



全国高等农林院校“十一五”规划教材

模拟电子技术 基础教程

何火娇 主编

 中国农业出版社

全国高等农林院校“十一五”规划教材

模拟电子技术基础教程

何火娇 主编

中国农业出版社

内 容 简 介

本书作为电类本科专业“模拟电子技术”必修课程的教材,全书共9章,主要介绍PN结、二极管及基本电路,三极管和放大电路的组成、工作原理及分析与计算,场效应管及放大电路,放大电路的负反馈,功率放大电路,集成运算放大电路,正弦波振荡电路,直流稳压电源,以及读图训练。

本教材的编写原则是,突出重点,强调基本概念、基本单元电路和基本分析方法,内容选择注重实用和够用。在写法上,抓住重点、分散难点、解剖电路、深入浅出。

本教材可作为高等院校电子、计算机、电气、自动化等有关专业的教材或参考书,也可作为专科相关专业的教材。由于本书编写通俗易懂,能供读者自学和科技人员作参考书使用。

作者名单

主 编 何火娇

副主编 姚传安

编 者 任力生 何火娇

周 兵 姚传安

前 言

本书是全国高等农林院校“十一五”规划教材，是根据作者多年积累的教学改革与实践经验编写而成的。模拟电子技术这门课程的特点是概念多、基本单元电路多和实践性强，因此，本书的编写原则是：突出重点；强调基本概念、基本单元电路和基本分析方法；内容选择注重实用和够用。在写法上，抓住重点，分散难点，解剖电路，深入浅出。在分析和计算时，能够从工程的角度出发，强调概念清楚、内容实用，使本书通俗易懂。

全书共分为9章。第1章主要介绍半导体二极管和基本电路。第2章主要介绍放大电路的组成、工作原理、放大电路的分析与计算，这是学习放大电路的入门章，这一章概念集中，基本单元电路多，放大电路的分析方法多，因此，对每个知识点都作了详细的讲解，对各单元电路，从电路的组成、工作原理和计算作者都进行了分析，并列举了例题以帮助读者理解和掌握基本放大电路的分析和应用。第3章是场效应管及放大电路，由于有三极管及放大电路的基础，所以这一章内容较简洁。第4章是放大电路的负反馈，这一章既是重点又是难点，在撰写手法上运用了先具体、后抽象的写作技巧，先从读者熟悉的具体实例入手，引出新的概念和新的分析方法。对每类负反馈放大电路的典型电路进行分解，化难为易。第5章介绍功率放大电路，强调了功率放大电路与电压放大电路的不同之处。第6章主要介绍集成运算放大电路，重点介绍了运放的线性运用，对非线性运用作了简要介绍。第7章是正弦波振荡电路，主要介绍自激振荡的条件，给出了典型电路。第8章是直流稳压电源，这也是重点章节之一，因此，对稳压电源的工作原理、电路参数、元件的选择和电路的分析计算等都作了详细的介绍，并列举了例题。第9章是读图训练，主要使读者了解电子电路读图的步骤，能阅读一般难度的电子线路图。

本教材的特色之处就是把较复杂的问题分解为多个简单的问题，使读者容易掌握和运用。

本书由江西农业大学的何火娇担任主编和完成统稿工作，其中，第 1、9 章由河北农业大学任力生编写；第 2、3 章由江西农业大学何火娇编写，第 4、8 章由河南农业大学姚传安编写，第 5、6、7 章由云南农业大学周兵编写。

本教材在编写过程中，得到参编教师所在学校教务处的大力支持和同行帮助，在此向他们表示感谢。限于作者的水平，书中难免有错，敬请广大读者和同行专家指评指正，联系邮箱：hhojj@sina.com。

编 者

2007 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 半导体二极管及其基本电路	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 半导体的导电特性	1
1.1.2 杂质半导体	4
1.2 PN 结	5
1.2.1 PN 结的形成	5
1.2.2 PN 结的单向导电性	6
1.2.3 PN 结的电容效应	8
1.3 半导体二极管	8
1.3.1 基本结构	8
1.3.2 伏安特性	9
1.3.3 主要参数	11
1.3.4 二极管的应用电路	12
1.4 整流电路	15
1.4.1 单相半波整流电路	15
1.4.2 单相桥式整流电路	18
1.5 稳压管及其稳压电路	19
1.5.1 稳压管	19
1.5.2 稳压管的参数	20
1.5.3 稳压管稳压电路	21
1.6 特殊二极管	22
1.6.1 变容二极管	22
1.6.2 光电二极管	23
1.6.3 发光二极管	23
1.6.4 激光二极管	25
小结	25

习题	26
第2章 半导体三极管及其放大电路	32
2.1 半导体三极管	32
2.1.1 三极管的基本结构	32
2.1.2 电流分配与放大原理	34
2.1.3 三极管的特性曲线及主要参数	37
2.2 基本交流放大电路	41
2.2.1 基本交流放大电路的组成	41
2.2.2 放大电路的分析	44
2.2.3 放大电路的微变等效电路法	52
2.3 静态工作点稳定电路	59
2.3.1 温度对工作点的影响	59
2.3.2 静态工作点稳定电路	60
2.3.3 电路分析	61
2.4 共集电极放大电路	64
2.4.1 静态分析	64
2.4.2 动态分析	65
2.5 共基极放大电路	69
2.5.1 静态分析	69
2.5.2 动态分析	69
2.6 三种基本交流放大电路的性能比较	70
2.7 多级放大电路	71
2.7.1 多级放大电路的组成	71
2.7.2 阻容耦合放大电路的分析	72
2.8 放大电路的频率特性	75
2.8.1 频率特性的概念	75
2.8.2 单管共射电路的频率特性分析	78
2.8.3 多级放大电路的频率特性	91
小结	92
习题	94
第3章 场效应管	102
3.1 结型场效应管	102

3.1.1 结构与工作原理	102
3.1.2 特性曲线	105
3.2 绝缘栅场效应管	107
3.2.1 增强型绝缘栅效应管	107
3.2.2 耗尽型绝缘栅场效应管	111
3.2.3 绝缘栅场效应管的类型	112
3.2.4 主要参数	112
3.2.5 场效应管与三极管的比较	114
3.3 场效应管放大电路	115
3.3.1 分压式偏置电路	115
3.3.2 自给偏压偏置电路	121
3.3.3 共漏极放大电路	123
小结	124
习题	125
第4章 负反馈放大电路	126
4.1 反馈的概念与类型	126
4.1.1 反馈的概念	126
4.1.2 反馈的分类	127
4.2 负反馈放大电路类型分析	128
4.2.1 电流串联负反馈	128
4.2.2 电压并联负反馈	129
4.2.3 负反馈类型的判别	130
4.3 负反馈放大电路的方框图	134
4.3.1 电压串联负反馈方框图	134
4.3.2 电流串联负反馈方框图	136
4.3.3 电压并联负反馈方框图	137
4.3.4 电流并联负反馈方框图	138
4.4 负反馈对放大电路性能的影响	140
4.4.1 对放大倍数的影响	140
4.4.2 减小非线性失真和抑制干扰、噪声	141
4.4.3 可以展宽频带	142
4.4.4 影响输入电阻和输出电阻	144
4.5 负反馈放大电路的分析计算	147

4.5.1 深度负反馈的概念	147
4.5.2 深度负反馈电路估算方法	148
4.5.3 计算举例	149
4.6 负反馈放大电路的稳定性	154
4.6.1 负反馈放大电路产生自激振荡的原因及条件	154
4.6.2 负反馈放大电路稳定性的判断	155
4.6.3 消除自激振荡的常用方法	157
小结	159
习题	160
第5章 功率放大电路	165
5.1 功率放大电路的特殊性	165
5.1.1 功率放大电路的特点	165
5.1.2 功率放大电路的分类	167
5.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	169
5.2.1 电路组成和工作原理	169
5.2.2 功率晶体管的选择	172
5.3 甲乙类互补对称电路	174
5.3.1 甲乙类单电源互补对称功率放大电路	174
5.3.2 甲乙类双电源互补对称电路	176
5.3.3 复合管	178
5.4 集成功率放大电路	179
5.4.1 集成功率器件	180
5.4.2 实用功率放大电路	182
小结	184
习题	185
第6章 集成运算放大电路	189
6.1 集成电路简介	189
6.1.1 集成电路的特点	189
6.1.2 集成电路的外形与分类	190
6.1.3 集成运算放大器的结构特点	191
6.2 差分放大电路	192
6.2.1 零点漂移的概念	192

6.2.2 基本差分放大电路的分析	192
6.2.3 具有恒流源的差分放大电路	198
6.3 通用型集成运算放大器	201
6.4 集成运放的主要参数	202
6.4.1 集成运放的主要技术指标	203
6.4.2 理想运算放大器的性能指标	205
6.5 集成运算放大电路的应用	207
6.5.1 信号的运算电路	207
6.5.2 对数和反对数电路	215
6.5.3 有源滤波电路	216
6.5.4 电压比较器	222
小结	227
习题	228
第7章 正弦波振荡电路	235
7.1 正弦波振荡概述	235
7.1.1 产生正弦振荡的条件	235
7.1.2 振荡的建立和稳定过程	237
7.1.3 振荡电路的组成	237
7.1.4 振荡电路的分析方法	238
7.2 RC 正弦波振荡电路	238
7.2.1 RC 正弦波振荡电路的组成	238
7.2.2 工作原理	241
7.3 LC 振荡电路	242
7.3.1 变压器反馈式振荡电路	243
7.3.2 三端电感式振荡电路	244
7.3.3 三端电容式振荡电路	245
7.4 石英晶体振荡电路	247
7.4.1 石英晶体特性	248
7.4.2 石英晶体振荡电路	250
7.5 应用举例	252
小结	253
习题	254

第8章 直流稳压电源	258
8.1 直流稳压电源的组成	258
8.2 滤波电路	259
8.2.1 电容滤波电路	259
8.2.2 其他形式的滤波电路	263
8.3 倍压整流电路	266
8.3.1 二倍压整流电路	266
8.3.2 多倍压整流电路	267
8.4 串联反馈型稳压电路	267
8.4.1 稳压电路的质量指标	267
8.4.2 串联反馈型稳压电路	268
8.5 集成稳压电路	271
8.5.1 固定输出三端集成稳压电路	272
8.5.2 可调输出三端集成稳压电路	274
8.6 开关型稳压电路	277
8.6.1 串联开关型稳压电路	278
8.6.2 并联开关型稳压电路	280
8.7 直流稳压电源设计实例	281
8.7.1 基本设计要求	282
8.7.2 基本设计过程	282
8.7.3 设计举例	286
小结	288
习题	289
第9章 模拟电子系统电路分析	293
9.1 电子系统分析步骤	293
9.1.1 模拟电子电路的种类	293
9.1.2 读图步骤	294
9.2 实用电路分析举例	295
9.2.1 实用锯齿波发生器	295
9.2.2 双水位检测显示电路	298
9.2.3 电阻值分选检测电路	299
9.2.4 电压监视器	301

目 录

9.2.5 太阳能充电器	302
9.2.6 袖珍式电话机	303
习题	304
附 1 习题参考答案	309
附 2 放大倍数与增益的关系	330
主要参考文献	332

第 1 章 半导体二极管及其基本电路

【内容提要】本章是学习半导体器件的入门篇，也是学习后续课程的基础。在这一章中，首先介绍半导体的导电性能和特点、半导体器件的基础单元——PN 结，然后介绍半导体二极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数，以及二极管应用电路及其分析方法。最后介绍了特殊二极管的结构及工作原理。读者必须掌握 PN 结的单向导电特性、二极管的特性曲线和使用二极管的注意事项；掌握分析二极管和稳压管电路的分析方法。对于半导体器件内部物理过程要求了解，重点应着眼于器件在电路中的应用。

半导体器件是现代电子技术的核心组成部分。由于它具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛应用。由半导体材料组成的集成电路，特别是大规模和超大规模集成电路不断更新换代，致使电子设备在微型化、可靠性和电子系统设计的灵活性等方面有了重大的飞跃。

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体的导电特性

自然界中的物质，按其导电性能分类，可分为导体、绝缘体和半导体。导体是一种很容易传导电流的物质，它的电阻率 $\rho < 10^{-3} \Omega\text{m}$ ，如银、铜、铝、铁等金属材料；而绝缘体是几乎不传导电流的物质，它的电阻率 $\rho > 10^9 \Omega\text{m}$ ，如陶瓷、橡皮、塑料、石英等材料；半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间，如四价元素硅（Si）、锗（Ge）、化合物砷化镓（GaAs）等，除了在导电性能方面与导体和绝缘体不同外，它还具有不同于其他物质的导电特点。

1. 半导体的导电特性

（1）热敏特性 半导体对温度变化反应灵敏，电阻率随温度升高而显著降低。例如，纯锗在温度从 20°C 升高到 30°C 时，其电阻率就要降低一半左右。利用这种特性可以制成各种半导体热敏元件，用来检测温度变化。

(2) 光敏特性 半导体对光照很敏感,光照可使半导体的电阻率显著减小。利用这种特性可以制成各种光敏元件。

(3) 掺杂特性 若在纯净的半导体中加入微量杂质;其电阻率会发生很大变化,导电能力可增加几十万乃至几百万倍。例如在纯硅中掺入百分之一的硼后,硅的电阻率会从 $21 \times 10^8 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ 降到 $4 \times 10^3 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ 左右。利用这种特性可制成半导体二极管、三极管、场效应管和晶闸管等各种不同用途的半导体器件。

这些特点表明半导体的导电机构不同于其他物质,为了理解这些特点,有必要了解半导体的结构。

2. 半导体的原子结构

(1) 原子结构 常用的半导体材料是硅和锗。图 1-1 是硅和锗的原子结构图,我们把最外层电子称为价电子,其他层的电子受原子核的束缚很紧,通常与原子核一起成为很难分离的整体,这一整体称为惯性核。因此,原子可看成由惯性核和价电子组成,其简化模型如图 1-1c 所示。硅和锗最外层都有四个价电子,它们的惯性核所带正的净电荷量等于四个电子电量,因此硅和锗的原子结构简化模型相同。

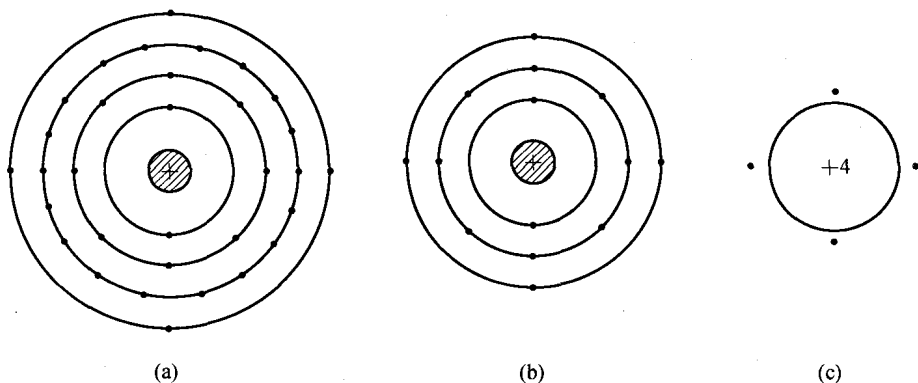


图 1-1 锗和硅的原子结构

(a) 锗 Ge (b) 硅 Si (c) 简化的原子模型

(2) 共价键结构 制作器件的半导体材料为单晶体,其晶体排列有序,形成共价键结构,如图 1-2 所示。共价键结构是这样形成的:由图 1-2 可见,每个原子的价电子不仅受本原子的作用力,而且还要受相邻原子的作用力,使价电子在两个相邻原子的公共轨道上运动(电子的共有化运动),形成共价键结构,如图 1-2b 所示。共价键内有电子对,它们被束缚在两个原子之间,在没有外加能量激发的情况下,价电子是不能自由移动的,因此,它们被称为束缚电子。本征半导体中所有的价电子都在共价键内,所以在热力学零度 ($T=0 \text{ K}$)

和无外界激发时，硅和锗晶体中没有自由移动的电子，不能导电。

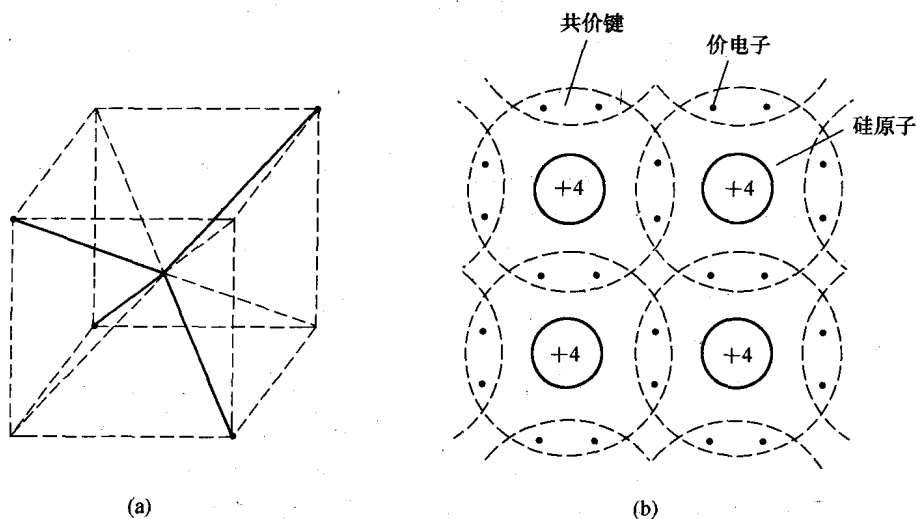


图 1-2 本征半导体的原子共价键结构

(a) 晶体中原子的晶体结构 (b) 硅单晶中的共价键结构

3. 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净的、结构完整的半导体，制成晶体后形成共价键结构。

(1) 电子—空穴对 共价键中的价电子在受到温度和光照的能量激发下，少数价电子可以获得足够的能量而跳出共价键，成为自由电子，同时在原来的位置上留下了一个空位，把这个空位称为空穴，如图 1-3 所示，这种现象称为本征激发。由本征激发产生的自由电子和空穴的数量是一样多的，称为电子—空穴对。

(2) 电子—空穴对的运动 原子由于缺少了一个电子带正电，于是可以把空穴看成是一个带正电荷的粒子，其电量与电子的电量相等。在共有化运动中，空穴附近的价电子很容易被吸引

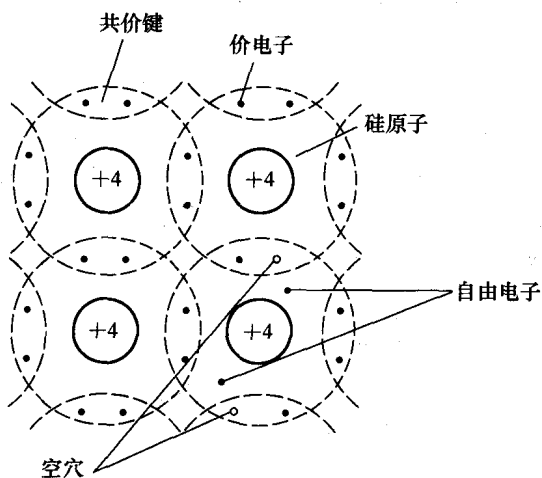


图 1-3 自由电子—空穴对的产生示意图

填补到这个空穴上，同时又在填补过来的价电子的原位置上出现一个新的空穴，这样价电子的依次填补移动，其效果就好像是空穴在自由移动。所以，从导电的角度看，自由电子是带负电的载流子，而空穴是带正电的载流子。在没有外加电场时，自由电子和空穴的运动都是无规则的；在外加电场的作用下，自由电子和空穴作互为相反的定向运动，同时参与导电。

由上述可知，**半导体中有两种载流子，一种是自由电子，另一种是空穴，这是半导体导电区别于金属导电的重要特性。**当半导体两端加上电压时，半导体中将出现两种电流：一是自由电子作定向运动所形成的电子电流，二是仍被原子核晶体束缚的价电子递补空穴所形成的空穴电流。

4. 半导体中的关键概念

在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现的，同时又不断复合（价电子填补空穴）。在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，于是半导体中的载流子（自由电子和空穴）便维持一定浓度，即数目一定。**温度越高，载流子的数目越多，导电性能也越好。所以，温度对半导体器件性能的影响很大，这是一个关键概念。**

1.1.2 杂质半导体

利用半导体对掺杂敏感的特性，在本征半导体中掺入微量的杂质，如磷元素或硼元素，半导体的导电能力大大增强。由于掺入的杂质不同，形成的杂质半导体可分 P 型和 N 型两种。

1. N 型半导体

在硅或锗的单晶中掺入磷（或其他五价元素），形成 N 型半导体。

磷原子的最外层有五个价电子，而硅原子只有四个，在组成共价键结构时，磷原子多出一个电子，多余的第五个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而形成自由电子，如图 1-4 所示。每一个磷原子都能提供一个电子，于是半导体中的自由电子数目大量增加。在这种半导体中，自由电子是多数载流子（简称多子），空穴是少数载流子（简称少子），以自由电子导电为主，故称它为电子型半导体或 N 型半导体，用“ $\oplus$ ”符号来表示，符号中的“ $\oplus$ ”表示原子失去电子而显正电，称为正离子。

2. P 型半导体

在硅或锗晶体中掺入三价元素的硼，每个硼原子，在构成共价键结构时，因缺少一个电子而产生一个空穴。当相邻原子中的价电子受到热或其他激发获得能量时，就有可能填补这个空穴，而在该相邻原子中便出现另一个空穴，如图 1-5 所示。每一个硼原子都能提供一个空穴，于是在半导体中就形成了