电场**。因为空穴带正电,而电子带负电,所以内电场的作用将阻止多数载流子继续进行扩散,所以它又称为**阻挡层**。但是,这个内电场却有利于少数载流子的运动,即有利于P区中的电子向N区运动,N区中的空穴向P区运动。通常,将载流子在电场作用下的定向运动称为**漂移运动**。

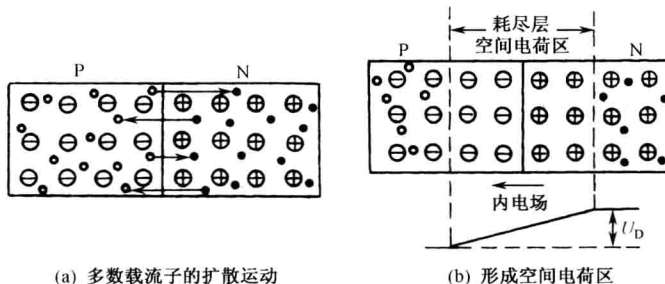


图 1.2.1 PN 结的形成

综上所述,在PN结中进行着两种载流子的运动;多数载流子的**扩散运动**和少数载流子的**漂移运动**。扩散运动产生的电流称为**扩散电流**,漂移运动产生的电流称为**漂移电流**。随着扩散运动的进行,空间电荷区的宽度将逐渐增大;而随着漂移运动的进行,空间电荷区的宽度将逐渐减

小。到达平衡时,无论电子或空穴,它们各自产生的扩散电流和漂移电流都达到相等,则PN结中总的电流等于零,空间电荷区的宽度也达到稳定。一般,空间电荷区很薄,其宽度约为几微米到几十微米。电位壁垒 $U_D$ 的大小,硅材料约为(0.6~0.8)V,锗材料约为(0.2~0.3)V。

## 2. PN结的单向导电性

首先,假设在PN结上外加一个正向电压,即电源的正极接P区,电源的负极接N区,如图1.2.2所示。PN结的这种接法称为**正向接法**或**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,于是电位壁垒也随之降低,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 $I$ ,其方向在PN结中是从P区流向N区,如图1.2.2所示。

正向偏置时,只要在PN结两端加上一个很小的正向电压,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 $R$ 。

另外,假设在PN结上加上一个反向电压,即电源的正极接N区,而电源的负极接P区,如图1.2.3所示,这种接法称为**反向接法**或**反向偏置**(简称**反偏**)。

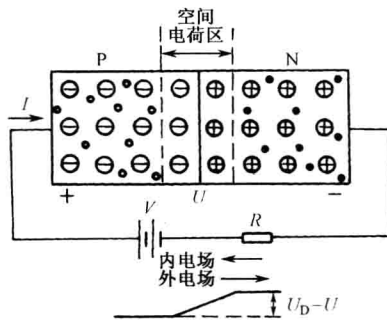


图 1.2.2 正向偏置的PN结

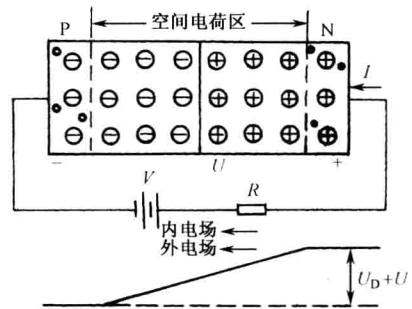


图 1.2.3 反向偏置的PN结

反向接法时,外电场与内电场的方向一致,因而增强了内电场的作用。此时,外电场使P区中的空穴和N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,同时电位壁垒也随之增高,其结果将不利于多子的扩散运动,而有利于少子的漂移运动。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 $I$ ,方向见图1.2.3。因为少子的浓度很低,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**。



## 1.2.2 二极管的伏安特性

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。图1.2.4(a)示出了一些常见的二极管的外形图。图1.2.4(b)是二极管的图形符号,其中阳极从P区引出,阴极从N区引出。

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。从二极管的结构来分,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,适用于检波和小功率的整流电路。面结型二极管则相反,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,适用于在脉冲数字电路中用做开关管。

二极管的性能可用其伏安特性来描述。为了测得二极管的伏安特性,可在二极管的两端加上一个电压 $U$ ,然后测出流过二极管的电流 $I$ ,电流与电压之间的关系曲线 $I=f(U)$ 即是二极管的伏安特性。

一个典型的二极管的伏安特性如图1.2.5所示。

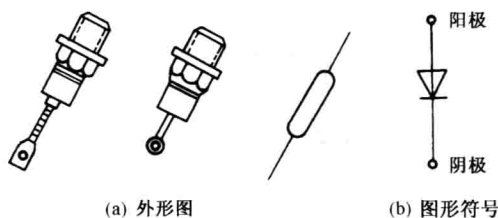


图 1.2.4 半导体二极管的外形及图形符号

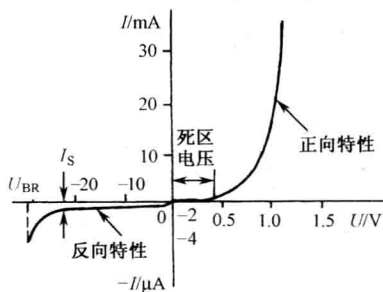


图 1.2.5 二极管的伏安特性

特性曲线分为两部分:加正向电压时的特性称为正向特性(图中右半部分);加反向电压时的特性称为反向特性(图中左半部分)。

### 1. 正向特性

当加在二极管上的正向电压比较小时,正向电流很小,几乎等于零。只有当在二极管两端的正向电压超过某一数值时,正向电流才明显地增大。正向特性上的这一数值通常称为“死区电压”,如图1.2.5所示。死区电压的大小与二极管的材料以及温度等因素有关。一般,硅二极管的死区电压为0.5V左右,锗二极管为0.1V左右。

当正向电压超过死区电压以后,随着电压的升高,正向电流将迅速增大。电流与电压的关系基本上是一条指数曲线。

### 2. 反向特性

由图1.2.5可见,当在二极管上加上反向电压时,反向电流的值很小。而且当反向电压超过零点几伏以后,反向电流不再随着反向电压而增大,即达到了饱和,这个电流称为**反向饱和电流**,用符号 $I_s$ 表示。