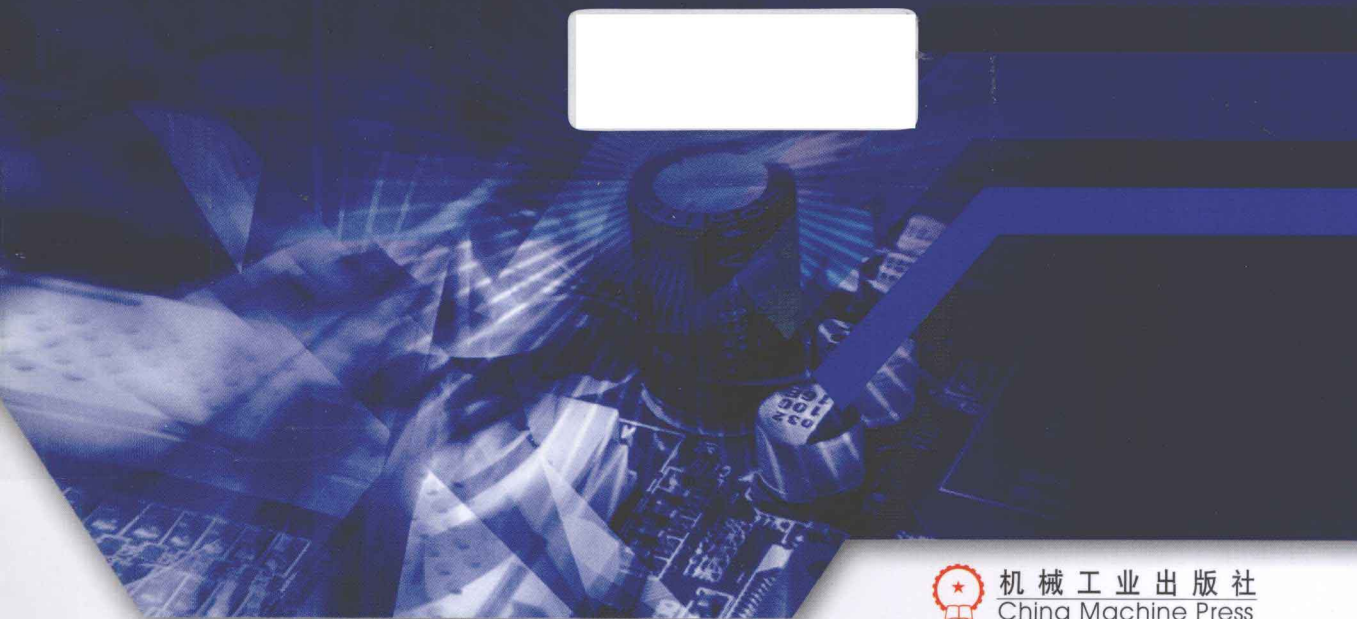
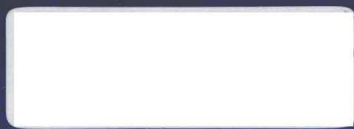


模拟电子 技术基础

第2版

黄丽亚 杨恒新 等编著



机械工业出版社
China Machine Press



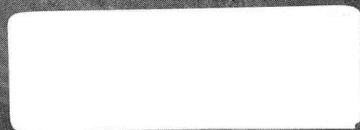
21世纪高等院校电子信息
与电气学科系列规划教材

模拟电子

技术基础

第2版

黄丽亚 杨恒新 等编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书是在总结了多年本科“电子电路”课程教学改革经验的基础上编写而成,为紧跟现代电子技术的发展和适应社会对硬件设计型人才的需求,对传统教学内容进行了较大幅度的更新,引入了电子电路的设计、有源滤波器设计软件功能及应用、电子电路仿真软件功能及应用等内容。全书共分 11 章,内容包括:半导体器件、放大电路基础、集成运算放大器、频率响应、反馈放大器、集成运算放大电路的应用、功率放大电路、直流稳压电源、电子电路仿真和集成逻辑门电路。

本书可作为高等院校电子信息类、电气类、自动化类和计算机类等各专业“模拟电子线路”或“模拟电子技术”课程的教材和教学参考书,也可作为相关工程技术人员参考书。

封底无防伪标均为盗版

版权所有,侵权必究

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础 第2版/黄丽亚等编著. —北京:机械工业出版社,2012.8
(21世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-38699-5

I. 模… II. 黄… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 172920 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:迟振春

北京瑞德印刷有限公司印刷

2012 年 9 月第 2 版第 1 次印刷

185mm×260mm·21 印张

标准书号:ISBN 987-7-111-38699-5

定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

客服热线:(010)88378991;88361066

购书热线:(010)68326294;88379649;68995259

投稿热线:(010)88379604

读者信箱:hzjsj@hzbook.com



随着信息技术的迅猛发展,培养“适应 21 世纪时代需求的、有创新能力的复合型人才”已成为当前高等院校教育工作的重点。新型的人才培养模式应以基础扎实,拓宽专业口径为着眼点,突出培养学生的科学研究能力和工程设计能力。“编写精品教材,创建精品课程”是实现新型培养模式的基本保证。为进一步配合全国高校提高教育教学质量,共享优质教学资源,推动电子电气类精品课程的建设工作,机械工业出版社华章分社将与教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员、教学名师和知名教授一起建设“高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”,从高校的教学改革出发,在对电子电气类课程的课程体系和教学内容深入研讨的基础上,建设具有先进性、创新性、实用性的精品教材和教学资源体系,使该系列教材成为“立足专业规范,面向新需求,成就高质量”的精品。

该系列教材的出版以新的教改精神和人才培养模式作为指导,这样不仅能够保证教材质量,而且有利于促进学科的发展。根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求、学科发展和人才培养的目标”,确定教材特色如下:

- 教材的编写要以教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求”为依据,以培养满足国家和社会需要的高素质人才为目标,系统整合教学改革成果,使教材结构体系具有渐进性,体现教学规律和学生的认识规律,使教材的结构完整,内容具有系统性、科学性和准确性,理论阐述严谨、正确。
- 教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性,利于培养学生的科学思维能力;根据教学内容、学时、教学大纲的要求,优化知识结构,充分体现新知识、新技术、新工艺、新成果;既要加强基础理论,也要强化实践内容;理论的阐述、实验内容和习题的选取都应紧密联系实际,使学生做到运用理论处理实际问题,培养学生分析问题和解决问题的能力。

为做好该系列教材的出版工作,我们聘请了东南大学王志功教授为编审委员会顾问,天津大学孙雨耕教授为编审委员会主任,以及清华大学、北京大学、浙江大学、上海交通大学、电子科技大学、华中科技大学、西安电子科技大学、北京邮电大学、吉林大学等国内重点大学的教授为编审委员会副主任委员和委员,从根本上保证了教材的质量。我们将在今后的出版工作中广泛征询和听取一线教师的反馈意见和建议,逐步改进和完善该系列教材,积极推动高等院校教学改革和教材建设。

本教材依据教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会颁布的“电子线路(I)”课程教学基本要求,结合多年教学和实践经验编写而成。在内容安排上,尽量做到思路清晰、叙述详尽,并突出电路的设计方法,以达到引导学生思考、激发学生创新的目的。

本教材具有以下特点:

- 精选内容,突出重点,强化三基。以分立元件电路为基础,以集成电路为重点,强调概念的物理本质和含义,把基本概念、基本原理和基本分析方法讲述深刻、透彻。
- 注重培养电路设计能力。电子电路(包括模拟电路和数字电路)的教学必须以分析为基础,以设计为主导,只有通过电路设计才能真正掌握电子电路这门技术,这是关于电子电路教学的一个共识。电子电路理论的价值,主要体现在它能够解决生产实际中的需要。各种实际的需要通过电路设计来满足,换言之,在电子电路领域,技术人员面对的主要是电路设计问题,电路的分析只是设计工作的一部分。所以电子电路理论的深化必须以电路设计为主导,这是贯穿本书的基本指导思想。在这一思想的指导下,本书面向实际需要,理论联系实际,增加相关的设计实例,通俗易懂地介绍模拟电路的设计方法。
- 加强电子电路工程性的认识。在电路设计过程中往往对一些模型和计算公式进行简化,有时还必须做出某些假设,一些参数的取值不是依照公式而是根据经验,这些都体现了电子电路理论的工程性特点。电子电路理论教学中,比较强调理论的系统性和严密性,较少涉及电子电路的工程性,学生对这一特点往往认识不足。本教材在介绍电路的设计方法时对相关的工程性问题进行了详细的说明。
- 加强模拟电子新技术的介绍。EDA技术已极大地影响了模拟电子电路分析、设计的方法和手段,本教材引入了有源滤波器设计软件 FilterPro 的功能和应用、电子电路仿真软件 Multisim 的功能及其应用。
- 注重模拟电路与数字电路教学内容的衔接,将集成门电路内容纳入模拟电路部分。

本书第1~6章由黄丽亚执笔,第7~11章由杨恒新执笔。另外,张苏参与编写了静态工作点、噪声和负反馈的稳定性方面的部分内容,参与本课程教学的赵华、王伟、车晶、何艳、曹开田、袁丰、周洪敏、方承志、张瑛、朱莉娟、杨华、何涛、张晶和杨浩等为本书的编写提出了宝贵的意见。编者在此一并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,对于书中的错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2012年6月

教学建议

INSTRUCTOR'S MANUAL

章次	学习要点	教学要求	参考课时 (不包括实验 和机动学时)
1	介绍半导体物理基础知识、PN 结和二极 管及其基本电路	重点内容：二极管的特性、二极管基本电路	4
2	介绍晶体管的工作原理、特性曲线， 放大电路的放大原理、静态动态分析和 多级放大电路的性能指标计算	重点内容：双极型晶体管的工作原理、特性 和参数、大信号和小信号模型；晶体管基本放 大器的组成、工作原理及性能特点；静态工作 点的基本概念和偏置电路的估算；图解分析方 法和小信号等效电路分析方法，掌握动态参数 ($\dot{A}_u$ 、 R_i 、 R_o 、 U_{om})的分析方法	14
3	介绍场效应管的工作原理及其基本放 大电路	重点内容：场效应管的外部特性、主要参数； 场效应管基本放大电路的组成、工作原理及性 能特点；放大电路静态工作点和动态参数($\dot{A}_u$ 、 R_i 、 R_o 、 U_{om})的分析方法	4
4	介绍放大电路频率响应的基本概念，晶体 管、场效应管和多级放大电路的频率响应， 放大电路的噪声	重点内容：放大电路频率响应的基本概念，放大 器的低频、中频和高频等效电路，晶体管频率参 数、共射电路频率响应特性；单管放大电路频率响 应的分析方法；波特图的概念及画法	6
5	介绍集成放大电路的内部电路结构，包括 电流源电路、差动电路、复合管放大电路、 输出级电路，还介绍了集成运算放大器的基 础应用电路	重点内容：电流源电路、差动电路的工作原理和 特性，集成运算放大电路的基础应用电路	8
6	介绍负反馈放大电路的基本概念、基本方 程和组态，负反馈对放大电路的影响以及深 负反馈下放大电路的近似计算，最后介绍了 负反馈放大电路的稳定性	重点内容：反馈的基本概念和反馈类型的判断方 法；深度负反馈条件下放大电路的近似估算法；负 反馈对放大电路性能的影响	10
7	介绍集成运算放大器在线性系统和非线性 系统中的典型应用，包括模拟信号的基本运 算、电压比较器、弛张振荡器、精密二极管 电路、有源滤波器	重点内容：比例运算、求和运算、电压比较器、 弛张振荡器、有源滤波器的功能分析及其设计	6
8	介绍功率放大电路的特点，典型电路的结 构、工作原理及性能参数，常见的集成功率 放大器及功率器件	重点内容：互补推挽乙类功率放大电路的工作原 理和主要性能参数	3
9	介绍整流、滤波、串联稳压电路的工作原 理，典型单片集成稳压器的功能及其应用，同 时简要介绍开关型集成稳压器的基本原理	重点内容：整流、滤波、串联稳压电路的原理、 性能参数和设计方法	3
10	介绍 Multisim 11 的功能及应用	重点内容：Multisim 11 在模拟电子电路静态、动 态性能参数分析中的应用	2
11	介绍双极型晶体管和 MOS 管的开关特性， 讨论 TTL 门电路和 CMOS 门电路的工作原 理、逻辑功能特性及电气特性，特别是输入 特性和输出特性	重点内容：TTL 门电路和 CMOS 门电路的工作原 理、电气特性	4

模拟电子技术常用符号

1. 基本符号

$U、u$	电压
$I、i$	电流
$P、p$	功率
$R、r$	电阻
$G、g$	电导
$X、x$	电抗
$B、b$	电纳
$Z、z$	阻抗
$Y、y$	导纳
C	电容
L	电感
$F、f$	频率
$\Omega、\omega$	角频率
$S = \sigma + j\omega$	复频率
BW	通频带
T	温度、周期
η	效率
τ	时间常数
φ	相位角

2. 电流和电压

I_B	大写字母、大写下标, 表示直流量
i_B	小写字母、大写下标, 表示包含直流量的瞬时总量
I_b	大写字母、小写下标, 表示正弦交流量有效值
i_b	小写字母、小写下标, 表示交流量瞬时值
I_{BQ}	工作点处直流量(静态量)
I_{bm}	正弦交流量振幅值
$\dot{I}_b$	交流复数值
ΔI_B	直流变化量
Δi_B	瞬时值的变化量
$\dot{I}_f、\dot{U}_f$	交流反馈电流、电压复数值
$\dot{I}_i、\dot{U}_i$	交流输入电流、电压复数值

$\dot{I}_o$ 、 $\dot{U}_o$
 $\dot{U}_s$
 I_R 、 U_R 或 I_{REF} 、 U_{REF}
 u_+
 u_-
 u_{ic}
 u_{id}
 Δu_{ic}
 Δu_{id}
 U_{TH} 、 U_{TL}
 U_{OH}
 U_{OL}
 U_{BB}
 U_{CC}
 U_{EE}
 U_{DD}
 U_{SS}

3. 功率

 P_i
 P_o
 P_{om}
 P_T
 P_E

4. 频率

 f_H
 f_L
 f_p
 f_o

5. 电阻

 R_i
 R_o
 R_s
 R_{if}
 R_{of}
 R_L
 R_N
 R_p

6. 放大倍数、增益

 A
 A_{uc}
 A_{ud}
 $\dot{A}_u$
 A_{u1}

交流输出电流、电压复数值

交流源电压复数值

参考电流、电压

集成运放同相输入电压

集成运放反相输入电压

共模输入电压

差模输入电压

共模输入电压变化量

差模输入电压变化量

电压比较器的阈值电压

电压比较器的输出高电平

电压比较器的输出低电平

基极回路电源电压

集电极回路电源电压

发射极回路电源电压

漏极回路电源电压

源极回路电源电压

输入交流功率

输出交流功率

最大输出交流功率

晶体管耗散功率

直流电源供给功率

放大电路的上限截止频率

放大电路的下限截止频率

滤波电路的截止频率

电路的振荡频率

放大电路的输入电阻

放大电路的输出电阻

信号源内阻

负反馈放大电路的输入电阻

负反馈放大电路的输出电阻

负载电阻

集成运放反相输入端外接的等效电阻

集成运放同相输入端外接的等效电阻

放大倍数或增益

共模电压放大倍数

差模电压放大倍数

电压放大倍数的复数值

中频电压放大倍数

$\dot{A}_{us}$
 F

7. 半导体和 PN 结

 C_T
 C_D
 C_j
 N
 n
 n_{p0}
 P
 p
 U_B
 U_T

8. 二极管

 V 、 VD
 D_z
 i_D
 I_{FM}
 I_F
 I_R
 I_S
 r_D
 r_z
 $U_{D(on)}$
 U_{BR}
 U_Z

9. 双极型晶体管

 V 、 VT
 E 、 e
 B 、 b
 C 、 c
 $C_{b'c}$
 $C_{b'e}$
 f_β
 f_α
 f_T
 g_m
 h_{ie} 、 h_{fe} 、 h_{re} 、 h_{oe}
 I_{CBO}
 I_{CEO}
 I_{CM}
 P_{CM}
 $r_{bb'}$

源电压放大倍数的复数值

反馈系数通用符号

势垒电容

扩散电容

结电容

N 型半导体

电子浓度

PN 结 P 区达到动态平衡时的电子浓度

P 型半导体

空穴浓度

PN 结平衡时的内建电位差

温度的电压当量

二极管

稳压二极管

二极管的电流

二极管的最大整流平均电流

二极管的正偏电流

二极管的反偏电流

二极管的反向饱和电流

二极管导通时的动态电阻

稳压管工作在稳压状态下的动态电阻

二极管的开启电压

二极管的击穿电压

稳压管的稳压电压

双极型晶体管

发射极

基极

集电极

混合 π 等效电路中集电结的等效电容

混合 π 等效电路中发射结的等效电容

晶体管共射接法电流放大系数的上限截止频率

晶体管共基接法电流放大系数的上限截止频率

晶体管的特征频率

跨导

晶体管共射 H 参数模型的 4 个参数

发射极开路时集电结反向饱和电流

基极开路时 c-e 间的穿透电流

集电极最大允许电流

集电极最大允许耗散功率

基区体电阻

$r_{b'e}$ $U_{(BR)CBO}$ $U_{(BR)CEO}$ U_{CES} $U_{BE(on)}$ U_A α $\bar{\alpha}$ β $\bar{\beta}$

10. 单极型晶体管

 V 、 V_T D 、 d G 、 g S 、 s C_{ds} C_{gs} C_{gd} g_m I_D I_{DSS} I_S P_{DM} r_{ds} $U_{GS(off)}$ $U_{GS(th)}$

11. 集成运放

 A A_{ud} dI_{IO}/dT dU_{IO}/dT BW_G I_{IB} I_{IO} U_{IO} K_{CMR} r_{id} S_R

12. 其他符号

 Q S_r $G \cdot BW$ K

发射结微变等效电阻

发射极开路时 $b-c$ 间的反向击穿电压基极开路时 $c-e$ 间的反向击穿电压

晶体管饱和压降

晶体管 $b-e$ 间的开启电压

厄尔利电压

晶体管共基交流电流放大倍数

晶体管共基直流电流放大倍数

晶体管共射交流电流放大倍数

晶体管共射直流电流放大倍数

单极型晶体管

漏极

栅极

源极

 $d-s$ 间等效电容 $g-s$ 间等效电容 $g-d$ 间等效电容

跨导

漏极电流

结型场效应管、耗尽型场效应管 $U_{GS}=0$ 时的漏极电流

场效应管的源极电流

漏极最大允许耗散功率

 $d-s$ 间的微变等效电阻

结型场效应管、耗尽型场效应管的夹断电压

增强型 MOS 管的开启电压

集成运放

开环差模电压增益

 I_{IO} 的温漂 U_{IO} 的温漂

单位增益带宽

输入偏置电流

输入失调电流

输入失调电压

共模抑制比

差模输入电阻

转换速率

静态工作点

稳压电路中的稳压系数

增益带宽积

热力学温度的单位

出版说明
编审委员会
前言
教学建议
模拟电子技术常用符号

第1章 半导体二极管及其应用 1

- 1.1 半导体物理基础知识 1
 - 1.1.1 本征半导体 1
 - 1.1.2 杂质半导体 3
- 1.2 PN 结 4
 - 1.2.1 PN 结的形成 4
 - 1.2.2 PN 结的单向导电性 5
 - 1.2.3 PN 结的反向击穿特性 7
 - 1.2.4 PN 结的电容特性 8
- 1.3 半导体二极管及其基本电路 8
 - 1.3.1 半导体二极管的伏安特性曲线 9
 - 1.3.2 半导体二极管的主要参数 10
 - 1.3.3 半导体二极管的电路模型 11
 - 1.3.4 二极管基本应用电路 12
- 1.4 特殊二极管 15
 - 1.4.1 稳压二极管 15
 - 1.4.2 变容二极管 17
 - 1.4.3 光电二极管 17
 - 1.4.4 发光二极管 17
- 思考题 18
- 习题 18

第2章 双极型晶体管及其放大电路 21

- 2.1 双极型晶体管的工作原理 21
 - 2.1.1 双极型晶体管的结构 21
 - 2.1.2 双极型晶体管的工作原理 22

- 2.2 晶体管的特性曲线 24
 - 2.2.1 共射极输出特性曲线 24
 - 2.2.2 共射极输入特性曲线 26
 - 2.2.3 温度对晶体管特性的影响 27
 - 2.2.4 晶体管的主要参数 27
- 2.3 晶体管放大电路的放大原理 28
 - 2.3.1 放大电路的组成 28
 - 2.3.2 静态工作点的作用 29
 - 2.3.3 晶体管放大电路的放大原理 30
 - 2.3.4 基本放大电路的组成原则 30
 - 2.3.5 直流通路和交流通路 31
- 2.4 放大电路的静态分析和设计 31
 - 2.4.1 晶体管的直流模型及静态工作点的估算 31
 - 2.4.2 静态工作点的图解分析法 32
 - 2.4.3 晶体管工作状态的判断方法 33
 - 2.4.4 放大状态下的直流偏置电路 35
- 2.5 共射放大电路的动态分析和设计 37
 - 2.5.1 交流图解分析法 38
 - 2.5.2 放大电路的动态范围和非线性失真 39
 - 2.5.3 晶体管的交流小信号模型 41
 - 2.5.4 等效电路法分析共射放大电路 44
 - 2.5.5 共射放大电路的设计实例 47
- 2.6 共集放大电路(射极输出器) 50
- 2.7 共基放大电路 52

2.8 多级放大电路	54	4.4.1 场效应管的高频小信号 等效电路	101
2.8.1 级间耦合方式	54	4.4.2 共源放大电路的频率 响应	102
2.8.2 多级放大电路的性能 指标计算	56	4.5 多级放大器的频率响应	103
2.8.3 常见的组合放大电路	58	4.5.1 多级放大电路的上限 频率	104
思考题	60	4.5.2 多级放大电路的下限 频率	104
习题	60	4.6 放大电路的噪声	107
第3章 场效应晶体管及其放大电路	70	4.6.1 电子元件的噪声	107
3.1 场效应晶体管	70	4.6.2 噪声的度量	108
3.1.1 结型场效应管	70	思考题	110
3.1.2 绝缘栅场效应管	73	习题	110
3.1.3 场效应管的参数	77	第5章 集成运算放大电路	114
3.2 场效应管工作状态分析及其 偏置电路	78	5.1 集成运算放大电路的特点	114
3.2.1 场效应管工作状态分析	78	5.2 电流源电路	115
3.2.2 场效应管的偏置电路	79	5.3 以电流源为有源负载的放大 电路	118
3.3 场效应管放大电路	81	5.4 差动放大电路	119
3.3.1 场效应管的低频小信号 模型	81	5.4.1 零点漂移现象	119
3.3.2 共源放大电路	81	5.4.2 差动放大电路的工作原理 及性能分析	120
3.3.3 共漏放大电路	83	5.4.3 具有电流源的差动放大 电路	127
思考题	84	5.4.4 差动放大电路的大信号 分析	128
习题	85	5.4.5 差动放大电路的失调和 温漂	131
第4章 放大电路的频率响应和噪声	88	5.5 复合管及其放大电路	133
4.1 放大电路的频率响应和频率 失真	88	5.6 集成运算放大电路的输出级 电路	135
4.1.1 放大电路的幅频响应和 幅频失真	89	5.7 集成运算放大电路举例	136
4.1.2 放大电路的相频响应和 相频失真	90	5.7.1 双极型集成运算放大电路 F007	136
4.1.3 波特图	91	5.7.2 CMOS 集成运算放大电路 MC14573	138
4.2 晶体管的高频小信号模型和 高频参数	93	5.8 集成运算放大电路的外部特性 及其理想化	139
4.2.1 晶体管的高频小信号 模型	93	5.8.1 集成运放的模型	139
4.2.2 晶体管的高频参数	93	5.8.2 集成运放的主要性能 指标	140
4.3 晶体管放大电路的频率响应	95	5.8.3 理想集成运算放大电路	141
4.3.1 共射放大电路的频率 响应	96		
4.3.2 共基、共集放大器的 频率响应	101		
4.4 场效应管放大电路的频率响应	101		

思考题	142	7.2.1 电压比较器概述	191
习题	142	7.2.2 单门限比较器	192
第6章 反馈	148	7.2.3 迟滞比较器	194
6.1 反馈的基本概念及类型	148	7.2.4 窗口比较器	195
6.1.1 反馈的概念	148	7.3 弛张振荡器	195
6.1.2 反馈放大电路的基本 框图	149	7.4 精密二极管电路	197
6.1.3 负反馈放大电路的基本 方程	150	7.4.1 精密整流电路	197
6.1.4 负反馈放大电路的组态和 四种基本类型	151	7.4.2 最大值检测电路	199
6.2 负反馈对放大电路性能的 影响	157	7.5 有源滤波器	199
6.2.1 稳定放大倍数	157	7.5.1 滤波电路的作用与分类	199
6.2.2 展宽通频带	157	7.5.2 一阶有源滤波器	200
6.2.3 减小非线性失真	158	7.5.3 二阶有源滤波器	203
6.2.4 减少反馈环内的干扰和 噪声	159	7.5.4 开关电容滤波器	209
6.2.5 改变输入电阻和输出 电阻	160	7.5.5 滤波器设计软件简介	211
6.3 深度负反馈放大电路的近似 计算	162	思考题	215
6.3.1 深负反馈放大电路近似 计算的一般方法	163	习题	215
6.3.2 深负反馈放大电路的 近似计算	163	第8章 功率放大电路	222
6.4 负反馈放大电路的稳定性	167	8.1 功率放大电路的特点与分类	222
6.4.1 负反馈放大电路的自激 振荡	167	8.2 甲类功率放大电路	223
6.4.2 负反馈放大电路稳定性的 判断	168	8.3 互补推挽乙类功率放大电路	225
6.4.3 负反馈放大电路自激振荡 的消除方法	171	8.3.1 双电源互补推挽乙类功率 放大电路	225
思考题	176	8.3.2 单电源互补推挽乙类功率 放大电路	231
习题	176	8.3.3 采用复合管的准互补推挽 功率放大电路	232
第7章 集成运算放大器的应用	183	8.4 集成功率放大器	233
7.1 基本运算电路	183	8.5 功率器件	235
7.1.1 比例运算电路	183	8.5.1 双极型大功率晶体管	235
7.1.2 求和运算电路	185	8.5.2 功率 MOS 器件	237
7.1.3 积分和微分运算电路	188	8.5.3 绝缘栅-双极型功率管 及功率模块	239
7.1.4 对数和反对数运算电路	189	8.5.4 功率管的保护	240
7.2 电压比较器	191	思考题	241
		习题	241
		第9章 直流稳压电源	245
		9.1 直流电源的组成	245
		9.2 整流电路	246
		9.2.1 单相半波整流电路	246
		9.2.2 单相全波整流电路	247
		9.2.3 单相桥式整流电路	248
		9.2.4 倍压整流电路	249

9.3 滤波电路	251	11.2 MOS 管的开关特性	292
9.3.1 电容滤波电路	251	11.3 TTL 门电路	293
9.3.2 电感滤波电路	253	11.3.1 TTL 标准系列与非门 ...	293
9.3.3 复合型滤波电路	254	11.3.2 其他类型的 TTL 标准 系列门电路	301
9.4 稳压电路	254	11.3.3 TTL 其他系列门电路 ...	306
9.4.1 稳压电路的主要参数	254	11.4 ECL 门电路简介	307
9.4.2 线性串联型直流稳压电路 ...	255	11.5 CMOS 门	308
9.4.3 开关型直流稳压电路	261	11.5.1 CMOS 反相器	308
思考题	265	11.5.2 其他类型的 CMOS 电路	310
习题	265	11.5.3 使用 CMOS 集成电路的 注意事项	312
第 10 章 电子电路仿真软件	268	11.5.4 CMOS 其他系列门 电路	312
10.1 Multisim 11 的基本界面	268	11.6 CMOS 电路与 TTL 电路的 连接	314
10.2 元件库	271	思考题	315
10.3 仿真仪器	279	习题	316
10.4 仿真分析方法	281		
10.5 在模拟电子技术中的应用	283		
思考题	289		
习题	289		
第 11 章 集成逻辑门电路	291	参考文献	320
11.1 双极型晶体管的开关特性	291		

半导体二极管及其应用

1.1 半导体物理基础知识

在物理学中,按照材料导电的能力,可以将它们分为导体和绝缘体两大类。导体中有大量的自由电子,加上电场后,自由电子运动,形成电流,因此,导体的电阻率很小($\rho < 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$),导电能力很强,如铜、铁、铝、银等。绝缘体中自由电子很少,加上电场后,几乎没有电流形成,因此,它的电阻率很大,导电能力很差($\rho > 10^9 \Omega \cdot \text{m}$),如塑料、陶瓷、石英、橡胶等。

除这两类外,还有一种导电能力介于两者之间的物质,我们称之为半导体,如硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。由于半导体具有一些独特的物理特性,使得它在电子技术领域发挥着极其巨大的作用。目前的集成电路就主要以硅晶体为基本材料,美国的半导体生产基地“硅谷”也是由此而得名(目前“硅谷”的含义已扩展为以微电子技术为先导的科技园)。本节将从半导体材料的基本性质出发,学习半导体器件的基本原理和特性。

1.1.1 本征半导体

1. 本征半导体硅和锗的共价键结构

常用的半导体材料硅和锗的原子序号分别为 14 和 32,相应的原子结构如图 1.1.1a、b 所示,它们的最外层电子都是 4 个。最外层电子受原子核的束缚力最小,决定着物质的化学性质和导电能力,称之为价电子。为了突出价电子的作用,研究半导体导电性能时,常采用图 1.1.1c 所示的简化模型表示半导体材料,其中四个点表示最外层的四个价电子,中间的圆圈表示半导体原子核,圈中的数字 +4 表示中和最外层价电子应具有的内层电子。

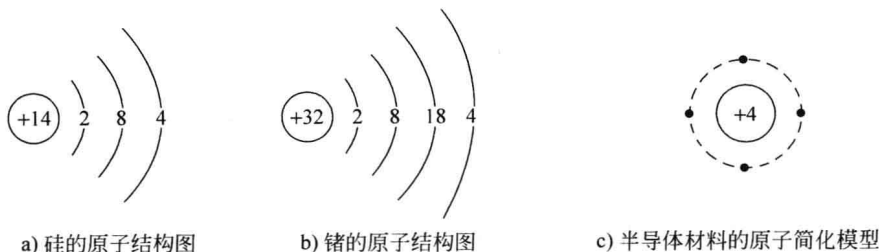


图 1.1.1 常用半导体材料的原子结构和简化模型

纯净的单晶半导体称为**本征半导体**。在本征硅和锗的单晶中，原子按一定间隔排列成有规律的空间点阵(称为晶格)。由于原子间相距很近，价电子不仅受到自身原子核的约束，还要受到相邻原子核的吸引，使得每个价电子为相邻原子所共有，形成共用电子对，称为**共价键**。这样四个价电子与相邻的四个原子中的价电子分别组成四对共价键，依靠共价键使晶体中的原子紧密地结合在一起。图 1.1.2 是单晶硅或锗的共价键结构的平面示意图。

2. 半导体中的两种载流子

在绝对零度 $T=0\text{K}(-273.15^{\circ}\text{C})$ 时，价电子没有能力脱离共价键的束缚，形成能够自由移动的带电粒子，我们把这种粒子称为**载流子**。这时的本征半导体是良好的绝缘体，但是半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中束缚得那样紧，只需在室温(300K)下，价电子就会获得足够的随机热振动能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子。这些自由电子很容易在晶体中运动，在外加电压的作用下，就会形成电流，因此自由电子是半导体的一种载流子。

当价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时，共价键中就留下了一个空位，这个空位被称为**空穴**。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。由于空穴处失去一个电子，使得该处所属原子核多了一个未被抵消的正电荷，因此可将空穴看成是一个带正电荷的粒子。由于共价键中出现了空穴，相邻共价键的价电子在正电荷的吸引下会填补这个空位，而在其原有的位置上产生一个空穴。依此类推，空穴便可在整个晶体内自由移动，如图 1.1.3 所示。当有电场作用时，价电子定向地填补空位，使空穴做相反方向的移动，这种空穴移动等效于带正电荷的粒子做定向运动，也可以形成电流。

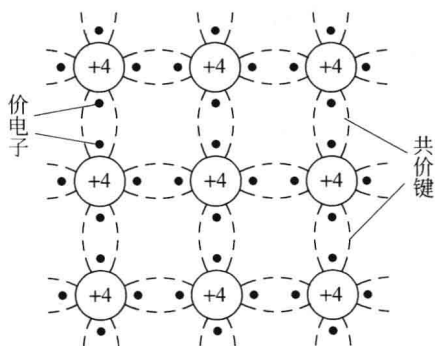


图 1.1.2 单晶硅和锗的共价键结构示意图

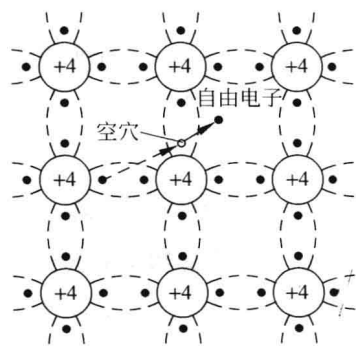


图 1.1.3 本征激发产生电子空穴对示意图

可见，本征半导体中有两种载流子：自由电子和空穴，两者都可以参与导电，所不同的是，电子带负电而空穴带正电，在电场作用下的运动方向相反。空穴与自由电子总是成对出现，因此称为**电子-空穴对**。从宏观上看，自由电子和空穴的数量相等，晶体仍然是电中性的。

上述本征半导体受外界能量(热能、电能和光能等)激发，产生电子、空穴对的过程称为**本征激发**。由于本征激发，不断地产生电子-空穴对，使载流子浓度增加。另一方面，由于正负电荷相吸引，会使电子和空穴在运动过程中相遇。这时电子填入空穴成为价电子，同时释放出相应的能量，从而消失一对电子、空穴，这一过程称为**复合**。显然，载流子浓度越大，复合的机会就越多。这样在一定温度下，当没有其他能量存在时，电子-空穴对的产生与复合最终会达到一种热平衡状态，使本征半导体中载流子的浓度一定。既然存在载流子，那么在电场作用下，本征半导体的导电能力如何？

如果用 n_i 、 p_i 分别表示电子和空穴的浓度, 理论分析表明, 在室温下本征硅的载流子浓度 $n_i = p_i = 1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 这看上去是一个很大的数值, 但与硅的原子密度 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 相比, 室温下只有约三万亿分之一的价电子受激发产生电子-空穴对。因此, 本征半导体的导电能力是很弱的。另外值得注意的是, 本征载流子浓度随温度升高近似呈指数规律增大, 所以其导电性能对温度的变化很敏感。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中, 有选择地掺入少量其他元素, 会使其导电性能发生显著变化。这些少量元素统称为杂质。掺入杂质的半导体称为**杂质半导体**, 根据掺入的杂质不同, 有 N 型半导体和 P 型半导体两种。

1. N 型半导体

在本征硅(或锗)中掺入少量的五价元素, 如磷、砷、锑等, 就得到**N 型半导体**。这时杂质原子替代了晶格中的某些硅原子, 它的四个价电子和周围四个硅原子组成共价键, 而多出一个价电子只能位于共价键之外, 如图 1.1.4 所示。由于这个键外电子受杂质原子的束缚力很弱, 所以只需很小的能量便可挣脱杂质原子的束缚, 成为自由电子。因此, 室温下几乎每个杂质原子都能提供一个自由电子, 从而使 N 型半导体中的电子数大大增加。因为这种杂质原子能“施舍”出一个电子, 所以称为**施主原子**(或施主杂质)。施主原子失去一个价电子后, 便成为正离子, 称为**施主正离子**。由于施主离子被束缚在晶格中, 不能自由移动, 所以不能参与导电。

在这种杂质半导体中, 不但有杂质电离产生的自由电子, 而且还有本征激发产生的电子-空穴对, 由于掺杂浓度远远大于本征激发的载流子浓度, 因此自由电子的数量比空穴大得多, 故称自由电子为**多数载流子**, 简称**多子**, 而空穴占少数, 称为**少数载流子**, 简称**少子**。应当指出, 在 N 型半导体中, 虽然自由电子数远大于空穴数, 但由于施主离子的存在, 使正、负电荷数相等, 即自由电子数等于空穴数加正离子数, 所以整个半导体仍然是电中性的。

2. P 型半导体

在本征硅(或锗)中掺入少量的三价元素, 如硼、铝、镓等, 就得到**P 型半导体**。这时杂质原子替代了晶格中的某些硅原子, 它的三个价电子和相邻的四个硅原子组成共价键时, 只有三个共价键是完整的, 第四个共价键因缺少一个价电子而出现一个空位, 如图 1.1.5 所示。由于空位的存在, 使邻近共价键内的电子只需很小的激发就能填补这个空位, 使杂质原

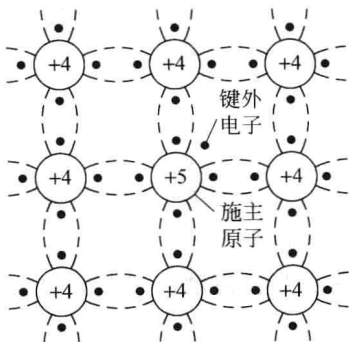


图 1.1.4 N 型半导体原子结构示意图

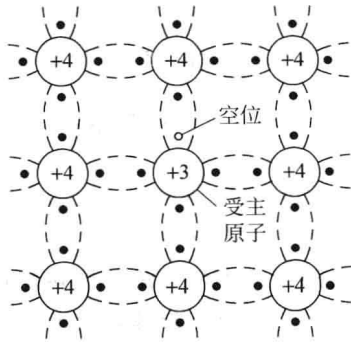


图 1.1.5 P 型半导体原子结构示意图