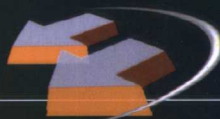
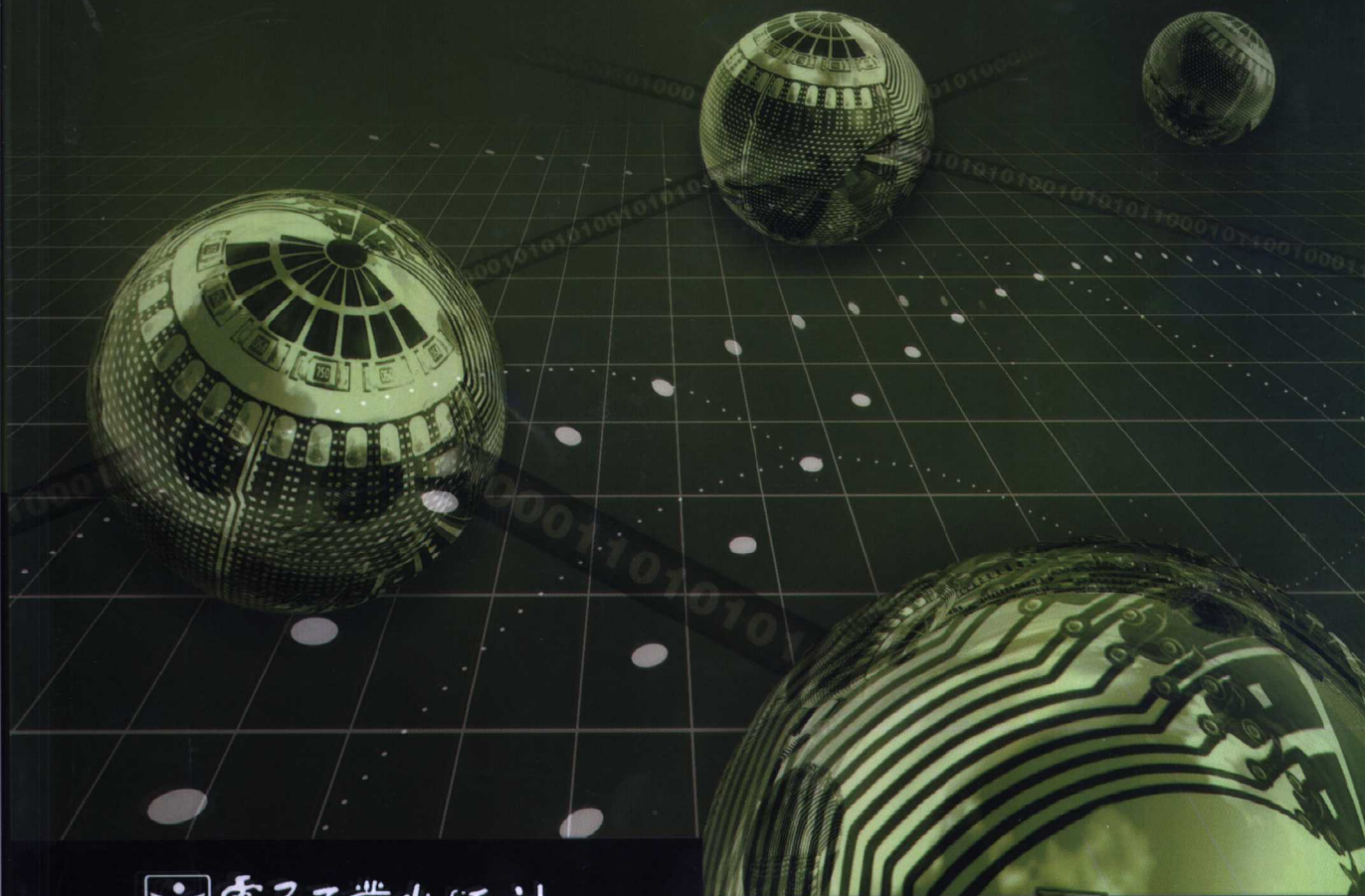


高等学校电子信息与电气学科基础教材



模拟电子技术

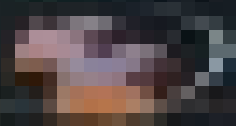
高吉祥 主编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

教育部“十三五”普通高等教育规划教材



模拟电子技术

（第2版）

电子工业出版社

（北京）

高等学校电子信息与电气学科基础教材

模拟电子技术

高吉祥 主编

高天万 副主编

陈 和 朱卫华 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是根据原国家教委颁布的《电子技术基础课程教学基本要求》编写的。主要内容有:半导体器件、放大电路基础、放大电路的频率响应、集成运算放大器、放大器中的反馈、集成运算放大器的应用、功率放大电路和直流稳压电源。

本书内容简明扼要,深入浅出,便于自学,同时注意实际应用能力的培养。可作为高等学校电气类、电子类、自动化类、计算机类和其他相近专业的基础教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/高吉祥主编. —北京:电子工业出版社,2004.2

高等学校电子信息与电气学科基础教材

ISBN 7-5053-9594-7

I. 模… II. 高… III. 模拟电路—电子技术—高等学校:技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第002543号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印刷者:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:23 字数:518千字

印 次:2004年2月第1版

印 数:5000册 定价:30.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

本书是为高等学校电气类、电子类、自动化类、计算机类和其他相近专业而编著的教材。全书分为8章。第1章半导体器件,主要介绍半导体的特性、半导体二极管单向导电的机理、伏安特性和主要参数。介绍了稳压管、变容二极管、双极型三极管和场效应管的结构、工作原理、伏安特性和主要参数;第2章放大电路的基础,主要介绍了晶体三极管(或场效应管)共射极(或共源极)电路的组成、工作原理和基本分析方法,并对工作点的稳定问题进行讨论。然后介绍了单管共集电极(或场效应管共漏极)电路以及晶体三极管共基电路的组成、工作原理和分析方法。最后对多级放大电路进行简单介绍;第3章放大电路的频率响应,主要介绍了频率响应的一般概念,三极管的频率参数和单管共射放大电路的频率响应。最后对多级放大电路的频率响应进行了介绍;第4章集成运算放大电路,主要介绍了集成电路的特点及基本电路结构,电流源电路、差动放大电路、直流电平移动电路,复合管结构电路以及输出电路。并对F007集成运放电路进行了具体分析。最后介绍了集成运放的主要参数和电路模型;第5章放大器中的反馈,主要介绍了反馈的概念和一般表达式,负反馈放大电路的4种组态,深度负反馈放大电路的计算以及负反馈对放大电路性能的影响。最后介绍了负反馈放大电路产生自激的原因及消除方法;第6章集成运算放大器的应用,主要介绍了运算电路,信号处理中的放大电路,有源滤波电路,电压比较器,模拟乘法器的结构、工作原理及应用,正弦波发生器,非正弦波发生器以及波形变换电路;第7章功率放大电路,主要介绍了互补对称式功率放大电路和集成功率放大电路;第8章直流稳压电源,主要介绍了直流电源的组成,小功率整流滤波电路,硅稳压管稳压电路,串联型直流稳压电路,集成稳压器以及开关型稳压电路。

根据高等教学大纲的要求,多年来教学实践和各类大学生电子制作竞赛的需要,本书不仅包括现行《模拟电子技术基础》教科书的基本知识和理论,而且列举了集成运放电路的各种应用。

本书可作为本科生、大专生教材,同时也可以为从事电子工程的工程师提供有益的参考资料。

本书配套的教材有:

1.《电子技术基础实验与课程设计》

高吉祥主编,易凡副主编,丁文霞、陆珉、刘安芝编著,电子工业出版社出版。

2.《模拟电子技术习题精解与考研指南》

高吉祥主编,朱卫华、盛义发、朱慧玲编著,电子工业出版社即将出版。

我们编写的原则是:“确保基础、精选内容、加强概念、推陈出新、联系实际、侧重集成”。目的在于保证学生把基本内容学到手的基础上,培养学生分析、处理实际问题的能力。考虑到近几年来电子技术和电子工业的高速发展,本书增加了新技术和新器件的内容。同时为了方便各学校教师教学,我们开发了多媒体 CAI 课件,为任课老师提供教学支持,索取课件的老师请发 E-mail 到 chenxl@phei.com.cn,或电话 010-68216264 垂询。

本书由国防科技大学、南华大学联合编著。高吉祥主编,高天万副主编,陈和、朱卫华编著。第 1,2,3 章由高吉祥、刘启顺执笔,第 4,5,6 章由高天万、高吉祥、盛义发执笔,第 7 章由陈和执笔,第 8 章由朱卫华执笔。在编著过程中得到南华大学凌球校长和国防科技大学电子科学与工程学院副院长唐朝京、易凡副主任的大力支持和具体指导。本书由谭志恒、卢启中主审。刘安芝、唐东、高广珠、王彦、王浩宇、黄智伟、朱慧玲、徐祖华、陈忠泽、王旭东、陆珉、闫伟等人为本教材的编写做了大量的工作,在此表示感谢。

作者

2003 年 12 月

常用文字符号说明

一、常用符号

(1) 电流和电压

I_B 、 U_{BE}	大写字母、大写下标表示直流量
I_b 、 U_{be}	大写字母、小写下标表示交流有效值
$\dot{I}_b$ 、 $\dot{U}_{be}$	大写字母上面加点、小写下标表示正弦相量
i_B 、 u_B	小写字母、大写下标表示总瞬时值
i_{be} 、 u_{be}	小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值

(2) 直流电源电压

V_{CC}	双极型三极管集电极直流电源电压
V_{BB}	双极型三极管基极直流电源电压
V_{EE}	双极型三极管发射极直流电源电压
V_{DD}	场效应管漏极直流电源电压
V_{GG}	场效应管栅极直流电源电压
V_{SS}	场效应管源极直流电源电压

(3) 电阻

R	大写字母表示电路中外接的电阻或电路的等效电阻
r	小写字母表示器件的等效电阻

二、基本符号

1. 电流和电压

I_i 、 U_i	输入电流、输入电压
$\dot{I}_i$ 、 $\dot{U}_i$ ($\dot{I}_d$ 、 $\dot{U}_d$)	净输入电流、净输入电压
I_o 、 U_o	输出电流、输出电压
$U_{o(AV)}$	输出电压平均值
U_{om}	最大输出电压
I_f 、 U_f	反馈电流、反馈电压
I_Q 、 U_Q	静态电流、静态电压
U_{REF}	参考电压
U_s	信号源电压

U_T	温度的电压当量
I_+, U_+	集成运放同相输入端的电流、电压
I_-, U_-	集成运放反相输入端的电流、电压

2. 功率

P	功率的通用符号
P_o	输出交变功率
P_{om}	输出交变功率最大值
P_V	电源提供的直流功率

3. 频率

BW	通频带
f_H	放大电路的上限(−3dB)频率
f_L	放大电路的下限(−3dB)频率
f_o	振荡频率、谐振频率
ω	角频率的通用符号

4. 电阻、电容、电感、阻抗

R_i, R_o	电路的输入电阻、输出电阻
R_{if}, R_{of}	有反馈时电路的输入电阻、输出电阻
R_L	负载电阻
R_S	信号源内阻
G	电导的通用符号
C	电容的通用符号
L	电感的通用符号
X	电抗的通用符号
Z	阻抗的通用符号

5. 增益或放大倍数, 反馈系数

A	增益或放大倍数的通用符号
A_c	共模电压放大倍数
A_d	差模电压放大倍数
A_i	电流放大倍数
A_u	电压放大倍数
A_{uf}	有反馈时的电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数
F	反馈系数的通用符号

三、器件符号

1. 器件及引脚名称

D	场效应管的漏极
G	场效应管的栅极
S	场效应管的源极
VD	二极管
VD _Z	稳压管
VT	双极型三极管,场效应管
b	双极型三极管的基极
c	双极型三极管的集电极
e	双极型三极管的发射极

2. 器件参数

A_{od}	集成运放的开环差模电压增益
$C_{b'c}$	集电结等效电容
$C_{b'e}$	发射结等效电容
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
$I_{C(AV)}$	整流二极管平均电流
I_S	二极管反向饱和电流
I_Z	稳压管稳定电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
I_{IO}	集成运放输入失调电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
S_R	集成运放转换速率
U_Z	稳压管稳定电压
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时集电极—基极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时集电极—发射极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时发射极—基极之间的反向击穿电压
U_{CES}	集电极—发射极之间的饱和管压降
U_{icm}	集成运放最大共模输入电压
U_{idm}	集成运放最大差模输入电压

U_{IO}	集成运放输入失调电压
U_P	场效应管的夹断电压
U_T	场效应管的开启电压
BW_G	集成运放的单位增益带宽
f_T	双极型三极管的特征频率
f_a	共基截止频率
f_β	共射截止频率
g_m	跨导
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结微变等效电阻
r_{be}	共射接法下基极—发射极之间的微变等效电阻
r_{ce}	共射接法下集电极—发射极之间的微变等效电阻
r_{DS}	场效应管漏极—源极之间的微变等效电阻
r_{GS}	场效应管栅极—源极之间的微变等效电阻
r_{id}	集成运放差模输入电阻
α	共基电流放大系数
$\bar{\alpha}$	共基直流电流放大系数
α_{TIO}	集成运放输入失调电流温漂
α_{UIO}	集成运放输入失调电压温漂
β	共射电流放大系数
$\bar{\beta}$	共射直流电流放大系数

四、其他符号

D	非线性失真系数
K	热力学温度
K_{CMR}	共模抑制比
M	互感系数
Q	品质因数
S	整流电路的脉动系数
S_r	稳压系数
T	周期, 温度
η	效率
τ	时间常数
φ	相位角

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体的特性	(1)
1.1.1 本征半导体	(2)
1.1.2 杂质半导体	(3)
1.2 半导体二极管	(4)
1.2.1 PN 结及其单向导电性	(4)
1.2.2 二极管的伏安特性	(6)
1.2.3 二极管的主要参数	(9)
1.2.4 稳压管	(9)
1.2.5 变容二极管	(12)
1.3 双极型三极管	(14)
1.3.1 三极管的结构	(15)
1.3.2 三极管的放大作用和载流子的运动	(16)
1.3.3 三极管的特性曲线	(20)
1.3.4 三极管的主要参数	(26)
1.3.5 PNP 型三极管	(28)
1.4 场效应三极管	(29)
1.4.1 结型场效应管	(30)
1.4.2 绝缘栅型场效应管	(36)
1.4.3 场效应管的主要参数	(42)
本章小结	(44)
习题一	(45)
第 2 章 放大电路的基础	(50)
2.1 放大的概念	(50)
2.2 放大电路的主要技术指标	(51)
2.3 单管共发射极放大电路	(54)
2.3.1 单管共发射极电路的组成	(54)
2.3.2 单管共发射极放大电路的工作原理	(55)

2.3.3	放大电路的基本分析方法	(55)
2.4	工作点的稳定问题	(71)
2.4.1	温度对静态工作点的影响	(71)
2.4.2	静态工作点稳定电路	(72)
2.5	单管共集电极电路和共基极放大电路	(75)
2.5.1	单管共集电极放大电路	(75)
2.5.2	单管共基极放大电路	(78)
2.5.3	三种基本组态的比较	(81)
2.6	场效应管放大电路	(83)
2.6.1	场效应管的特点	(83)
2.6.2	共源极放大电路	(84)
2.6.3	分压-自偏压式共源放大电路	(87)
2.6.4	共漏极放大电路	(90)
2.7	多级放大电路	(92)
2.7.1	多级放大电路的耦合方式	(92)
2.7.2	多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻	(98)
	本章小结	(99)
	习题二	(100)

第3章 放大电路的频率响应..... (107)

3.1	频率响应的一般概念	(107)
3.1.1	幅频特性和相频特性	(107)
3.1.2	下限频率、上限频率和通频带	(107)
3.1.3	频率失真	(108)
3.1.4	波特图	(109)
3.2	三极管的频率参数	(113)
3.2.1	共射截止频率	(113)
3.2.2	特征频率	(114)
3.2.3	共基截止频率	(114)
3.3	单管共射放大电路的频率响应	(115)
3.3.1	混合 π 型等效电路	(116)
3.3.2	阻容耦合单管共射放大电路的频率响应	(118)
3.3.3	直接耦合单管共射放大电路的频率响应	(125)
3.4	多级放大电路的频率响应	(126)
3.4.1	多级放大电路的幅频特性和相频特性	(126)

3.4.2 多级放大电路的上限频率和下限频率	(127)
本章小结	(128)
习题三	(128)
第4章 集成运算放大电路	(131)
4.1 集成电路的特点及基本电路结构	(131)
4.1.1 集成电路的特点	(131)
4.1.2 参数补偿式运算放大器的基本结构	(132)
4.2 电流源电路	(132)
4.2.1 比例电流源	(133)
4.2.2 微电流源	(134)
4.2.3 精密镜像恒流源电路	(134)
4.3 差动放大电路	(135)
4.3.1 差动放大电路的静态分析	(136)
4.3.2 差动放大电路对差模信号的放大作用	(136)
4.3.3 差模放大电路对共模信号的抑制作用	(137)
4.3.4 单端输入差动放大电路	(139)
4.3.5 具有恒流源的差动电路	(139)
4.4 直流电平移动电路	(141)
4.5 复合管结构	(141)
4.6 集成运算放大器的输出电路	(142)
4.7 集成运算放大电路简介	(143)
4.7.1 F007 双极型集成运算放大器	(144)
4.7.2 COMS 集成运算放大电路	(146)
4.8 集成运算放大器的主要参数	(149)
4.9 集成运算放大器的电路模型	(151)
4.9.1 集成运算放大器的开环电压传输特性	(152)
4.9.2 集成运算放大器线性工作的低频模型	(152)
4.9.3 集成运算放大器的理想化模型	(153)
本章小结	(153)
习题四	(154)
第5章 放大器中的反馈	(158)
5.1 反馈的概念和一般表达式	(158)
5.2 负反馈放大电路的组态	(159)
5.2.1 电压串联负反馈放大电路	(160)

5.2.2	电压并联负反馈放大电路	(161)
5.2.3	电流串联负反馈放大电路	(162)
5.2.4	电流并联负反馈放大电路	(163)
5.3	深度负反馈放大电路的计算	(167)
5.4	负反馈对放大电路性能的影响	(169)
5.4.1	提高放大倍数的稳定性	(169)
5.4.2	减小非线性失真和抑制干扰	(170)
5.4.3	展宽频带	(171)
5.4.4	改变输入电阻和输出电阻	(174)
5.5	负反馈对放大电路的自激及消除	(179)
5.5.1	自激的原因和产生条件	(179)
5.5.2	利用环路增益波特图判别是否产生自激振荡	(180)
5.5.3	负反馈放大电路自激振荡的消除方法	(181)
本章小结		(184)
习题五		(185)
第6章 集成运算放大器的应用		(189)
6.1	运算电路	(189)
6.1.1	比例运算电路	(189)
6.1.2	求和电路	(192)
6.1.3	微分和积分电路	(195)
6.1.4	对数和指数运算电路	(199)
6.1.5	乘法与除法电路	(203)
6.2	信号处理中的放大电路	(204)
6.2.1	集成运放性能对运算误差的影响	(204)
6.2.2	精密放大电路	(206)
6.2.3	电荷放大器	(208)
6.2.4	隔离放大器	(209)
6.2.5	放大电路中的干扰和噪声及其抑制措施	(210)
6.3	滤波电路	(211)
6.3.1	滤波电路的基本知识	(211)
6.3.2	低通滤波电路	(214)
6.3.3	其他滤波电路	(218)
6.4	电压比较器	(223)
6.4.1	单限比较器	(224)

6.4.2	滞回比较器	(224)
6.4.3	窗口比较器	(225)
6.4.4	集成电压比较器	(226)
6.5	乘法器及应用	(227)
6.5.1	模拟乘法器简介	(227)
6.5.2	变跨导模拟乘法器工作原理	(229)
6.5.3	模拟集成乘法器	(231)
6.5.4	乘法器的主要参数	(235)
6.5.5	乘法器的应用举例	(236)
6.6	正弦波发生器	(245)
6.6.1	反馈振荡器的原理	(245)
6.6.2	RC 正弦波振荡电路	(246)
6.6.3	LC 正弦振荡器	(254)
6.6.4	石英晶体振荡器	(265)
6.7	非正弦波发生电路	(275)
6.7.1	矩形波发生电路	(275)
6.7.2	三角波发生电路	(277)
6.7.3	锯齿波发生电路	(278)
6.8	波形变换电路	(279)
6.8.1	三角波变换成锯齿波电路	(279)
6.8.2	三角波变换成正弦波电路	(280)
* 6.9	利用集成运放实现的信号转换电路	(281)
6.9.1	电流—电压的相互变换电路	(281)
6.9.2	电压—频率变换电路	(283)
	本章小结	(286)
	习题六	(290)
第 7 章	功率放大电路	(299)
7.1	概述	(299)
7.1.1	对功率放大电路的一般要求	(299)
7.1.2	功率放大器提高效率的主要途径	(300)
7.2	互补对称式功率放大器	(301)
7.2.1	无输出电容的互补对称式功率放大器(OCL 电路)	(302)
7.2.2	无输出变压器的互补对称式功率放大器(OTL 电路)	(304)
7.2.3	桥式推挽功率放大电路(BTL)	(306)

7.2.4 互补对称式功率放大器的效率	(306)
7.3 集成功率放大电路	(308)
7.3.1 集成功率放大器 LM386 简介	(308)
7.3.2 集成功率放大电路的应用	(310)
本章小结	(313)
习题七	(313)
第 8 章 直流稳压电源	(315)
8.1 直流电源的组成	(315)
8.2 小功率整流滤波电路	(316)
8.2.1 单相桥式整流电路	(316)
8.2.2 滤波电路	(318)
8.3 硅稳压管稳压电路	(323)
8.3.1 稳压电路的主要指标	(323)
8.3.2 硅稳压管的伏安特性	(324)
8.3.3 硅稳压管稳压电路	(324)
8.4 串联型直流稳压电路	(328)
8.4.1 电路组成和工作原理	(328)
8.4.2 输出电压的调节范围	(329)
8.4.3 调整管的选择	(330)
8.4.4 稳压电路的过载保护	(333)
8.5 集成稳压器	(335)
8.5.1 三端集成稳压器的组成	(335)
8.5.2 三端集成稳压器的主要参数	(337)
8.5.3 三端集成稳压器的应用	(337)
8.6 开关型稳压电路	(341)
8.6.1 开关型稳压电路的特点和分类	(342)
8.6.2 开关型稳压电路的组成和工作原理	(343)
本章小结	(345)
习题八	(346)
参考文献	(353)

第 1 章 半导体器件

内容提要

半导体器件是组成各种电子电路的基础。本章首先介绍半导体的特性,半导体中载流子的运动,阐明 PN 结的单向导电性;然后介绍半导体二极管、稳压管、变容二极管、双极型三极管以及场效应三极管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体的特性

自然界的各种物质,根据其导电能力的差别,可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。通常将电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为导体,例如银、铜和铝等金属材料都是良好的导体。电阻率大于 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质一般称为绝缘体,例如橡胶、塑料等。导电性能介于导体和绝缘体之间的一大类物质统称为半导体。大多数半导体器件所用的主要材料是硅(Si)和锗(Ge)。

半导体的导电性能是由其原子结构决定的。以硅为例,它的原子序数是 14,在硅原子中共有 14 个电子围绕原子核旋转,最外层轨道上有 4 个电子,如图 1.1.1(a)所示。原子外层轨道上的电子通常称为价电子。锗的原子序数是 32,但它与硅有一个共同点,即原子量最外层的轨道上也有 4 个价电子,所以硅和锗都是 4 价元素。为了方便起见,常常用带 +4 电荷的正离子和周围的 4 个价电子来表示一个 4 价元素的原子,如图 1.1.1(b)所示。

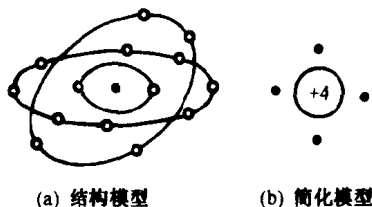


图 1.1.1 硅原子的结构模型和简化模型

在硅(或锗)的晶体中,原子在空间排列成规则的晶格。其中每个原子最外层的价电子,不仅受到自身原子核的束缚,同时还受到相邻原子核的吸引。因此,价电子不仅围绕自身的原子核运动,同时也出现在围绕相邻原子核的轨道上。于是,两个相邻的原子共有