

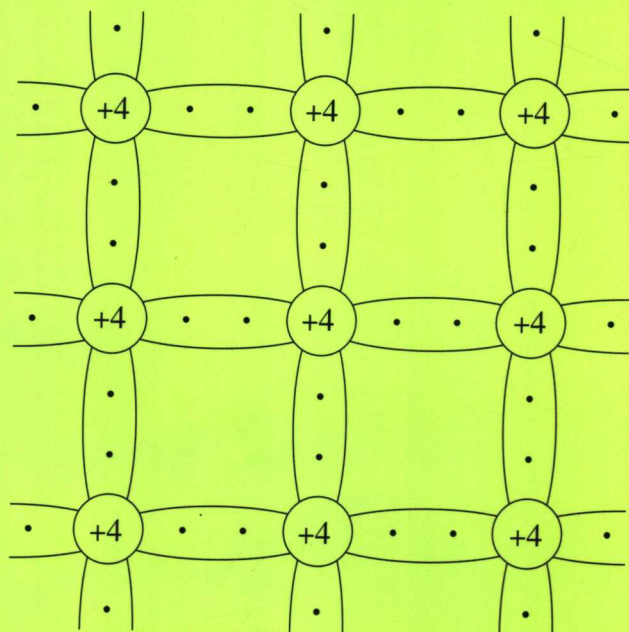


模拟电子线路

张军 何长龙 段安平 达新宇 王毅 策划

许杰 主编

王立志 石雨荷 张小木 赵红言 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

21 世纪高等院校电子信息类系列教材

TN710
140

模拟电子线路

张军 何长龙 段安平 达新宇 王毅 策划

许杰 主编

王立志 石雨荷 张小木 赵红言 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是 21 世纪高等院校电子信息类系列教材之一,为高等院校电子、电气、控制、计算机、通信等相关专业基础合训而编写。

模拟电子线路包括半导体二极管、三极管器件;放大电路基础;场效应管放大电路;放大电路的频率特性;集成运算放大电路;负反馈放大电路;信号的运算和处理电路;波形发生和信号转换电路;功率放大电路;直流稳压电源等内容。

全书对上述内容的基本概念、工作原理、基本分析方法等作了系统全面的介绍。全书注重讲解基本器件、基本电路的外特性和应用。基本学时 60,也可以根据实际情况适当扩展到 80 学时左右。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路 / 许杰主编. —北京:国防工业出版社,
2006.2
(21 世纪高等院校电子信息类系列教材)
ISBN 7-118-04376-1

I. 模... II. 许... 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(2006)第 008945 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 404 千字

2006 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

“模拟电子线路”不仅是高等院校电子、电气、控制、计算机、通信等专业的必修专业基础课程,也是其它相关专业的公共基础课。通过学习这门课程,可以培养学生对电路的分析、设计和应用开发能力。同时,它又是实践性很强的课程,其内容在电子技术高速发展的影响下需要不断地更新。通过基础理论和实际操作的培训,可以提高学生的分析、开发和实际动手能力,对培养实用性人才非常重要。

全书共 10 章。第 1 章主要介绍半导体基础知识、半导体二极管、稳压二极管以及二极管的应用,半导体三极管的结构及类型、三极管的放大作用等内容。第 2 章主要介绍放大电路的概念和放大电路的性能指标、放大电路的组成、放大电路的分析方法、晶体管单管放大电路的 3 种基本接法、多级放大电路的基本问题等内容。第 3 章主要介绍结型场效应管的结构和工作原理、绝缘栅场效应管的结构和工作原理、各种 FET 的参数及特性比较、场效应管放大电路以及放大电路的小信号模型分析法、三极管组合电路应用等内容。第 4 章主要介绍频率特性的一般概念、波特图、共射极放大电路的频率特性、多级放大电路的频率特性、多级放大电路的通频带、上下限频率的计算等内容。第 5 章主要介绍集成电路的特点、集成运放的基本单元电路、差动放大电路、电流源电路、复合管结构、输出级电路、集成运放电路的调零、保护等内容。第 6 章主要介绍反馈的基本概念和类型、反馈的 4 种类型及其判断方法、负反馈对放大电路性能的影响、正确引入负反馈的原则、深度负反馈放大电路的实现及特点、深度负反馈放大电路电压放大倍数的近似计算、负反馈放大电路的自激振荡以及消除自激振荡的方法等内容。第 7 章主要介绍理想集成运算放大电路的线性应用电路、有源滤波电路、电压比较器等内容。第 8 章主要介绍正弦波振荡电路、非正弦波形发生电路、信号转换电路等内容。第 9 章主要介绍功率放大电路的组成、分析计算、互补功率放大电路、集成功率放大电路、功率管的安全工作、功率管的散热、功率管的保护电路等内容。第 10 章主要介绍整流电路、滤波电路、串联型稳压电路、线性集成稳压电路等内容。

全书在选材上注重基本概念、基本原理、基本电路的应用,注重基本器件、基本电路以及组合电路的外特性的分析,体现了传统模拟电子线路与现代电子技术的有机结合。在内容编排上以 60 学时为基本学时,书中标明 * 的内容

作为选修内容。在使用过程中,可以根据教学的实际需要适当扩展为 80 学时左右,扩展学时主要用于习题讲解和综合应用实例分析等内容。

本书由张军、何长龙、段安平、达新宇、王毅策划,许杰主编,王立志、石雨荷、张小木、赵红言、许柯、孙勇、马裕、王刚、齐凯等参加了编写、绘图、校对等工作。其中第 1、2 章由石雨荷、许柯编写,第 3、4 章由张小木、孙勇编写,第 5、6 章由许杰、齐凯编写,第 7、8 章由王立志、马裕编写,第 9、10 章由赵红言、王刚编写。在编写过程中朱林户教授、王曙钊教授、张军副教授、达新宇教授对本书的编写提出了具体的指导意见,张立、王毅对本书的编写提供了帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,在编写过程中难免出现错误,敬请广大读者在使用过程中提出宝贵意见。

编者

本书常用符号

- A** 增益
- a 整流元件的阳极(正极)
- A_F 反馈放大电路的闭环增益
- A_V 电压增益
- A_I 电流增益
- A_{VC} 共模电压增益
- A_{VD} 差模电压增益
- A_{VO} 开环电压增益
- A_{VF} 闭环电压增益
- B** 势垒
- b BJT的基极
- BW** 频谱密度,带宽
- C** 电容
- C_b 隔直电容(耦合电容)
 - C_e 发射极旁路电容
 - $C_{b'c}$ 基极-集电极电容
 - $C_{b'e}$ 基极-发射极电容
 - C_B 势垒电容
 - C_D 扩散电容
 - C_j 结电容
 - C_F 反馈电容
 - C_i 输入电容
 - C_o 输出电容
 - C_L 负载电容
- c BJT的集电极
- D** 扩散系数
- D** 二极管
- d 场效应管的漏极
- E** 能量
- e 电子的电荷量
 - e BJT的发射极,自然对数的底
- ϵ 电场强度
- F** 反馈系数
- F_V 电压反馈系数
- f 频率
- f_L 放大器的下限频率
- f_H 放大器的上限频率
- f_T 特征频率
- f_a BJT共基极截止频率
- G** 电导
- g 微变电导
 - g_m 双口有源器件的互导(跨导)
 - g 场效应管的栅极
- H** 双口网络的混合参数
- $h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$ BJT共射接线法的 h 参数
- I_L 负载电流
- I, i 电流
- I_s 信号源电流
- I_i 输入电流
- I_o 输出电流
- I_{CC} 空载正电源电流
- I_{DD} 空载漏电源电流
- I_{EE} 空载负电源电流
- I_{IB} 输入偏置电流
- I_{IO} 输入失调电流
- I_{OM} 最大输出电流
- I_{OO} 输出失调电流
- I_{OS} 输出短路电流
- I_{REF} 参考电流(基准电流)
- J** 电流密度
- K** 热力学温度的单位(开尔文)
- k 玻耳兹曼常数
 - k 整流元件的阴极(负极)
- K_{CMR} 共模抑制比
- L** 负载
- L 自感系数,电感
- l 长度

- M 互感系数
 N 电子型半导体
 N 绕组匝数
 N_F 噪声系数
 P 功率
 P 空穴型半导体
 Q, q 电荷, 品质因数
 Q 静态工作点
 R_I 直流输入电阻
 R 电阻(直流电阻或静态电阻)
 R_b, R_c, R_e BJT的基极、集电极、发射极电阻
 R_g, R_d FET的栅极、漏极电阻
 R_s 信号源内阻
 R_L 负载电阻
 R_p 电位器(可变电阻)
 r 电阻(交流电阻或动态电阻)
 r_{be} BJT的输入电阻
 r_{ce} BJT的输出电阻
 R_i 放大电路交流输入电阻
 R_o 放大电路交流输出电阻
 R_F 反馈电阻
 S 开关
 S 面积
 s 复频率变量
 s FET的源极
 SNR 信噪比
 S_R 转换速率
 T 温度(热力学温度以K为单位, 摄氏温度用 $^{\circ}C$ 表示)
 T 双口有源器件^①
 Tr 变压器
 t 时间
 V, v 电压
 V_s 信号源电压
 V_i 输入电压
 V_{th} 二极管、BJT的门坎电压
 V_T 场效应管的开启电压
 V_T 温度的电压当量
 V_P 场效应管的夹断电压
 V_{CC}, V_+ 正电源电压
 V_{DD} 正电源电压
 V_{EE}, V_- 负电源电压
 V_{OO} 输出失调电压
 V_{REF} 参考电压(基准电压)
 $V_{(BR)CBO}$ 发射极开路, 集电极-基极反向击穿电压
 $V_{(BR)EBO}$ 集电极开路, 发射极-基极反向击穿电压
 $V_{(BR)CEO}$ 基极开路, 集电极-发射极反向击穿电压
 $V_{(BR)DS}, V_{(BR)GD}, V_{(BR)GS}$ 分别为漏源击穿电压、栅漏击穿电压和栅源击穿电压
 X, x 电抗, 反馈电路中的信号量
 Y, y 导纳
 Z, z 阻抗
 α BJT共基极接法的电流放大系数
 β BJT共射极接法的电流放大系数
 γ 稳压系数
 η 效率
 θ 整流元件的导电角
 μ BJT的内部电压反馈系数
 ρ 电阻率
 σ 电导率
 φ 相角
 ϕ 时钟脉冲
 τ 时间常数
 Ω 电阻的单位(欧姆)
 Ω, ω 角频率

注:①双口有源器件指半导体三极管、场效应管等。

在电路原理图中,以BJT为例,各电压和电流的符号规定如下表所示。

项目	电源	静态值	交流或随时间变化的分量			总量(直流+交流)
			瞬时值	有效值	相量	瞬时值
集电极电压	V_{CC}	V_C	v_c	V_c	\dot{V}_c	$v_C = V_C + v_c$
集电极电流	I_{CC}	I_C	i_c	I_c	\dot{I}_c	$i_C = I_C + i_c$
基极电压	V_{BB}	V_B	v_b	V_b	\dot{V}_b	$v_B = V_B + v_b$
基极电流	I_{BB}	I_B	i_b	I_b	\dot{I}_b	$i_B = I_B + i_b$
发射极电压	V_{EE}	V_E	v_e	V_e	\dot{V}_e	$v_E = V_E + v_e$
发射极电流	I_{EE}	I_E	i_e	I_e	\dot{I}_e	$i_E = I_E + i_e$

注:在交流通路和小信号等效电路中,各元器件的电流、电压均标交流分量,对于输入信号为正弦波的,标为 \dot{V}_i, \dot{I}_b 等;对于输入信号为非正弦波的,而且电路在零输入时为零输出,则标为 v_i, v_o 等;对于输入为非正弦波信号,而且在电路为零输入时非零输出,则标为 $\Delta v_i, \Delta v_o$ 等

目 录

第 1 章 半导体二极管和三极管	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	4
1.2 PN 结的形成及特性	5
1.2.1 PN 结的形成	5
1.2.2 PN 结的特性	7
1.3 半导体二极管	11
1.3.1 二极管的类型和电路符号	11
1.3.2 二极管的伏安特性曲线	12
1.3.3 二极管的主要参数	13
1.3.4 二极管的应用电路举例	14
1.3.5 稳压二极管	16
1.4 半导体三极管	17
1.4.1 三极管的结构和类型	18
1.4.2 三极管的工作原理	18
1.4.3 三极管的特性曲线	21
1.4.4 三极管的主要参数	23
本章小结	27
思考与练习	28
第 2 章 放大电路基础	31
2.1 放大电路的工作原理	31
2.1.1 放大电路的功能	31
2.1.2 放大电路的工作原理	31
2.2 图解分析法	35
2.2.1 静态工作情况分析	35
2.2.2 动态工作情况分析	37
2.2.3 波形失真与静态工作点的选择	38
2.3 晶体管交流等效电路法	40
2.3.1 H 参数等效电路	40
2.3.2 混合参数 Π 型等效电路	44
2.4 基本放大电路的分析	45

2.4.1	放大电路的性能指标	45
2.4.2	共发射极放大电路	47
2.4.3	共基极放大电路	50
2.4.4	共集电极放大电路	52
2.5	放大电路的工作点稳定问题	55
2.6	多级放大电路	58
2.6.1	多级放大电路的耦合方式	59
2.6.2	多级放大电路的增益	60
2.6.3	多级放大电路的输入电阻和输出电阻	61
* 2.7	放大电路的噪声	63
2.7.1	电阻热噪声	63
2.7.2	晶体三极管的噪声	64
2.7.3	噪声系数	64
	本章小结	64
	思考与练习	65
第3章	场效应管放大电路	71
3.1	结型场效应管	71
3.1.1	JFET 工作原理	71
3.1.2	JFET 伏安特性曲线	74
3.2	金属—氧化物—半导体场效应管	76
3.2.1	N沟道增强型 MOSFET	76
3.2.2	N沟道耗尽型 MOSFET	78
3.2.3	各种 FET 的特性比较	79
3.3	场效应管的主要参数	80
3.4	场效应管和晶体三极管的比较	82
3.5	场效应管放大电路	82
3.5.1	FET 的直流偏置电路	82
3.5.2	FET 的微变等效电路	85
3.5.3	FET 放大电路性能分析	85
	本章小结	90
	思考与练习	91
第4章	放大电路的频率特性	97
4.1	放大电路频率特性的基本概念	97
4.1.1	频率特性和通频带	97
4.1.2	频率失真与增益带宽积	98
4.1.3	波特图	100
* 4.2	放大电路的复频域分析法	100
4.2.1	传递函数及极零点概念	100
4.2.2	放大电路波特图的近似画法	102

4.2.3 上、下限频率的计算	106
4.3 共发射极放大电路的频率响应	109
4.3.1 低频响应	109
4.3.2 高频响应	110
* 4.4 共基极放大电路的高频响应	115
4.5 多级放大器的频率响应	116
4.5.1 多级放大器的频率响应	116
4.5.2 组合宽带放大器	118
本章小结	120
思考与练习	121
第5章 集成电路运算放大器	125
5.1 集成运算放大电路的特点	125
5.2 电流源电路	126
5.2.1 单管电流源电路	126
5.2.2 镜像电流源电路	126
5.2.3 威尔逊电流源电路	127
5.2.4 比例电流源电路	127
5.2.5 微电流源电路	128
5.2.6 电流源作有源负载	128
5.3 差动放大电路	129
5.3.1 差动放大电路的输入与增益	129
5.3.2 基本差动放大电路结构与工作原理	130
5.3.3 基本差动放大电路主要技术指标的计算	131
5.3.4 改进型差动放大电路	134
5.3.5 差动放大电路的传输特性	137
5.3.6 差动放大电路的失调及补偿	138
5.4 集成运算放大电路	140
5.4.1 简单集成运算放大电路	140
* 5.4.2 通用型集成运算放大电路	141
5.5 集成运算放大电路的主要指标	144
本章小结	145
思考与练习	146
第6章 负反馈放大电路	149
6.1 反馈的基本概念和类型	149
6.1.1 反馈的基本概念	149
6.1.2 反馈增益的一般表达式	150
6.1.3 反馈的基本类型及其判断	150
6.2 负反馈对放大电路性能的影响	155
6.2.1 提高放大增益的稳定性	155

6.2.2	减少非线性失真	157
6.2.3	抑制反馈环内噪声	157
6.2.4	扩展频带	158
6.2.5	对输入输出电阻的影响	159
6.3	负反馈放大电路的分析方法	162
6.3.1	深度负反馈放大电路的特点	162
6.3.2	深度负反馈放大电路的近似计算	164
6.4	负反馈放大电路的稳定分析	168
6.4.1	负反馈放大电路的稳定工作条件	168
6.4.2	负反馈放大电路的稳定性分析	169
* 6.4.3	频率补偿技术	170
	本章小结	172
	思考与练习	172
第 7 章	信号的运算和处理电路	177
7.1	理想运算放大器及其分析依据	177
7.1.1	理想运算放大器	177
7.1.2	理想运算放大器的两个工作区	177
7.2	基本运算电路	178
7.2.1	比例运算	178
7.2.2	加减运算	179
7.2.3	积分运算和微分运算	180
7.2.4	对数运算和指数运算	181
* 7.3	实际运放运算电路的误差分析	182
7.4	模拟乘法器及其应用	185
7.4.1	乘法器的工作原理	185
7.4.2	乘法器的应用	186
* 7.5	有源滤波器	188
7.5.1	滤波器的传递函数	188
7.5.2	低通有源 RC 滤波器	190
7.5.3	高通有源 RC 滤波器	190
7.5.4	带通和带阻有源 RC 滤波器	191
7.5.5	开关电容有源滤波器	191
7.6	电压比较器	193
7.6.1	单限比较器	193
7.6.2	多限电压比较器	194
* 7.7	电子系统预处理中的放大电路	196
7.7.1	测量放大器	196
7.7.2	隔离放大器	198
	本章小结	199

思考与习题	200
第 8 章 波形发生和信号转换电路	205
8.1 正弦波振荡器	205
8.1.1 正弦波自激振荡的基本原理	205
8.1.2 RC 正弦波振荡器	206
8.1.3 LC 正弦波振荡器	208
8.1.4 石英晶体正弦波振荡器	211
8.2 非正弦信号发生器	213
8.2.1 短形波发生器	213
8.2.2 三角波和锯齿波发生器	215
8.2.3 函数发生器	216
* 8.3 信号转换电路	218
8.3.1 电压-电流转换电路	218
8.3.2 电压-频率转换电路	219
本章小结	220
思考与练习	221
第 9 章 功率放大电路	225
9.1 功率放大电路概述	225
9.1.1 功率放大电路的特点和要求	225
9.1.2 放大电路工作状态的分类	226
9.1.3 提高效率的主要途径	227
9.2 乙类互补对称功率放大电路	227
9.2.1 电路组成	227
9.2.2 图解分析与计算	228
9.2.3 最大管耗和最大输出功率的关系	230
9.2.4 功率 BJT 的选择	231
9.3 甲乙类互补对称功率放大电路	231
9.3.1 甲乙类双电源互补对称电路	232
9.3.2 准互补对称功率放大电路	232
9.3.3 甲乙类单电源互补对称电路	233
* 9.4 集成功率放大电路	235
9.4.1 LM386 通用型集成功率放大电路	235
9.4.2 SHM11506II 专用型集成功率放大电路	236
9.5 功率管的安全工作	237
9.5.1 功率管的散热	237
9.5.2 功率管的二次击穿	238
9.5.3 功率管的保护电路	239
本章小结	239
思考与练习	240

第 10 章 直流稳压电源	242
10.1 整流电路	242
10.1.1 单相半波整流电路	242
10.1.2 单相全波整流电路	243
10.1.3 单向桥式全波整流电路	244
10.2 滤波电路	246
10.2.1 电容滤波电路	246
10.2.2 电感滤波电路	248
10.2.3 Π 形滤波电路	249
10.3 倍压整流电路	250
10.3.1 二倍压整流电路	250
10.3.2 多倍压整流电路	250
10.4 串联型稳压电路	251
10.4.1 串联型稳压电路的基本原理	251
10.4.2 稳压电路的质量指标	252
10.5 线性集成稳压电路	253
10.5.1 输出固定的三端集成稳压器	253
10.5.2 三端可调式集成稳压器	256
10.5.3 三端式集成稳压器的应用举例	256
* 10.6 串联型开关稳压电路	259
本章小结	261
思考与练习	261
思考与练习部分参考答案	266
参考文献	273

第 1 章 半导体二极管和三极管

半导体器件是构成各种半导体电路的核心元件,要研究各种电子电路,首先必须了解半导体器件的工作原理,掌握它的工作特性和参数。本章首先从原子的共价键结构图讨论本征半导体和杂质半导体的物理特性,然后介绍 PN 结的单向导电原理、伏安特性、电容特性、击穿特性,以及根据 PN 结特性制成的二极管和稳压管。最后,在二极管的基础上,介绍三极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体的基本知识

半导体器件,如二极管、三极管、场效应管、集成电路以及半导体光敏、热敏元件等,都是由半导体材料构成。因此要了解半导体器件,首先必须对半导体材料的性质有所认识。

世界上有许多物质,就其导电性能而言大体分为导体、绝缘体和半导体。对于导体,如铜、银、铁等,绝缘体如橡胶、塑料等,人们在日常生活中接触较多,有所了解,故这里讨论的重点就是半导体。顾名思义,半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。半导体材料之所以受到人们的重视,主要还在于它的导电能力具有独特的性质。如纯净的半导体受到光照或加热时,导电率会显著地增加;在纯净的半导体中掺少量的杂质元素,它的导电率会千万倍地增加。正是利用了半导体的这样一些特性,人们制成各种各样的半导体器件。

半导体为什么具有这些特性呢?这就需要从它的原子结构上来加以说明。首先讨论的是纯半导体,又称本征半导体。

1.1.1 本征半导体

目前用来制造半导体管的半导体材料主要是硅(Si)和锗(Ge)。下面介绍这两种材料的晶体结构。

1. 本征半导体的晶体结构

物质都是由原子构成的,物质的导电性能是由物质内部原子的结构和原子间的结合方式决定的。原子由带正电的原子核和若干个围绕原子核运动的带负电的电子组成。原子核所带的正电量与围绕它的电子的负电量相等,整个原子呈电中性。单个硅和锗的原子结构如图 1.1.1 所示,它们的最外层电子(又称价电子)都是 4 个,称为 4 价元素。通常,价电子受原子核束缚力较弱,在外界因素影响下可能变为自由电子。为简化起见,常常把内层电子和原子核看作一个整体,称为惯性核,如图 1.1.1(c)所示。惯性核带 4 个单位的正电荷,最外层有 4 个价电子,带 4 个单位的负电荷,整个原子呈电中性。

晶体管中所用的硅材料和锗材料,其内部的原子排列非常整齐,均以共价键的形式结

合起来,图 1.1.2 是共价键形式的平面结构示意图,它常常被称为单晶体。

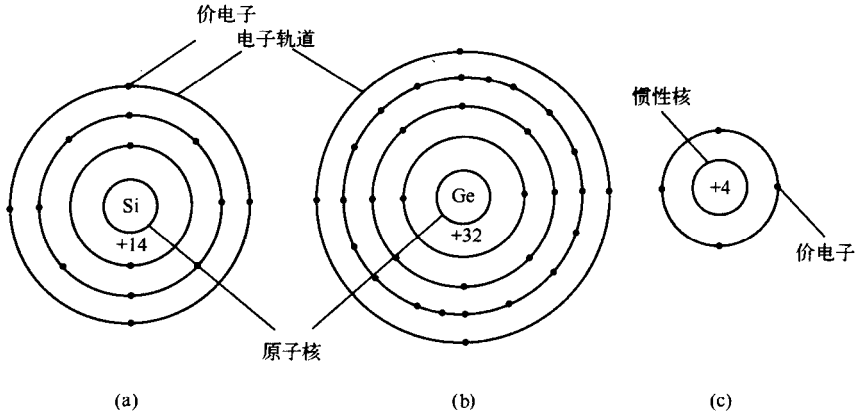


图 1.1.1 半导体的原子结构示意图

(a) 硅原子; (b) 锗原子; (c) 简化模型。

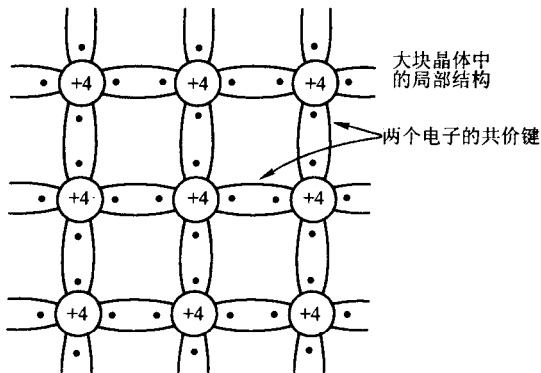


图 1.1.2 单晶体的共价键结构

应当指出,每个共价键中的电子只属于两个原子所共有,它们被束缚在这两个原子附近,不加外加能量是不能乱跑的,因此单晶硅和单晶锗中的共价键电子称为束缚电子。

2. 本征激发

本征半导体中,价电子都被束缚在共价键中,在绝对温度(-273°C)或无外界激发时,不存在自由电子,这时的半导体不能导电,相当于绝缘体。但是当半导体的温度升高或受到光的照射时,本征半导体中某些价电子因受热而获得能量,能够挣脱共价键束缚离开原子成为自由电子。实际上,半导体中价电子所受束缚不像绝缘体那样紧,只要在室温条件下,便有一些价电子脱离共价键而成为自由电子,如图 1.1.3 所示。所以,在室温条件下,本征半导体便具有一定的导电能力。

必须指出的是,在共价键中的电子挣脱束缚状态成为自由电子之后,它原来所在的共价键位置上留下了一个空位,这个空位就叫做空穴。带有空穴的原子因少了一个电子而带正电,把这个正电看成是空穴所带的正电荷量。所以自由电子与空穴在本征半导体中

总是成对出现的,这种现象称之为本征激发。

和自由电子一样,空穴在半导体中也可以自由运动,因为在晶体中当某一个共价键中出现一个空穴后,这个空穴所带的正电荷就会吸引附近共价键内的价电子,使它容易转移到这个空穴上来。依靠空穴所带正电荷的吸引力,使共价键中电子获得额外能量以实现这种转移。值得注意的是,临近的价电子向空穴的转移,也就是空穴以相反的方向从原处转移到邻近键上。所以空穴的运动方式和自由电子的运动方式不同,其运动的实质是价电子填补共价键上空位的结果,如图 1.1.4 所示,图中用圆圈表示空穴。如果在 x_1 处出现一个电子的空位, x_2 处的电子便可以填补到这个空位,从而使空位由 x_1 移到 x_2 。如果接着 x_3 处的电子又填补到 x_2 处出的空位,这样空位又由 x_2 移到 x_3 。在这一过程中,电子由 $x_3 \rightarrow x_2 \rightarrow x_1$,而空位由 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$ 。

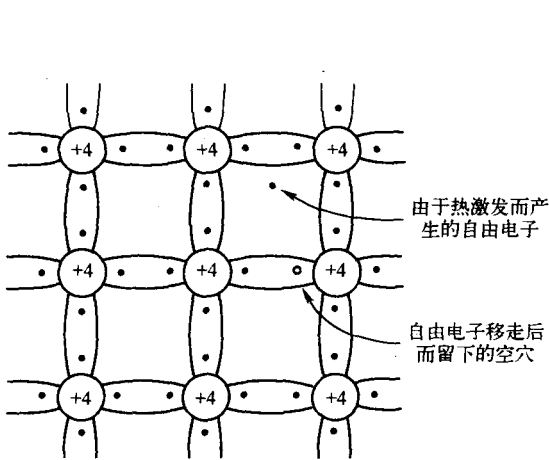


图 1.1.3 本征激发产生电子-空穴对

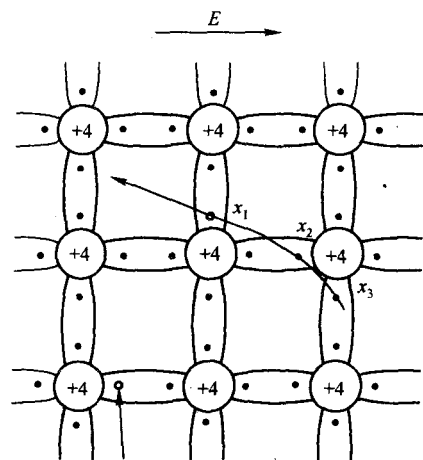


图 1.1.4 电子与空穴的移动

可见,半导体中有两种载流子:自由电子载流子和空穴载流子,简称为电子和空穴。

本征激发使本征半导体内产生了自由电子和空穴两种载流子,而且总是成对出现的,所以在本征半导体内两种载流子的数目总是相等的,整个半导体对外仍处于电中性。

3. 半导体中载流子的浓度

由于热激发使半导体内不断产生电子空穴时,那么,电子空穴对是否会越来越多、浓度越来越大呢?理论和实验表明,在一定的温度下,电子的浓度和空穴的浓度都保持一个定值。这是因为半导体中一方面由于热激发不断产生电子空穴对,另一方面自由电子在运动中释放能量又填入空穴,恢复共价键,称为复合,这时电子空穴对消失。当温度一定时,产生与复合相当,达到动态平衡,使自由电子浓度和空穴浓度一定。在常温下,如 300 K 时,锗的浓度为 $2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$,而硅为 $1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。必须指出,本征激发产生的电子空穴的数目和原子密度 ($4.96 \times 10^{22}/\text{cm}^3$) 比较几乎是微不足道的,例如硅,其比例为 3 万亿分之一,所以本征半导体的导电能力很差。当温度升高,本征激发增加,导电能力增强,这一点称为它的热敏特性,利用这一特性可以制成热光敏器件。