



普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材

模拟电子技术基础

天津大学电子技术课程组 编
任英玉 主编



Fundamentals of
Analog Electronic Technology



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育

基础课程规划教材

模拟电子技术基础

天津大学电子技术课程组 编

任英玉 主编

本书在每节后面都安排有小节习题，其中有的是复习性习题，有的是思考性习题，旨在帮助学生加深对重要概念的理解。每章后的习题题型多样，数量适中，旨在培养学生解决实际问题的能力。本书可作为高等院校电子信息类专业及相关专业的教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书在编写过程中，得到了天津大学电子技术课程组各位老师的大力支持，在此表示衷心的感谢。由于编者水平和时间所限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

机械工业出版社

地址：北京市西城区百万庄大街24号
邮编：100037
电话：(010) 68995100
网址：www.cmpbook.com

本书是编者根据多年的课堂教学实践和课程组教学改革的经验编写而成的。本书系统地介绍了模拟电子技术的基本内容，全书共分9章，包括：半导体二极管及其应用电路、双极型晶体管及其放大电路、场效应管及其放大电路、功率放大电路、集成运算放大器及其单元电路、负反馈放大电路、集成运算放大器的应用、信号产生电路、直流稳压电源。每节末都有小结和复习思考题，并附有工程应用案例、Multisim 仿真举例。每章习题后附有本章的自测题，便于读者检查学习效果。

本书可以作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、生物医学工程、电子信息工程、测控技术及仪器等相关专业的本科生教材和教学参考书，也可作为从事电子技术工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/任英玉主编. —北京: 机械工业出版社, 2017. 8
普通高等教育“十三五”电工电子基础课程规划教材
ISBN 978-7-111-57052-3

I. ①模… II. ①任… 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 (2017) 第 130265 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王雅新 责任编辑: 王雅新 路乙达

责任校对: 刘志文 封面设计: 张 静

责任印制: 李 昂

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2017 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 23.75 印张 · 580 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-57052-3

定价: 52.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649 机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

“模拟电子技术基础”是高等学校电气、自动化、计算机及电子信息类专业一门重要的专业基础课，是研究电子器件、电子电路及其相关应用的技术科学，是培养学生建立工程思想及工程思维的关键课程。

本书注重电子技术的基本概念和基本原理，适当扩充了教材的深度和广度，并总结多年的教学实践经验编写而成。本书重点突出、结构严谨、深入浅出，力求简明扼要、内容系统，突出课程的工程应用性，利用大量例题引导学生掌握各种分析方法，还增加了计算机仿真举例。本书广泛参考国内外优秀教材，在编写过程中侧重考虑了以下几点：

1. 注重知识点的总结与梳理

本书在每节后面都安排有小结和复习思考题，以便帮助学生充分、及时地复习和思考，其中有的是复习性问题，有的是思考性问题。对于思考性问题，应该认真思考，以便更加深刻地理解一些重要的概念。每章后的习题题型多样，涵盖量大，后面附有本章的自测题，供学生在学完一章后做自我测试之用。

2. 突出应用，渗透工程意识，体现系统性和工程应用性的特点

本书编排遵循“先器件后电路，先基本原理电路后应用电路”的原则，体现了模拟电子系统由器件→电路→电子系统的特点。同时介绍了一些工程应用实例，既具有启发性，又具有实践性，提高学生对所学知识的综合应用能力。

3. 增加了计算机辅助分析与设计的内容

在各章中引入了 Multisim 仿真题目，不但可以加深对所学内容的理解，还可以培养学生多渠道学习的习惯与能力，对进一步深入研究电子电路的分析和设计，引导学生学以致用，有着重要意义。

本书共分9章。其中任英玉负责编写第1、2、5、6、7、8章，王萍负责编写第3章，范娟负责编写第4章，李斌负责编写第9章，韩涛负责编写第1、2章习题，魏纪东负责编写第5、6章习题，吕伟杰负责编写第7、8章习题，孙彪参与部分章节的习题编写工作。本书由任英玉任主编，负责全书的组织、修改与定稿工作。

在编写过程中，研究生助教连恩杨、陈选、鄢聪、王红梅参与了本书部分图稿的绘制工作，在此表示感谢。

由于能力和水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，欢迎广大师生和读者提出批评和改进意见。

编者
2017年2月

本书常用符号说明

1. 直流电源电压

U	直流电源电压通用符号
V_{CC}	晶体管集电极直流电压
V_{BB}	晶体管基极直流电压
V_{EE}	晶体管发射极直流电压
V_{DD}	场效应管漏极直流电压
ΔU 、 ΔI	直流电压、电流的变化量

2. 电阻、电容、电感、阻抗

R_s	信号源内阻
R_L	负载电阻
R'_L	等效负载电阻
C	电容的通用符号
L	电感的通用符号
Z	阻抗的通用符号

3. PN 结

n_i	自由电子浓度
p_i	空穴浓度
C_j	PN 结电容
C_B	PN 结势垒电容
C_D	PN 结扩散电容
U_{th}	死区电压
U_{BR}	反向电压
Q	静态工作点

4. 二极管及稳压管

VD	二极管通用符号
I_D	二极管直流电流
U_D (或 U_{on})	二极管正向导通电压
U_{th}	二极管阈值电压
U_{BR}	二极管击穿电压
U_{RM}	二极管最大反向工作电压
I_F	二极管最大整流电流
I_R	二极管反向电流
I_s	二极管反向饱和电流
r_d	二极管的交流电阻
R_D	二极管的直流电阻
f_M	二极管最高工作频率
U_T	二极管的温度电压当量

V_Z	稳压管的通用符号
U_Z	稳压管的稳定电压
I_Z	稳压管的稳定电流
I_{Zmax}	稳压管最大稳定电流
I_{Zmin}	稳压管最小稳定电流
P_{ZM}	稳压管额定功耗
r_Z	稳压管的动态电阻
$U_{O(AV)}$	输出电压平均值
$I_{O(AV)}$	输出电流平均值
5. 晶体管	
VT	晶体管的通用符号
$B、b$	晶体管的基极
$C、c$	晶体管的集电极
$E、e$	晶体管的发射极
$I_B(I_{BQ})、I_C(I_{CQ})、I_E(I_{EQ})$	基极、集电极、发射极电流直流量
$U_{BE}(U_{BEQ})、U_{CE}(U_{CEQ})$	发射结、集电结电压直流量
$i_b、i_c、i_e$	基极、集电极、发射极交流电流瞬时值
$\dot{i}_b、\dot{i}_c、\dot{i}_e$	基极、集电极、发射极交流电流向量值
$u_{be}、u_{ce}$	发射结、集电结交流电压瞬时值
$\dot{U}_{be}、\dot{U}_{ce}$	发射结、集电结交流电压向量值
$i_B、i_C、i_E$	基极、集电极、发射极总电流（即交直流叠加值）
$u_{BE}、u_{CE}$	发射结、集电结电压（即交直流叠加值）
$R_b、R_c、R_e$	基极电阻、集电极电阻、射极电阻
U_{CES}	晶体管的正向饱和压降
r_{be}	晶体管 b、e 间的动态电阻
r_{ce}	晶体管 c、e 间的动态电阻
$r_{bb'}$	基区的体电阻
$\bar{\beta}$	共射直流电流放大系数
β	共射交流电流放大系数
g_m	晶体管的低频跨导
I_{CBO}	集电极-基极之间的反向饱和电流
I_{CEO}	集电极-发射极之间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时集电极-基极间的反射击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时集电极-发射极间的反向击穿电压
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时发射极-基极间的反射击穿电压
$C_{b'e}$	发射结等效电容
$C_{b'c}$	集电结等效电容
6. 场效应管	
VT	场效应管的通用符号

G 、 g	场效应管的栅极
S 、 s	场效应管的源极
D 、 d	场效应管的漏极
B 、 b	场效应管的衬底
I_D	漏极电流
$U_{GS(off)}$	耗尽型场效应管夹断电压
$U_{GS(th)}$	增强型场效应管的开启电压
I_{DSS}	耗尽型场效应管的饱和漏极电流
R_g 、 R_d 、 R_s	栅极电阻、漏极电阻、源极电阻
R_{GS}	场效应管的直流输入电阻
g_m	场效应管的低频跨导
$U_{(BR)GD}$	最大栅漏击穿电压
$U_{(BR)DS}$	最大漏源击穿电压
$U_{(BR)GS}$	最大栅源击穿电压
I_{DM}	最大漏极电流
P_{DM}	场效应管的最大耗散功率
C_{gs}	栅源电容
C_{gd}	栅漏电容

7. 放大倍数 (增益)

\dot{A}_{u} 、 A_u	电压增益或电压放大倍数
\dot{A}_{us}	源电压增益或源电压放大倍数
\dot{A}_i	电流增益或电流放大倍数
\dot{A}_r	互阻增益或互阻放大倍数
\dot{A}_g	互导增益或互导放大倍数
\dot{A}_{uM} 、 \dot{A}_{uMf}	中频区开环增益、中频区闭环增益
\dot{A}_{H} 、 \dot{A}_{Hf}	高频区开环增益、高频区闭环增益
\dot{A}_{L} 、 \dot{A}_{Lf}	低频区开环增益、低频区闭环增益
\dot{A}_{usM}	中频段时放大电路的源电压增益
\dot{A}_{usL}	低频段时放大电路的源电压增益
\dot{A}_{usH}	高频段时放大电路的源电压增益
\dot{A}_{uc}	共模电压增益
\dot{A}_{ud}	差模电压增益
\dot{A}_r 、 \dot{A}_{usf}	闭环增益、闭环源电压增益

8. 功率

P_o	输出功率
-------	------

P_{om}	最大输出功率
P_V	直流电源消耗的功率
P_T	晶体管的管耗
P_{Tm}	晶体管的管耗

9. 频率

f_{BW}	通频带
f_H 、 f_{Hf}	开环时上限截止频率、闭环时上限截止频率
f_L 、 f_{Lf}	开环时下限截止频率、闭环时下限截止频率
$BW(f_H)$	开环带宽
f_0	谐振频率
ω_0	谐振角频率

10. 集成运算放大器

A	集成运算放大器的通用符号
P、p	同相输入端
N、n	反相输入端
u_P 、 i_P	同相端输入电压、电流
u_N 、 i_N	反相端输入电压、电流
u_{id}	差模输入电压
U_{idmax}	最大差模输入电压
u_{ic}	共模输入电压
U_{icmax}	最大共模输入电压
K_{CMR}	共模抑制比
\dot{A}_{od}	开环差模电压增益
U_{I0}	输入失调电压
I_{I0}	输入失调电流
I_{IB}	输入偏置电流
R_{id}	差模输入电阻
U_{OM}	输出电压最大值
S_R	转换速率
dU_{I0}/dT	输入失调电压温漂
dI_{I0}/dT	输入失调电流温漂

11. 负反馈放大电路

u_s 、 \dot{U}_s	交流信号源电压的瞬时值、向量
i_s 、 \dot{I}_s	交流信号源电流的瞬时值、向量
\dot{U}_i 、 \dot{I}_i	交流输入电压、输入电流的向量表示
u_i 、 i_i	交流输入电压、输入电流的瞬时值表示
\dot{U}_o 、 \dot{I}_o	交流输出电压、输出电流的向量表示
u_o 、 i_o	交流输出电压、输出电流的瞬时值表示
\dot{U}_{id} 、 \dot{I}_{id}	净输入电压、净输入电流的向量表示

u_{id} 、 i_{id}	净输入电压、净输入电流的瞬时值表示
\dot{U}_f 、 \dot{I}_f	反馈电压、反馈电流的向量表示
u_f 、 i_f	反馈电压、反馈电流的瞬时值表示
\dot{F}	反馈系数
\dot{F}_v	电压反馈系数
\dot{F}_r	互阻反馈系数
\dot{F}_g	互导反馈系数
\dot{F}_i	电流反馈系数
R_i 、 R_{if}	放大电路的输入电阻、负反馈放大电路的输入电阻
R_o 、 R_{of}	放大电路的输出电阻、负反馈放大电路的输出电阻

12. 电压比较器

U_{REF} 、 I_{REF}	参考电压（基准电压）、参考电流（基准电流）
U_T	电压比较器的阈值电压
U_{T+}	上限阈值电压
U_{T-}	下限阈值电压
ΔU_T	门限宽度或回差电压
U_{OM}	电压比较器的输出电压幅度

13. 其他符号

θ	相位角、导通角
Q	品质因数
TR	变压器的通用符号
φ	相位角
$\Delta\varphi$	附加相位角
M	互感系数
τ	时间常数
T	温度、周期
η	效率
q	占空比
S	整流电路的脉动系数
S_T	温度系数
S_r	稳压电路的稳压系数
S_U	电压调整率
S_R	纹波电压抑制比

目 录

前 言

本书常用符号说明

第1章 半导体二极管及其应用电路 1

1.1 半导体基础知识 1

1.1.1 半导体的特性 1

1.1.2 本征半导体 1

1.1.3 杂质半导体 3

小结 5

复习思考题 5

1.2 PN结及其特性 6

1.2.1 PN结的形成 6

1.2.2 PN结的特性 7

小结 11

复习思考题 11

1.3 半导体二极管 11

1.3.1 二极管的结构 11

1.3.2 二极管的伏安特性 12

1.3.3 二极管的主要参数 13

1.3.4 二极管的模型及分析方法 14

小结 19

复习思考题 19

1.4 特殊二极管 19

1.4.1 稳压二极管 19

1.4.2 发光二极管 22

1.4.3 变容二极管 22

1.4.4 光电二极管 23

1.4.5 光电耦合器 23

小结 23

复习思考题 24

1.5 工程应用举例 24

习题 25

自测题 30

第2章 双极型晶体管及其放大电路 31

2.1 双极型晶体管 31

2.1.1 晶体管的结构与类型 31

2.1.2 晶体管的电流放大原理 32

2.1.3 晶体管的特性曲线 34

2.1.4 晶体管的主要参数 36

2.1.5 光电晶体管及其应用 38

小结 39

复习思考题 40

2.2 放大电路概述 40

2.2.1 放大电路的基本概念 40

2.2.2 放大电路的主要性能指标 41

小结 44

复习思考题 44

2.3 基本共射极放大电路 45

2.3.1 放大电路的组成原则 45

2.3.2 放大电路的工作原理 46

2.3.3 小信号等效电路分析法 51

小结 57

复习思考题 58

2.4 放大电路的静态工作点稳定问题 58

2.4.1 影响静态工作点稳定的因素 58

2.4.2 基极分压射极偏置放大电路 59

小结 62

复习思考题 62

2.5 共集电极放大电路和共基极放大电路 63

2.5.1 共集电极放大电路 63

2.5.2 共基极放大电路 67

2.5.3 放大电路三种基本接法的性能比较 68

小结 69

复习思考题 69

2.6 多级放大电路 70

2.6.1 多级放大电路的级间耦合方式 70

2.6.2 多级放大电路的分析 72

小结 74

复习思考题 75

2.7 放大电路的频率特性 75

2.7.1 频率特性的概念 75

2.7.2 共射极放大电路的高频特性 77

2.7.3 共射极放大电路的低频特性 81

小结	85	第4章 功率放大电路	139
复习思考题	85	4.1 功率放大电路概述	139
2.8 工程应用举例	86	4.1.1 功率放大电路和电压放大电路	
2.9 Multisim 仿真举例	87	的比较	139
2.9.1 共射极放大电路的仿真	87	4.1.2 功率放大电路的分类	140
2.9.2 共集电极放大电路的仿真	91	4.1.3 功率放大电路的技术指标要求 ..	141
2.9.3 共基极放大电路的仿真	94	复习思考题	141
习题	97	4.2 双电源乙类功率放大电路	142
自测题	104	4.2.1 电路构成思路	142
第3章 场效应管及其放大电路	106	4.2.2 动态指标的计算	143
3.1 结型场效应管	106	4.2.3 功率管的选择	144
3.1.1 结型场效应管的结构和工作		小结	145
原理	106	复习思考题	145
3.1.2 结型场效应管的特性曲线	109	4.3 甲乙类功率放大电路	146
3.1.3 结型场效应管的主要参数	110	4.3.1 双电源功率放大电路	146
3.1.4 结型场效应管的特点	112	4.3.2 单电源功率放大电路	147
小结	112	4.3.3 复合管组成的功率放大电路	149
复习思考题	113	小结	150
3.2 绝缘栅场效应管	113	复习思考题	151
3.2.1 N 沟道增强型 MOS 管的结构		4.4 集成功率放大器	151
和工作原理	113	4.4.1 LM386 集成功率放大器	151
3.2.2 N 沟道增强型 MOS 管的特性曲线		4.4.2 5G31 集成功率放大器	154
和主要参数	115	4.5 Multisim 仿真举例	155
3.2.3 N 沟道耗尽型 MOS 管的结构、		4.5.1 乙类互补对称功率放大电路	155
工作原理和特性曲线	116	4.5.2 单电源甲乙类互补对称功率放大	
3.2.4 各种场效应管的特性比较	118	电路	156
小结	119	习题	158
复习思考题	119	自测题	162
3.3 场效应管放大电路	120	第5章 集成运算放大器及其单元	
3.3.1 电路构成及静态工作点分析	120	电路	164
3.3.2 场效应管的小信号等效电路	122	5.1 集成运算放大器	164
3.3.3 共源极放大电路的动态参数		5.1.1 集成电路的分类及特点	164
分析计算	123	5.1.2 集成运放的基本组成单元	165
3.3.4 共漏场效应管放大电路	125	5.1.3 集成运放的符号	166
小结	126	小结	166
复习思考题	127	复习思考题	166
3.4 Multisim 仿真举例	127	5.2 集成运放中的直流偏置电路	166
3.4.1 结型场效应管特性曲线仿真		5.2.1 直流偏置电路	167
研究	127	5.2.2 电流源作有源负载	170
3.4.2 共源极放大电路仿真分析	130	小结	171
习题	133	复习思考题	171
自测题	137	5.3 集成运放中的输入级电路	172

5.3.1 差动放大电路的工作原理	172	小结	215
5.3.2 差动放大电路的静态分析	173	复习思考题	215
5.3.3 差模信号输入时的电路分析	174	6.4 负反馈放大电路的分析与计算	215
5.3.4 共模信号输入时的电路分析	175	6.4.1 负反馈对放大电路性能的影响	215
5.3.5 差动放大电路的四种组态	176	6.4.2 深度负反馈时闭环增益的计算	220
5.3.6 改进型差动放大电路	181	小结	224
5.3.7 工程应用举例	183	复习思考题	224
小结	183	6.5 负反馈放大电路的自激振荡及 消除方法	224
复习思考题	184	6.5.1 自激振荡	225
5.4 集成运放的主要参数和电压传输特性	184	6.5.2 常用的消除自激振荡的方法	227
5.4.1 集成运放的主要参数	184	小结	229
5.4.2 集成运放的电压传输特性	186	复习思考题	229
5.4.3 理想集成运放的性能指标	187	6.6 Multisim 仿真举例	230
5.4.4 集成运放的选用原则和使用注意 事项	189	6.6.1 开环特性的仿真研究	230
小结	191	6.6.2 闭环特性的仿真研究	232
复习思考题	191	习题	235
5.5 通用型集成运放	191	自测题	239
小结	194	第7章 集成运算放大器的应用	241
复习思考题	194	7.1 基本运算电路	241
5.6 科学研究案例	195	7.1.1 反相输入运算电路	241
5.7 Multisim 仿真举例	196	7.1.2 同相输入运算电路	243
5.7.1 双端输入时差动放大电路的 差模电压增益测试	196	7.1.3 差动输入运算电路	245
5.7.2 双端输入时差动放大电路的 共模电压增益测试	197	7.1.4 积分运算电路和微分运算电路	246
习题	199	7.1.5 对数运算电路和指数运算电路	249
自测题	202	小结	250
第6章 负反馈放大电路	204	复习思考题	250
6.1 反馈的基本概念	204	7.2 模拟乘法器及其应用	251
6.2 反馈的分类与判别方法	205	7.2.1 模拟乘法器的基本概念	251
6.2.1 寄生反馈与人为反馈	205	7.2.2 模拟乘法器的工作原理	251
6.2.2 直流反馈与交流反馈	206	7.2.3 模拟乘法器的应用	253
6.2.3 本级反馈与级间反馈	207	小结	254
6.2.4 串联反馈与并联反馈	207	复习思考题	255
6.2.5 电压反馈与电流反馈	208	7.3 有源滤波电路	255
6.2.6 正反馈与负反馈	209	7.3.1 滤波电路的基础知识	255
小结	211	7.3.2 一阶有源滤波电路	256
复习思考题	211	7.3.3 二阶有源滤波电路	257
6.3 负反馈放大电路的基本关系式	212	7.3.4 开关电容滤波电路	263
6.3.1 基本关系式的推导	212	小结	267
6.3.2 四种组态中参数的物理意义	213	复习思考题	268
		7.4 电压比较器	268
		7.4.1 单门限电压比较器	268
		7.4.2 双门限电压比较器	270

7.4.3 窗口电压比较器	273	8.4.3 方波产生电路的仿真	315
7.4.4 集成电压比较器	274	习题	316
小结	276	自测题	321
复习思考题	276	第9章 直流稳压电源	323
7.5 工程应用举例	277	9.1 直流稳压电源的组成及其性能指标 ..	323
7.6 Multisim 仿真举例	278	9.1.1 直流稳压电源的组成	323
7.6.1 积分电路的仿真	278	9.1.2 直流稳压电源的性能指标	324
7.6.2 微分电路的仿真	279	小结	325
7.6.3 迟滞电压比较器的仿真	280	9.2 整流电路	326
习题	280	9.2.1 单相半波整流电路	326
自测题	286	9.2.2 单相全波整流电路	328
第8章 信号产生电路	287	9.2.3 倍压整流电路	330
8.1 正弦波振荡电路	287	小结	331
8.1.1 正弦波振荡电路的振荡条件和 电路组成	287	复习思考题	331
8.1.2 RC 正弦波振荡电路	289	9.3 滤波电路	331
8.1.3 LC 正弦波振荡电路	293	小结	334
8.1.4 石英晶体正弦波振荡电路	300	复习思考题	334
小结	303	9.4 稳压电路	335
复习思考题	303	9.4.1 稳压管稳压电路	335
8.2 非正弦波信号产生电路	303	9.4.2 串联反馈型稳压电路	338
8.2.1 矩形波产生电路	304	9.4.3 集成线性稳压器及其应用	339
8.2.2 三角波产生电路	306	9.4.4 开关型稳压电路	342
8.2.3 锯齿波产生电路	307	小结	343
8.2.4 集成函数发生器	308	复习思考题	344
小结	310	9.5 Multisim 仿真举例	344
复习思考题	310	9.5.1 桥式整流电路的仿真	344
8.3 工程应用举例	310	9.5.2 集成稳压电路的仿真	347
8.4 Multisim 仿真举例	312	习题	348
8.4.1 RC 文氏桥振荡电路的仿真	312	自测题	353
8.4.2 电容三点式振荡电路的仿真	314	部分习题与自测题参考答案	355
		参考文献	368

第 1 章

半导体二极管及其应用电路

本章学习概要

半导体器件是组成电子电路的核心器件，电路的性能与其所用的器件的特性有密切关系。半导体二极管是最简单的半导体器件，其核心部分是PN结。因此，学习电子电路，必须首先了解半导体器件的工作原理，掌握它们的工作特性和参数。

本章介绍半导体的基础知识，学习PN结的形成及其特点，重点学习半导体二极管的伏安特性、参数及其等效电路模型，以及二极管电路的分析方法。了解几种特殊的二极管。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体的特性

自然界的物质根据导电性能可分为导体、半导体和绝缘体。而物质的导电特性取决于原子结构中的最外层电子，即价电子。

导体一般为低价元素，如铜、铁、铝等金属，其最外层电子受原子核的束缚力最小，极易挣脱原子核的束缚成为自由电子，在外电场作用下，这些自由电子定向运动形成电流，因此，导体呈现出较好的导电特性。而高价元素（如惰性气体）和高分子材料（如橡胶、塑料）最外层电子受原子核的束缚力很强，不易挣脱原子核的束缚，所以绝缘体的导电能力最弱。对于半导体材料，最外层电子既不像导体那样极易挣脱原子核的束缚，也不像绝缘体那样被原子核束缚的那么紧，因此，半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

常用的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）等元素半导体；砷化镓（GaAs）、磷化镓（GaP）、磷砷化镓（GaAsP）等化合物半导体。半导体材料之所以受到人们的重视，是因为它的导电能力具有独特的性质。例如，半导体材料受到光照或温度变化时，导电能力会发生改变；在纯净的半导体材料中加入微量的特定的杂质元素，它的导电能力有显著的提高。正是利用了这些特性，人们制成了各种不同用途的半导体器件。下面从半导体的结构出发，讨论半导体的导电机理和导电性能。

1.1.2 本征半导体

纯净且结构完整的单晶半导体称为本征半导体。

硅（Si）和锗（Ge）是常用的半导体材料。硅的原子序数是14，锗的原子序数是32，硅和锗的最外层都有四个价电子，都是四价元素。硅和锗的原子结构模型如图1.1.1a、b所

示。由于它们的价电子数相同，所以呈现出相似的导电性能。为了突出价电子对半导体导电性能的影响，常把内层电子和原子核共同看成一个惯性核，把价电子单独画出来。很明显，惯性核具有四个正电荷，其简化的原子结构模型可以画成图 1.1.1c 所示。

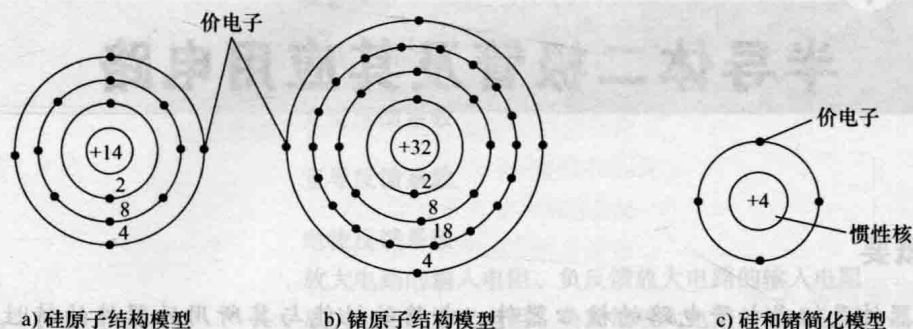


图 1.1.1 硅和锗的原子结构模型

本征半导体在空间形成排列整齐的四角形晶体点阵结构，每个原子之间的距离都相等。其中每个原子的四个价电子不仅受自身原子核的束缚，还受周围相邻四个原子的共价键束缚，形成稳定的共价键结构。如图 1.1.2a 所示是晶体的四面体结构示意图，图 1.1.2b 是晶体结构平面示意图。

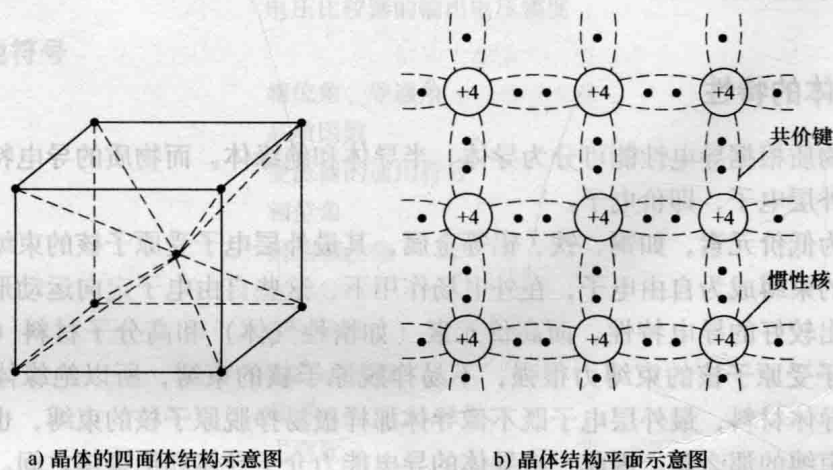


图 1.1.2 硅和锗的共价键结构

本征半导体中，在绝对零度且无外界能量激发时，所有价电子都被束缚在共价键中，不存在自由电子，这时的半导体不能导电，相当于绝缘体。但是，半导体中的价电子所受的束缚力与绝缘体相比较小，在受外界能量（如热能、电能、光能等）激发时，便有共价键中的价电子获得能量挣脱共价键和原子核的束缚成为自由电子。在外加电场的作用下，这些自由电子就会定向移动形成电子电流。

共价键上的电子挣脱束缚成为自由电子后，在它原来所在的共价键位置上留下了一个空位，这个空位置叫空穴，带有空穴的原子因为少了一个电子而带正电荷。显然，在本征半导体中，激发出一个自由电子，同时便产生一个空穴，自由电子和空穴总是成对地产生，称为自由电子空穴对，如图 1.1.3 所示。在半导体中共价键分裂产生自由电子空穴对的过程叫本征激发。

空穴也能够运动，空穴运动的实质是价电子填补共价键上空穴的运动结果。例如在图 1.1.3 中，共价键 A 处有一个空穴，附近共价键 B 处的价电子去填补了共价键 A 处的空位，于是 A 处的空穴消失，空穴在 B 处出现。如果共价键 C 处的价电子又来填补 B 处的空位，那么，空穴便从 B 处移动到 C 处。由于空穴带有正电荷，空穴的移动必伴随有正电荷的移动，所以空穴也是载流子。空穴在外加电场作用下，就会形成空穴电流，空穴的移动方向和自由电子的移动方向相反，但形成的电子电流和空穴电流之和是本征半导体中的总电流。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特征。

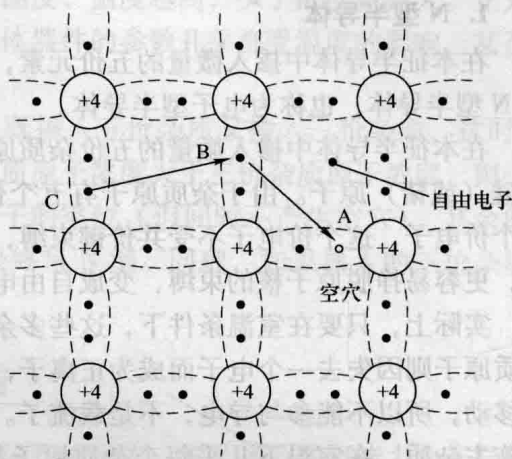


图 1.1.3 本征激发产生自由电子空穴对

本征激发是半导体中载流子的产生过程，与此同时又会有相反的过程发生，那就是自由电子在运动过程中释放能量而填入空穴，于是共价键恢复。我们把自由电子空穴对消失的过程，称为载流子的复合过程。显然，激发和复合是半导体中存在的一对相反的运动过程，在一定温度下，当激发和复合速度相等，达到动态平衡时，半导体中载流子的浓度就会保持不变。

用 n_i 和 p_i 分别表示半导体中自由电子和空穴的浓度。在室温下 ($T = 300\text{K}$)，本征硅半导体中 $n_i = p_i = 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ，本征锗半导体中 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。锗的载流子浓度比硅大上千倍，这是因为硅的价电子所受的束缚力大于锗的价电子所受的束缚力，要使它们变成自由电子需要更大的能量。同时也说明，室温下的本征半导体，无论是硅或锗，它们的载流子浓度都很小，所以导电能力很弱。

另外，除了温度的升高能产生本征激发外，光照增强或其他射线照射时，也能产生本征激发，从而使半导体的导电性能大大增强，其中热激发是本征半导体材料中产生本征激发的主要原因，因此把本征激发也称为热激发。

总之，半导体有以下特点：

- 1) 半导体中有两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。
- 2) 在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对地产生，称为自由电子空穴对。
- 3) 半导体中，同时存在载流子的产生和复合过程，当产生（即激发）和复合速度相等，达到动态平衡时，半导体中载流子的浓度就会保持不变。载流子的浓度与温度有关。温度升高，载流子的浓度增大，导电率也随之增大。

1.1.3 杂质半导体

在本征半导体中，载流子的浓度都很小，所以导电能力很弱，不能直接用来制造半导体器件，用来制造半导体器件的都是杂质半导体。所谓杂质半导体是指在本征半导体中人为地掺入某些微量的“杂质”元素，常用的杂质元素有三价的硼、铝、镓和五价的磷、砷、锑等。掺入微量的杂质元素后，就能够显著地改变半导体的导电特性。通过掺入杂质的种类和浓度来改变和控制半导体的导电特性，制成各种各样的半导体器件。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素，如磷，可使半导体中自由电子浓度大大增加，形成 N 型半导体，也称为电子型半导体。

在本征半导体中掺入微量的五价杂质原子后，这些杂质原子取代晶体中某些晶格位置上的硅（或锗）原子。由于杂质原子有五个价电子，与周围四个硅原子组成共价键时会多出一个价电子，这个价电子不受共价键束缚，只受到该原子核的束缚，与共价键中的价电子相比，更容易挣脱原子核的束缚，变成自由电子。

实际上，只要在室温条件下，这些多余的电子就具有足够的能量，全部变成自由电子，杂质原子则因失去一个电子而成为正离子，称为杂质正离子。杂质正离子不能像空穴那样自由移动，所以不能参与导电，不是载流子。由于五价杂质原子能释放出一个自由电子，故称为施主杂质。在室温下几乎每个杂质原子都能提供一个自由电子，这样大大提高了半导体的导电性能，如图 1.1.4 所示。

把这种由于掺入杂质元素而产生的激发称为掺杂激发。所以在 N 型半导体中，自由电子和空穴的浓度不再相等，很明显，自由电子为多数载流子，简称为多子，空穴为少数载流子，简称为少子。多子的来源有两个途径：掺杂激发和本征激发，其中掺杂激发是主要来源；而少子仅来源于本征激发。

总之，在 N 型半导体中，虽然自由电子和空穴的浓度不再相等，但是在整块半导体中正负电荷量相等，呈现电中性。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素如硼，可使半导体中空穴浓度大大增加，形成 P 型半导体，也称为空穴型半导体。

三价杂质原子取代晶体中某些晶格位置上的硅（或锗）原子，由于三价杂质原子只有三个价电子，与周围四个原子组成共价键时，缺少一个电子，共价键中出现了一个空位，这个空位不是空穴，它不带电，所以不是载流子。由于空位的存在，相邻共价键中的价电子很容易来填补这个空位，于是在该价电子原来的位置上产生一个空穴，杂质原子因得到一个电子而成为不能移动的杂质负离子。如图 1.1.5 所示，共价键 B 处的一个价电子填补 A 处的空位，于是在 B 处出现一个空穴。由于三价原子接受一个电子，故称为受主杂质。

所以在 P 型半导体中，空穴为多子，自由电子为少子。与 N 型半导体一样，多子的来源有两个途径：掺杂激发和本征激发，其中掺杂激发是多子的主要来源；而少子自由电子仅来源于本征激发。与 N 型半导体一样，在 P 型半导体中自由电子和空穴的浓度不再相等，但是在整块半导体中正负电荷量相等，呈现电中性。

在杂质半导体中，多子的浓度主要取决于掺入杂质的浓度，掺入杂质越多，多子浓度就

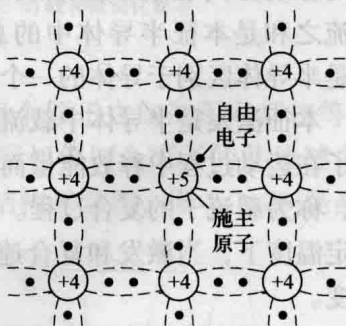


图 1.1.4 N 型半导体

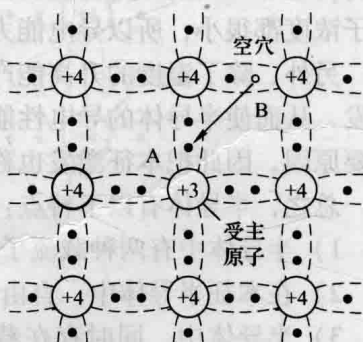


图 1.1.5 P 型半导体