

全国高职高专规划教材

模拟电子技术

Analog Electronics

黄 强 主 编
傅宝玉 副主编

43



科学出版社

www.sciencep.com



全国高职高专规划教材

模 拟 电 子 技 术

黄 强 主 编

傅宝玉 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是作者在多年教学经验基础上,根据高职高专教育的基本要求而编写的。全书由半导体器件基础、基本放大电路、集成运算放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大器的应用、波形产生电路、直流稳压电源、晶闸管电路及其应用组成。作者在编写时力求简明扼要,深入浅出,图文并茂,重点突出。每章配有本章要点、本章小结、习题及参考答案,便于学生自学,以提高学生学习本课程的主动性和积极性。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校的计算机、电子、自动化、通信专业的教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/黄强主编. —北京: 科学出版社, 2003

(全国高职高专规划教材)

ISBN 7-03-012021-3

I. 模… II. 黄… III. 模拟电路—电子技术 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第067938号

策划编辑: 李振格/责任编辑: 舒 立

责任印制: 吕春珉/封面设计: 一克米工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2003年8月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1—5 000 字数: 340 000

定价: 22.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

全国高职高专规划教材编委会名单

主 任 俞瑞钊

副主任 陈庆章 蒋联海 周必水 刘加海

委 员 (以姓氏笔画为序)

王 雷 王筱慧 方 程 方锦明 卢菊洪 代绍庆

吕何新 朱 炜 刘向荣 江爱民 江锦祥 孙光弟

李天真 李永平 李良财 李明钧 李益明 余根墀

汪志达 沈凤池 沈安衢 张 元 张学辉 张锦祥

张德发 陈月波 陈晓燕 邵应珍 范剑波 欧阳江林

周国民 周建阳 赵小明 胡海影 秦学礼 徐文杰

凌 彦 曹哲新 戚海燕 龚祥国 章剑林 蒋黎红

董方武 鲁俊生 谢 川 谢晓飞 楼 丰 楼程伟

鞠洪尧

秘书长 熊盛新

本书编写人员名单

主 编 黄 强

副主编 傅宝玉

撰稿人 黄 强 傅宝玉 金惠平 楼建明 余根墀 杨宝鸿

叶 刚

前 言

本书是编者在多年教学经验基础上,根据高职高专培养目标的要求,结合电子技术新的发展而编写的。它可作为高职高专院校计算机、电子、自动化、通信类专业模拟电子技术课程的教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

教材在内容安排上,以应用为目的,以“必需、够用”为度,将理论知识的讲授与学生能力的培养有机地结合起来。在加强必备的基础知识的前提下,保证内容的实用性。尽量做到深入浅出、删繁就简、重点突出。每章配有本章要点、本章小结、习题及参考答案,便于自学。

全书共8章:第1章半导体器件基础,第2章基本放大电路,第3章集成运算放大电路,第4章负反馈放大电路,第5章集成运算放大电路,第6章波形产生电路,第7章直流稳压电源,第8章晶闸管电路及其应用。

第1、2、3章为整个课程的基础部分,以介绍基本概念、基本原理以及基本分析方法为主。第4至8章为本课程的重点,是从基础知识向实际应用过渡的桥梁。本书要求学生以工程应用为目标,掌握基本应用电路的构成、特点和应用范围。

参加本书编写的有金惠平(第7章),楼建明(第6章),余根墀(第5章),杨宝鸿(第4章),叶刚(第3章),傅宝玉(第1章),黄强(第2章、第8章)。全书由黄强担任主编并负责定稿,傅宝玉担任本书副主编。

由于笔者水平有限,加之时间仓促,书中一定有不少错漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2003年7月

本书常用符号说明

一、通用符号

I, i	电流
U, u	电压
P	功率
R, r	电阻
G, g	电导
L	电感
C	电容
A	放大倍数, 增益
f	频率
ω	角频率

二、下标符号意义

i	表示输入量
o	表示输出量
s	表示信号源量
f	表示反馈量
L	负载
REF	基准值

三、电压和电流符号的规定

1. 大写斜体字母, 大写正体下标: 表示直流电压(电流)量。例如 U_{BE} 表示基极与发射极之间的直流电压。
2. 大写斜体字母, 小写正体下标: 表示交流电压(电流)的有效值。例如 U_{be} 表示基极与发射极之间交流电压的有效值。
3. 小写斜体字母, 大写正体下标: 表示含有直流电压(电流)的瞬时值。例如 u_{BE} 表示基极与发射极之间含有直流电压的瞬时值。
4. 小写斜体字母, 小写正体下标: 表示交流电压(电流)的瞬时值。例如 u_{be} 表示基极与发射极之间交流电压的瞬时值。
5. 大写斜体字母, 小写正体含 m 的下标: 表示交流电压(电流)的最大值。例如 U_{cm} 表示集电极交流电压的最大值。
6. 大写斜体字母上加黑点, 表示正弦交流电压(电流)的相量表示。例如 $\dot{U}_o$ 表示正弦交流输出电压的相量表示。
7. 大写斜体 V , 大写正体双字母下标, 表示直流电源电压。例如 V_{CC} 表示集电极直流电源电压。

四、常用符号

1. 电阻、电容

R_s	信号源内阻
R_i	输入电阻
R_o	输出电阻
R_{if}	带反馈网络的输入电阻
R_{of}	带反馈网络的输出电阻
R_{id}	差模输入电阻
R'	运放输入端的平衡电阻
R_W	电位器, 可变电阻
R_C 、 R_B 、 R_E	分别为集电极、基极、发射极外接电阻
R_L	负载电阻
C_B 、 C_E 、 C_S	分别为基极、发射极、源极旁路电容

2. 放大倍数, 增益

A_u	电压放大倍数
A_{us}	源电压放大倍数
A_{ud}	差模电压放大倍数
A_{uc}	共模电压放大倍数
A_f	闭环放大倍数
A_{uf}	闭环电压放大倍数
F	反馈系数
A_i	电流放大倍数
A_p	功率放大倍数

3. 频率

f_H	放大电路的上限频率
f_L	放大电路的下限频率
BW	通频带
f_o	谐振频率, 振荡频率
ω_o	谐振角频率, 振荡角频率

4. 功率与效率

P_o	输出功率
P_U	直流电源供给功率
P_T	管子损耗功率
η	效率
P_{CM}	集电极最大允许功耗

5. 器件参数

D	二极管
T	三极管
U_{on}	二极管开启电压
U_Z	稳压管稳定电压
I_Z	稳压管稳定电流
I_{CBO}	发射极开路, 集电极与基极间的反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路, 集电极与发射极间的穿透电流
P	P 型半导体
N	N 型半导体
r_{be}	基极与发射极间的微变电阻
β	共射电流放大倍数
g_m	跨导

6. 其他

T, t	时间, 周期, 温度
φ	相角
φ_A	放大电路相移
φ_F	反馈网络相移
K_{CMR}	共模抑制比
K	乘法器增益系数
Q	静态工作点

目 录

第 1 章 半导体器件基础.....	1
1.1 半导体的基础知识.....	1
1.1.1 本征半导体.....	1
1.1.2 杂质半导体.....	3
1.1.3 PN 结.....	4
1.2 半导体二极管.....	5
1.2.1 半导体二极管的结构.....	5
1.2.2 半导体二极管的伏安特性.....	6
1.2.3 温度对二极管特性的影响.....	7
1.2.4 半导体二极管的主要参数.....	7
1.3 稳压管及其他特殊二极管.....	8
1.3.1 稳压二极管.....	8
1.3.2 发光二极管.....	9
1.3.3 光电二极管.....	9
1.3.4 变容二极管.....	10
1.4 单相整流电路.....	10
1.4.1 单相半波整流电路.....	10
1.4.2 单相全波整流电路.....	12
1.4.3 单相桥式整流电路.....	13
1.5 滤波电路.....	15
1.5.1 电容滤波电路.....	15
1.5.2 电感滤波电路.....	17
1.5.3 π 型滤波电路.....	17
1.6 半导体三极管.....	17
1.6.1 三极管的结构.....	18
1.6.2 三极管的电流放大作用.....	19
1.6.3 三极管的特性曲线.....	21
1.6.4 三极管的主要参数.....	23
1.6.5 三极管的简化 H 参数微变等效电路.....	25
1.7 场效应管.....	27
1.7.1 结型场效应管.....	27
1.7.2 绝缘栅型场效应管.....	30
1.7.3 场效应管的主要参数及注意事项.....	33

1.7.4 场效应管的简化 H 参数微变等效电路	34
1.7.5 场效应管与普通半导体三极管的比较	35
本章小结	35
第2章 基本放大电路	41
2.1 放大电路的基本知识	41
2.1.1 放大电路的组成	41
2.1.2 放大电路的主要技术指标	41
2.2 放大电路的分析方法	44
2.2.1 直流分析方法	45
2.2.2 交流分析方法	47
2.3 三种基本形式放大电路	51
2.3.1 共发射极放大电路	51
2.3.2 共集电极放大电路	54
2.3.3 共基极放大电路	56
2.4 场效应管放大电路	58
2.4.1 自偏压共源放大电路	58
2.4.2 共漏极放大电路	59
2.5 多级放大电路	60
2.5.1 多级放大电路的组成	61
2.5.2 多级放大电路的耦合方式	61
2.5.3 多级放大电路的动态分析	63
2.6 放大电路的频率特性	64
2.6.1 低通和高通电路的频率特性	65
2.6.2 波特图	67
2.6.3 单管放大电路频率特性的定性分析	68
2.6.4 多级放大电路的频率特性	71
本章小结	72
第3章 集成运算放大电路	78
3.1 差分放大电路	78
3.1.1 直接耦合方式及其存在的问题	78
3.1.2 基本差分放大电路	79
3.1.3 实际差分放大电路	81
3.2 集成运算放大器	92
3.2.1 集成放大器概述	92
3.2.2 集成放大器的结构、电路、分类及主要参数	92
3.2.3 理想集成放大器及其分析重点	95
3.3 功率放大电路	97
3.3.1 功率放大器的特点与分类	97

3.3.2 乙类基本互补对称功率放大器.....	98
3.3.3 单电源互补对称功率放大器.....	101
3.3.4 甲乙类互补对称功率放大器.....	102
3.3.5 复合管互补对称功率放大器.....	103
本章小结.....	103
第4章 负反馈放大电路	107
4.1 反馈的基本概念与分类.....	107
4.1.1 反馈的基本概念.....	107
4.1.2 反馈放大器的分类.....	108
4.2 负反馈放大器的基本关系式.....	110
4.2.1 负反馈放大器放大倍数的一般表达式.....	110
4.2.2 使用基本关系式时的注意事项.....	111
4.3 负反馈对放大器性能的影响.....	112
4.3.1 提高放大倍数的稳定性.....	112
4.3.2 减小非线性失真.....	113
4.3.3 扩展了放大器的通频率.....	115
4.3.4 减小了放大器的内部噪声.....	116
4.3.5 负反馈对输入、输出电阻的影响.....	116
4.4 深度负反馈放大电路的近似计算.....	119
4.4.1 深度负反馈放大电路的特点及性能估算.....	119
4.4.2 电压串联负反馈电路.....	120
4.4.3 电压并联负反馈电路.....	121
4.4.4 电流并联负反馈电路.....	122
4.4.5 电流串联反馈电路.....	123
4.5 负反馈放大器实例分析.....	123
4.5.1 反馈式音调控制器.....	123
4.5.2 集成电路双前置放大器 SL30 (SL1451).....	124
本章小结.....	125
第5章 集成运算放大器的应用	129
5.1 集成运算放大器的线性应用.....	129
5.1.1 比例运算放大器.....	129
5.1.2 加减运算.....	131
5.1.3 微分与积分电路.....	133
5.1.4 有源整流电路.....	135
5.1.5 有源滤波电路.....	136
5.2 集成模拟乘法器及其应用.....	140
5.2.1 模拟乘法器的基本工作原理.....	140
5.2.2 模拟乘法器的应用.....	142

5.3 运算放大器的非线性应用	146
5.3.1 限幅器	146
5.3.2 电压比较器	147
本章小结	151
第6章 波形产生电路	156
6.1 正弦波振荡电路的组成及起振条件	156
6.1.1 正弦波振荡条件和起振条件	156
6.1.2 正弦波振荡电路的组成和分析方法	157
6.2 RC 正弦波振荡电路	159
6.2.1 RC 串并联网络的选频特性	159
6.2.2 文氏桥振荡电路分析	161
6.3 LC 正弦波振荡电路	162
6.3.1 LC 并联振荡回路的选频特性	162
6.3.2 变压器反馈式 LC 正弦波振荡器	164
6.3.3 电感三点式正弦波振荡器	165
6.3.4 电容三点式正弦波振荡器	167
6.3.5 电容反馈式改进型振荡电路	168
6.4 石英晶体振荡器	168
6.4.1 石英晶体谐振器的特性	169
6.4.2 石英晶体振荡电路	170
6.5 非正弦波发生器	171
6.5.1 矩形波发生器	172
6.5.2 锯齿波发生器	174
6.5.3 函数发生器	177
6.5.4 555 集成定时器及其应用	178
本章小结	181
第7章 直流稳压电源	186
7.1 硅稳压管稳压电路	186
7.1.1 电路组成	186
7.1.2 工作原理	187
7.1.3 硅稳压管稳压电路参数的选择	187
7.1.4 主要技术指标	188
7.2 串联型稳压电路	189
7.2.1 串联型稳压电路的工作原理	189
7.2.2 具有放大电路的串联型稳压电路	190
7.2.3 提高稳压性能的措施和保护电路	191
7.2.4 输出电压计算	192

7.3 三端集成稳压器	193
7.3.1 三端固定式集成稳压器	193
7.3.2 三端可调集成稳压器	196
7.4 开关稳压电源	197
7.4.1 开关稳压电源的特点	197
7.4.2 开关稳压电路的工作原理	197
本章小结	200
第 8 章 晶闸管及其应用电路	202
8.1 晶闸管的基本知识	202
8.1.1 晶闸管结构和等效电路	202
8.1.2 晶闸管的工作原理	203
8.1.3 晶闸管的伏安特性	204
8.1.4 晶闸管的主要参数	204
8.2 晶闸管的触发电路	205
8.2.1 单结晶体管的结构和等效电路	205
8.2.2 单结晶体管的工作原理和特性曲线	206
8.2.3 单结晶体管振荡电路	207
8.3 晶闸管应用电路	207
8.3.1 单相桥式可控整流电路	207
8.3.2 实际应用电路	211
本章小结	213
附录 A 半导体器件型号命名法	214
A.1 半导体器件型号的组成及其符号意义	214
A.2 几种半导体器件的参数选录	215
附录 B 半导体集成电路型号命名法	221
B.1 半导体集成电路型号的组成及其符号意义	221
B.2 几种常用模拟集成电路的主要参数	222
习题参考答案	224
主要参考文献	227

第 1 章 半导体器件基础

本章要点

半导体器件是电子电路中的核心元件，电子电路的功能和性能与所用的半导体器件的特性有关。本章首先介绍半导体的导电特性和 PN 结的基本特点，其次介绍半导体二极管、稳压管、其他特殊二极管的基本结构以及二极管的应用，最后介绍晶体三极管和场效应管的基本结构、工作原理、特性曲线以及主要参数，为以后学习电子技术和分析电子电路打下基础。

本章难点

半导体二极管、稳压管及其他特殊二极管和单相整流电路。

1.1 半导体的基础知识

自然界中存在着各种物质，按导电性能可划分为导体（如金、银、铜、铝等金属）、绝缘体（如橡皮、陶瓷、塑料等）和半导体三大类。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间。硅（Si）和锗（Ge）是目前制作半导体器件的主要材料。半导体之所以被人们重视，是因为它的导电性能在不同条件下有着显著的差异，它具有热敏性、光敏性和掺杂性等特点。利用光敏性可制成光电二极管和光电三极管及光敏电阻；利用热敏性可制成各种热敏电阻；利用掺杂性可制成各种不同性能、不同用途的半导体器件，例如二极管、三极管、场效应管等。

1.1.1 本征半导体

不含杂质的半导体，称为本征半导体。例如，纯净的 Si 或纯净的 Ge，都可以称为本征半导体。

物质的导电性能与它们的原子结构密切相关。

在本征半导体中，原子的排列十分整齐，形成所谓半导体晶体。以硅、锗为例，硅和锗都是四价元素，最外层原子轨道上具有 4 个电子，称为价电子。每个原子的 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，这些价电子一方面围绕自身的原子核运动，另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上。这样，相邻的原子就被共有的价电子联系在一起，称为共价键结构。如图 1.1 所示。在共价键结构中，原子中最外层的八个价电子虽被束缚在共价键中，但不像绝缘体中束缚得那样牢固，当温度升高或受光照时，价电子从外界获得一定的能量，少数价电子会挣脱共价键的束缚，成为自由电子，同时在原来共价键的相应位置上留下一个空位，这个空位称为空穴，如图 1.2 所示。

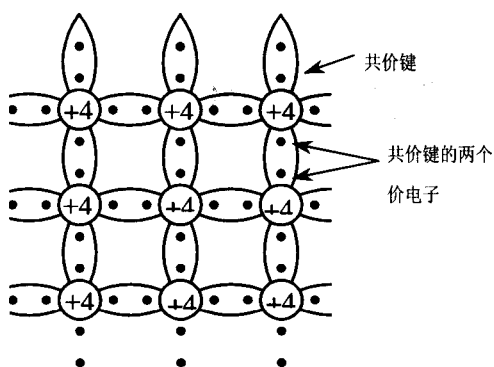


图1.1 晶体的共价键结构

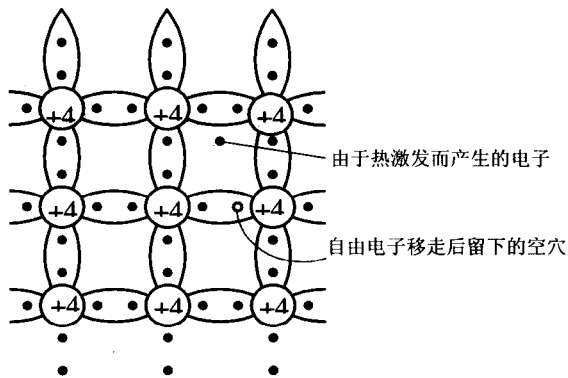


图1.2 本征激发产生电子空穴对示意图

自由电子和空穴是成对出现的，所以称它们为电子空穴对。在本征半导体中，电子与空穴的数量总是相等的。在热或光的作用下，本征半导体中产生电子空穴对的现象，称为本征激发，又称为热激发。

显然，含有空穴的原子带有正电，在外电场或其他能源的作用下，邻近的价电子极容易挣脱原子核的束缚来填补这个空穴，这时原有的空穴消失而出现了新的空穴。例如在图 1.3 中，共价键 A 处有一个空穴，若共价键 B 处的价电子填补了 A 处的空穴，结果 A 处的空穴消失，B 处却出现了空穴。这就如同是空穴从 A 处移到了 B 处。如果共价键 C 处的电子又填补了 B 处的空穴，就等于空穴又从 B 处移到了 C 处。为了区别于自由电子的运动，我们将价电子的填补运动称为空穴运动，认为空穴是一种带正电荷的载流子，它所带电荷电量和电子相等，符号相反。由此可见，本征半导体中存在两种载流子：电子和空穴。而金属导体中只有一种载流子——电子。本征半导体在外电场作用下，两种载流子的运动方向相反，形成的电流方向相同，如图 1.4 所示。

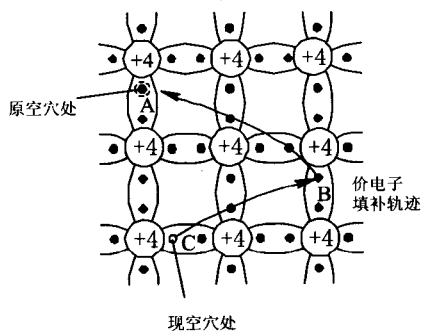


图 1.3 电子与空穴的移动

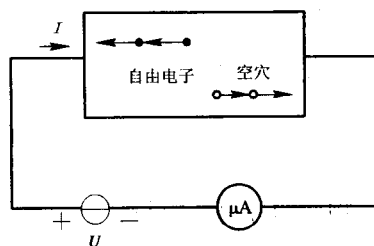


图 1.4 两种载流子在电场中的运动

半导体中同时存在着自由电子和空穴两种载流子的导电，是半导体导电方式的最大特点，也是半导体与金属导体在导电机理上的本质区别。

在室温条件下，本征半导体中载流子数目是一定的，且数量很少，故导电性能较差。但是，温度升高时，载流子数目将按指数规律增长，显然，温度对本征半导体性能影响很大。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入一些微量杂质元素，会极大地改善半导体的导电性能。这时的半导体就叫作杂质半导体。杂质半导体是制造半导体器件的基本材料。

根据掺入的杂质不同，又可将杂质半导体分为 N 型和 P 型两大类。

1. N 型半导体

如图 1.5 所示，当在本征半导体硅（或锗）中掺入微量五价元素（如磷）后，那么在杂质原子取代硅原子的位置上，便有一个多余电子处于共价键之外。室温下，这个多余的价电子就能挣脱原子核的吸引而成为自由电子，杂质原子便成为带正电的离子。

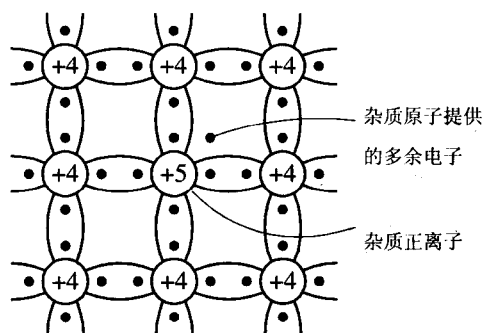


图 1.5 N 型半导体晶体结构示意图

杂质半导体中，除了杂质元素施放的自由电子之外，半导体本身还存在本征激发产生的电子-空穴对。由于增加了杂质元素施放的电子数，导致这类杂质半导体中的电子数远大于空穴数。自由电子导电成为此类杂质半导体的主要导电方式，故称它为电子型半导体，也叫 N 型半导体。

在 N 型半导体中，多数载流子（简称多子）是自由电子，而少数载流子（简称少子）是空穴。

2. P 型半导体

在硅（或锗）的晶体内掺入少量三价元素杂质，如硼（或镓）等。硼原子只有 3 个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空穴。这个空穴与本征激发产生的空穴都是载流子，具有导电性能。P 型半导体共价键结构如图 1.6 所示。

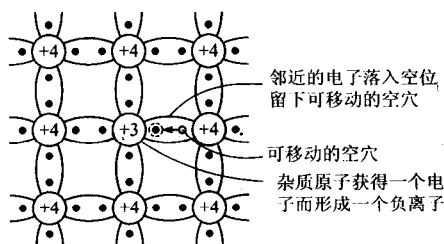


图 1.6 P 型半导体晶体结构示意图