

江苏省高等学校精品教材

新世纪电子信息课程系列规划教材

模拟电子技术

MONI DIANZI JISHU

主 编 成 立 杨建宁



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

江苏省高等学校精品教材

新世纪电子信息课程系列规划教材

模拟电子技术

主 编 成 立 杨建宁

参 编 王振宇 秦 云

主 审 顾宝良

东南大学出版社
南 京

内 容 提 要

本书是编者按照国家教育部电子电气类基础课程教学指导分委员会整理出的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求(讨论稿),综合了20多年来的教学经验,本着对电子电气信息类课程进行教改的思路编写而成的。书中内容以模拟集成电路为主,但保留了作为分立元件电路和集成电路共同基础的内容,重点放在讲清各种基本放大电路的组成及其分析方法、放大电路中的反馈和集成运放及其应用电路等方面。本书在编写过程中,采取了突出重点、分散难点和理论联系实际的方法。全书共分为9章,每章均有适量的例题和习题,书末还给出了部分习题答案。

全书条理清楚,具有可读性和可教性,适用于理工科高校相关专业(包括自动化、电气技术、电子信息工程、电子信息科学与技术、生物医学工程、通信、计算机、测控、机电一体化、光信息技术等)“模拟电子技术”课程的教学,也可供有关工程技术人员自学并参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/成立,杨建宁主编,—南京:东南大学出版社,2006.2(2010.7重印)

(新世纪电子信息课程系列规划教材)

ISBN 978-7-5641-0215-9

I. 模… II. ①成… ②杨… 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(2005)第155854号

模拟电子技术

出版发行 东南大学出版社
出版人 江汉
社 址 南京市四牌楼2号
邮 编 210096
电 话 (025)83792954 83362442(传真)
电 邮 zhu_min_seu@163.com
网 址 <http://www.press.seu.edu.cn>

经 销 全国各地新华书店
印 刷 兴化印刷有限责任公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 20.75
字 数 518千字
版 次 2006年2月第1版
印 次 2010年7月第3次修订印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-0215-9
印 数 7001-8600册
定 价 36.00元

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83793836)

前 言

自从 20 世纪 70 年代末以来,在国内电气类、电子信息类和自动化类专业“模拟电子技术”课程已经出版了一些教材,这些教材使用范围广,有的已经数次修订,深受高校工科电类专业广大师生的欢迎,有的已荣获国家级奖励或部、省级奖励。在这种情况下,还有没有必要在同一门课程上再编写新教材?如有必要,新教材又应该具有怎样的特色?这是两个首先涉及的问题。

对于同一门课程,我们认为,应该允许和鼓励教师编写不同风格的教材。由于不同风格的教材有的内容详尽且完备,有的处理得体而精练,所以适合于高校工科电类专业使用。从推陈出新、相得益彰的角度出发,编写不同风格的教材也是加强教材建设和提高教材质量的有效措施。多年来,教育部正是这样做的。许多教师在长期教学实践中的共同感受是:“模拟电子技术”这门课程,不仅内容与学时的矛盾很尖锐,而且内容繁杂,难教难学。某些现有的教材虽编写水平较高,但篇幅过长,教与学都感到不便;有的教材内容陈旧,甚至已经落伍;有的教材差错较多,学生意见较大。因此,编写一本既内容精练、时代气息较强,又能较好地满足教学需要的“模拟电子技术”教材,是我们多年来的愿望。

经过长达半年紧张而有序的工作,编写出了这本教材。它与国内同类教材相比,具有如下几个特点:

(1) 紧扣大纲,培养学生电子信息素质和处理信息知识的能力。我们紧紧扣住 2004 年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整理出的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求(讨论稿),注重在培养学生分析问题和解决问题的能力、实验动手和设计技能、实际应用能力,以及实行启发式教学,归纳小结、互动性教学和精讲多练等方面下了工夫。

(2) 处理得当,精工细作,打造精品。所编教材易教易学,具有一定的可教性、可读性和可操作性。例如:对于例题和习题的选配,加大了互动性教学和精讲多练的力度;对于学生能够看懂的内容,提供给学生课外阅读,这样既可培养学生的自学能力,又可节省课内学时数;因为新编教材可供制作多媒体课件之用,所以编写时在教材的条理性、图文并茂以及基本概念和分析方法的提炼与归纳上下了工夫。

(3) 精选例题和习题。所编教材的主要知识点都配备有例题,为学生课后阅读和练习提供了分析和解题的思路。另外,精选了一定数量的习题供学生练习,

书后给出了各章部分习题答案。

全书共分为9章。书中带“*”的章节和习题为任选内容。讲授本书所需的总学时数为75,其中各章的学时数建议分配如下:

章号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	实验
学时	9	9	8	6	9	9	6	5	3	11

教材编写的具体分工如下:江苏大学成立教授和杨建宁副教授担任主编;成立教授编写第1、2、5章和前言、目录、主要符号表并负责统稿、修改和定稿等,杨建宁副教授编写第3、4、6章,王振宇讲师编写第7章7.1节、7.2节、7.3节,第8章和附录,秦云讲师编写第7章7.4节、7.5节和第9章。在统稿和修改过程中,王振宇讲师、秦云讲师和汪洋讲师,研究生李加元、李华乐协助主编完成了大量的计算机图文处理、习题解答和校对工作,在此表示衷心的感谢。

本书由东南大学无线电系顾宝良教授担任主审。顾宝良教授认真、仔细地审阅了全书的文稿和图稿,提出了许多宝贵的意见和建议,给编者修改书稿以启示。参编教师随即重新修改,仔细斟酌,这对于提高教材质量起到了重要作用。值此教材出版之际,编者衷心感谢顾宝良教授、东南大学出版社领导和编辑给予本教材的热情支持和帮助。

限于编者的水平,所编教材还存在许多不完善的地方,恳请各位老师和广大读者给予批评指正。

编者

2005年10月于江苏大学

主要符号表

A	增益	g	微变电导
A_f	反馈放大电路的闭环增益	g_m	双口有源器件的跨导
A_i	电流增益	g	场效应管的栅极
A_u	电压增益	H	二端口网络的混合参数
A_{od}	开环电压增益	$h_{11e}, h_{12e}, h_{21e}, h_{22e}$	BJT 共射接法的 4 个 H 参数
A_{uc}	共模电压增益	I, i	电流
A_{ud}	差模电压增益	I_s	信号源电流
A_{uf}	闭环电压增益	I_i	输入电流
B	势垒	I_o	输出电流
b	BJT 的基极	I_L	空载电流
C	隔直、耦合电容	I_{IB}	输入偏置电流
C_B	势垒电容	I_{IO}	输入失调电流
$C_{b'c}$	基极-集电极电容	I_S	反向饱和电流
$C_{b'e}$	基极-发射极电容	I_{OM}	最大输出电流
C_D	扩散电容	I_{OS}	输出短路电流
C_E	发射极旁路电容	I_R	参考电流(基准电流)
C_F	反馈电容	J	电流密度
C_i	输入电容	K	热力学温度的单位(开尔文)
C_j	结电容	k	玻耳兹曼常数
C_o	输出电容	K_{CMR}	共模抑制比
c	BJT 的集电极	L	自感系数, 电感
D	扩散系数	l	长度
VD	二极管	M	互感系数
d	场效应管的漏极	N	电子型半导体
d	宽度	N	绕组匝数
E	能量	N_F	噪声系数
e	电子的电荷量	n_i	电子载流子浓度
e	BJT 的发射极、自然对数的底	P	功率
E_g	硅(锗)的激活能	P	空穴型半导体
F	反馈系数	p_i	空穴载流子浓度
F_u	电压反馈系数	Q, q	电荷, 品质因数
f	频率	Q	静态工作点
f_{BW}	通频带、频谱宽度、带宽	R	电阻(直流电阻或静态电阻)
f_L	放大电路的下限频率	R_B, R_C, R_E	BJT 的基极、集电极、发射极电阻
f_H	放大电路的上限频率	R_G, R_D, R_S	FET 的栅极、漏极、源极电阻
f_T	特征频率, 开关频率	R_s	信号源内阻
f_β	BJT 的共射截止频率	R_L	负载电阻
G	电导		

R_P	电位器(可变电阻)	$U_{(BR)EBO}$	集电极开路,发射极-基极反向击穿电压
r	动态电阻	$U_{(BR)CEO}$	基极开路,集电极-发射极反向击穿电压
r_{be}	BJT 的输入电阻	U_T	温度电压当量
r_{ce}	BJT 的输出电阻	U_R	参考电压(基准电压)
R_{ds}	漏-源极之间的沟道电阻	$U_{GS(off)}$	JFET、耗尽型 MOS 管的夹断电压
R_i	直流输入电阻	$U_{GS(th)}$	增强型 MOS 管的开启电压
R_O	直流输出电阻	V_{CC}	BJT 放大电路的正电源电压
R_i	放大电路的交流输入电阻	V_{DD}	FET 放大电路的正电源电压
R_o	放大电路的交流输出电阻	$-V_{CC}, -V_{EE}$	负电源电压
R_F	反馈电阻	X, x	电抗,反馈电路中的信号量
S	面积	Y, y	导纳
S	开关	Z, z	阻抗
s	复频率变量	α	BJT 共基接法的电流放大系数、稳压管的温度系数
s	场效应管的源极	β	BJT 共射接法的电流放大系数
S_R	转换速率	η	效率
T	温度(热力学温度以 K 为单位,摄氏温度用 $^{\circ}C$ 表示)	ϵ	半导体材料的介电常数
T	变压器	ϵ_{in}	PN 结内电场
t	时间	$\epsilon_{外}$	外加电压产生的外电场
U, u	电压	μ_r	BJT 的内部电压反馈系数
U_{bo}	PN 结内电场产生的电位差	ρ	电阻率
U_{IO}	输入失调电压	σ	电导率
U_i	输入电压	φ	相位角
U_o	输出电压	Φ	磁通
U_s	信号源电压	τ	时间常数、PN 结中非平衡少数载流子复合前的平均存在时间
U_{th}	二极管、BJT 或电压比较器的阈值电压	ω	角频率
U_{on}	二极管的正向导通电压降		
U_{BR}	反向击穿电压		
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路,集电极-基极反向击穿电压		

在电子电路原理图中,以 BJT 为例,各电压和电流的符号规定如下表所示。

电压/电流	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}	U_C	u_c	U_c	\dot{U}_c	$u_C = U_C + u_c$
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}	U_B	u_b	U_b	\dot{U}_b	$u_B = U_B + u_b$
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}	U_E	u_e	U_e	\dot{U}_e	$u_E = U_E + u_e$
发射极电流	I_{EE}	I_E	i_e	I_e	\dot{I}_e	$i_E = I_E + i_e$

注:在电子电路的交流通路和微变等效电路中,各元器件的电流、电压均标交流分量;当输入为正弦波信号时,标注 \dot{U}_i, \dot{I}_b 等;当输入为非正弦波信号,且电路当零输入零输出时,则标 u_i, u_o 等;对于输入为非正弦波信号,且当电路为零输入非零输出时,则标为 $\Delta u_i, \Delta u_o$ 等。

目 录

主要符号表	(1)
1 半导体器件	(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	(4)
1.1.3 PN 结及其特性	(6)
1.2 半导体二极管	(12)
1.2.1 二极管的结构和类型	(12)
1.2.2 二极管的伏安特性	(12)
1.2.3 二极管的参数	(13)
1.2.4 二极管的型号及其选择	(14)
1.2.5 二极管的应用电路及其分析方法	(14)
1.2.6 硅稳压管	(17)
1.3 双极型晶体三极管(BJT)	(18)
1.3.1 BJT 的结构	(18)
1.3.2 BJT 的电流分配与放大作用	(19)
1.3.3 共射接法 BJT 的特性曲线	(23)
1.3.4 BJT 的主要参数及其安全工作区	(26)
1.3.5 BJT 的类型、型号和选用原则	(29)
1.4 场效应晶体管(FET)	(30)
1.4.1 结型场效应管	(30)
1.4.2 绝缘栅场效应管	(34)
1.4.3 FET 的主要参数	(38)
1.4.4 FET 与 BJT 的比较	(39)
1.5 集成电路(IC)	(40)
* 1.5.1 IC 制造工艺	(40)
1.5.2 IC 的特点	(42)
习题 1	(43)
2 基本放大电路	(47)
2.1 晶体管放大电路的组成及其工作原理	(47)

2.1.1	放大的概念与放大电路的组成	(47)
2.1.2	共射基本放大电路的组成及工作原理	(48)
2.2	图解分析法	(49)
2.2.1	静态工作情况分析	(49)
2.2.2	动态工作情况分析	(51)
2.2.3	静态工作点的选择	(54)
2.3	微变等效电路分析法	(55)
2.3.1	BJT的低频小信号模型及其参数	(56)
2.3.2	用BJT的微变等效电路法分析共射基本放大电路	(59)
2.3.3	两种分析方法的比较	(62)
2.4	其他基本放大电路	(63)
2.4.1	分压式偏置稳定的共射放大电路	(63)
2.4.2	BJT共集放大电路(射极输出器)	(68)
2.4.3	BJT共基放大电路	(71)
2.4.4	3种组态BJT基本放大电路的比较	(73)
2.5	场效应管放大电路	(73)
2.5.1	FET放大电路的直流偏置及静态分析	(73)
2.5.2	用微变等效电路法分析FET放大电路	(76)
2.6	组合放大单元电路	(78)
2.6.1	共集-共射放大电路	(78)
2.6.2	共集-共集放大电路	(79)
2.6.3	共射-共基放大电路	(80)
	习题2	(81)
3	多级放大电路和集成运算放大器	(89)
3.1	多级放大电路	(89)
3.1.1	级间耦合方式	(89)
3.1.2	直接耦合多级放大电路的Q点配置和零点漂移问题	(92)
3.1.3	多级放大电路的分析	(94)
3.2	差动放大电路	(97)
3.2.1	差动放大电路的静态分析	(97)
3.2.2	差动放大电路的基本概念和抑制零点漂移的原理	(98)
3.2.3	差动放大电路的动态分析	(100)
3.2.4	带有射极恒流源的差动放大电路	(103)
3.3	集成运算放大器	(105)
3.3.1	集成运放的组成	(105)
3.3.2	电流源电路	(106)

3.3.3	集成运放的主要技术指标	(108)
3.3.4	典型的集成运放电路	(109)
习题 3	(111)
4	放大电路的频率响应	(116)
4.1	频率响应的基本概念和波特图	(116)
4.1.1	频率响应的基本概念	(116)
4.1.2	RC 低通电路的频率响应	(117)
4.1.3	RC 高通电路的频率响应	(120)
4.2	基本放大电路的高频响应	(121)
4.2.1	放大电路频率响应的研究方法	(121)
4.2.2	BJT 的高频物理模型——混合参数 π 形等效电路	(121)
4.2.3	BJT 共射电流放大系数 β 的频率响应	(125)
4.2.4	基本共射放大电路的频率响应	(127)
4.3	放大电路频率响应的改善与增益带宽积	(132)
4.4	多级放大电路的频率响应	(133)
4.4.1	多级放大电路的频率响应表达式和波特图	(133)
4.4.2	多级放大电路下限截止频率 f_L 的估算	(135)
4.4.3	多级放大电路上限截止频率 f_H 的估算	(135)
习题 4	(136)
5	反馈放大电路	(138)
5.1	反馈的基本概念和类型	(138)
5.1.1	反馈的基本概念	(138)
5.1.2	交流负反馈的组态及其判别方法	(139)
5.2	反馈放大电路的框图表示法	(144)
5.2.1	反馈放大电路的框图	(144)
5.2.2	框图中各信号量的含义及其量纲	(145)
5.2.3	闭环增益 \dot{A}_f 的一般表达式	(146)
5.2.4	反馈深度 $ 1+\dot{A}\dot{F} $	(146)
5.3	负反馈对放大电路性能的影响	(147)
5.3.1	提高闭环增益 A_f 的稳定性	(147)
5.3.2	展宽通频带	(148)
5.3.3	减小非线性失真,抑制干扰和噪声	(149)
5.3.4	负反馈对输入电阻和输出电阻的影响	(151)
5.4	负反馈的正确引入	(153)
5.5	负反馈放大电路的分析计算	(156)

5.5.1	深度负反馈放大电路的本质特点	(156)
5.5.2	深度负反馈放大电路的分析估算举例	(157)
5.6	负反馈放大电路中的自激振荡及其消除	(162)
5.6.1	产生自激的原因及其条件	(162)
5.6.2	负反馈放大电路的稳定性及自激振荡的消除	(163)
	习题 5	(167)
6	集成运算放大器的线性应用电路	(172)
6.1	集成运放的应用分类与分析方法	(172)
6.1.1	集成运放的应用分类	(172)
6.1.2	集成运放的电压传输特性	(172)
6.1.3	集成运放应用电路的分析方法	(173)
6.1.4	运算电路中集成运放的输入方式	(174)
6.2	基本运算电路	(174)
6.2.1	比例运算电路	(174)
6.2.2	加法和减法运算电路	(177)
6.2.3	积分和微分运算电路	(180)
6.2.4	对数和指数运算电路	(183)
6.2.5	集成运放组合电路分析举例	(185)
6.3	乘法和除法运算电路	(190)
6.3.1	模拟乘法器	(190)
6.3.2	利用对数和指数电路的乘法电路	(190)
6.3.3	变跨导式模拟乘法电路	(191)
6.3.4	模拟乘法器的应用	(193)
6.3.5	除法运算电路	(195)
6.4	有源滤波电路	(196)
6.4.1	滤波电路的功能、分类和主要参数	(196)
6.4.2	有源滤波电路的分析方法	(198)
6.4.3	有源滤波电路举例	(198)
*	6.5 集成运放应用中的实际问题	(204)
	习题 6	(207)
7	信号产生电路	(212)
7.1	正弦波振荡器的自激条件及其一般问题	(212)
7.1.1	正弦波振荡器产生振荡的条件	(212)
7.1.2	正弦波振荡器的组成及分析方法	(213)
7.2	RC 桥式正弦波振荡器	(214)

7.2.1	RC 串并网络的选频特性	(214)
7.2.2	RC 桥式正弦波振荡器的分析	(215)
7.3	LC 正弦波振荡器	(218)
7.3.1	LC 谐振回路的选频特性	(218)
7.3.2	变压器耦合式 LC 正弦波振荡器	(219)
7.3.3	LC 三点式正弦波振荡器	(219)
7.3.4	石英晶体振荡器	(221)
7.4	电压比较器及非正弦波发生电路	(223)
7.4.1	电压比较器	(223)
7.4.2	非正弦波发生电路	(227)
*7.5	压控振荡器	(234)
	习题 7	(235)
8	功率放大电路	(241)
8.1	概述	(241)
8.2	单管甲类功率放大电路	(243)
8.3	互补对称功率放大电路	(244)
8.3.1	乙类互补对称功放电路	(244)
8.3.2	甲乙类互补对称功放电路	(249)
8.3.3	功放电路中功率管的选择	(251)
8.4	实际的功率放大电路	(251)
8.4.1	OCL 准互补功放电路	(251)
8.4.2	采用集成运放的 OCL 准互补功放电路	(254)
8.4.3	单电源供电的 OTL 功放电路	(255)
8.4.4	集成功率放大器	(256)
*8.5	功率器件	(259)
8.5.1	功率 BJT	(259)
8.5.2	功率 MOSFET	(263)
8.5.3	功率模块	(264)
	习题 8	(264)
9	直流稳压电源	(269)
9.1	概述	(269)
9.2	整流电路	(270)
9.2.1	整流电路的技术指标	(270)
9.2.2	单相半波整流电路	(270)
9.2.3	单相桥式整流电路	(272)

9.3 滤波电路	(275)
9.3.1 电容滤波电路	(275)
* 9.3.2 电感电容滤波电路	(277)
* 9.3.3 π 形滤波电路	(278)
9.4 稳压电路	(278)
9.4.1 稳压电路的功能和性能指标	(278)
9.4.2 硅稳压管稳压电路	(279)
9.4.3 线性串联型稳压电源	(282)
* 9.4.4 稳压电路的保护措施	(285)
9.4.5 集成稳压器及其应用电路	(286)
9.4.6 串联开关式稳压电源	(291)
* 9.5 直流变换型电源	(292)
习题 9	(294)
附录	(298)
附录 A 半导体器件型号命名方法	(298)
附录 B 国产半导体集成电路型号命名方法	(299)
附录 C 常用运算放大器国内外型号对照表	(301)
附录 D 模拟集成乘法器电路及其主要参数	(302)
附录 E 电源专用集成电路	(305)
附录 F 密勒定理及其证明	(308)
附录 G 常用 ADC 和 DAC 芯片简介	(310)
附录 H 电阻器型号、名称和标称系列	(312)
部分习题答案	(313)
参考文献	(319)

1 半导体器件

引言 半导体器件是现代电子技术的重要组成部分,由于具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点,所以得到了广泛的应用。集成电路特别是大规模和超大规模集成电路正在不断地更新换代,致使半导体器件的应用以及电子设备在微型化、可靠性和电子系统设计灵活性等方面都有了重大的进步,因此,电子技术(包括模拟电子技术和数字电子技术)已经成为 21 世纪高新技术的龙头。

本章首先简要介绍半导体的基础知识,接着讨论半导体器件的核心环节——PN 结,然后重点讨论半导体二极管和半导体三极管[包括双极型晶体三极管(BJT)和场效应晶体三极管(FET)],最后简要介绍了集成电路及其生产工艺。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 本征半导体

1) 半导体

自然界中存在的各种各样不同性质的物质,按其导电能力的强弱分为导体、绝缘体和半导体。导电能力介于导体与绝缘体之间的一类物质称为半导体。在制备半导体器件时,目前最常用的材料是硅(Si)和锗(Ge)半导体^①。然而,除了在导电能力方面与导体和绝缘体有所不同外,半导体还具有区别于其他物质的一些特点,例如,当它受到外界光和热的刺激时,或在纯净的半导体中加入微量的杂质后,其导电能力将会显著增强。工程中利用半导体的这些特性,可以制备各种性能各异的半导体器件。

半导体的原子结构及其导电机理决定了它们的性质。为了从电路的观点理解半导体器件的性能,首先必须从物理的角度了解它们是如何工作的。因此,下面着重从半导体材料的物理性质,以及这些性质对于制成半导体器件的伏安特性的原理来进行讨论。

2) 本征半导体的原子结构

工程中将高度提纯、原子按晶体排列结构的半导体晶体称为本征半导体。半导体 Si 和 Ge 在使用时都要经过工艺处理,制成本征半导体,称之为本征 Si 和本征 Ge。

Si 和 Ge 的原子序分别为 14 和 32,它们的原子结构如图 1-1(a)所示。图中外层电子受原子核的束缚力最小,称为价电子。由于 Si 和 Ge 的外层电子都是 4 个,所以 Si 和 Ge 均属 4 价元素。物质的化学性质是由价电子数决定的,因而半导体的导电性质也与价电子有关。为

^①Si 和 Ge 属于元素半导体。另有一类化合物半导体,例如砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)等,还有一类掺杂或制成其他化合物半导体的材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。化合物半导体器件在高频、高速、宽带及微波毫米波集成电路中具有明显的技术优势,目前国际上此类材料和器件的研发已经成为一大持续升温的热点领域^[2~4]。

了突出价电子的作用,原子结构可用简化模型表示,见图 1-1(b)。图中最外层的圆圈上具有 4 个价电子,+4 是惯性核,其电荷量(+4)为原子核和除价电子以外的内层电子电荷量之总和。

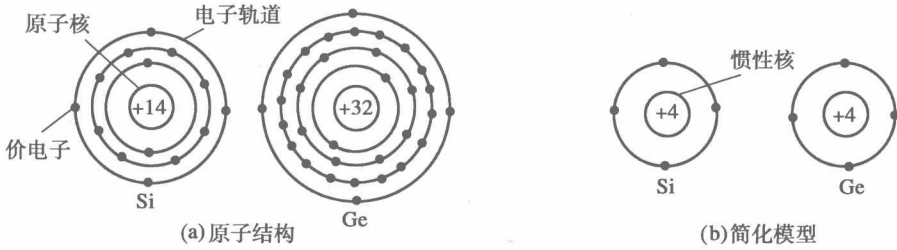


图 1-1 Si 和 Ge 的原子结构及其简化模型

在本征 Si(Ge)的晶体结构中,Si(Ge)原子按照一定的规律整齐排列,构成一定形式的空间点阵。由于原子之间的距离很近,价电子不仅受到所属原子核的作用,而且还受到相邻原子核的吸引,使原本属于某一原子的一个价电子被相邻的两个原子所共有,形成晶体中的共价键结构。共价键结构中每个 Si(Ge)原子的 4 个价电子与相邻的 4 个 Si(Ge)原子的各 1 个价电子分别组成 4 对共价键,结果使每个 Si(Ge)原子的最外层为拥有 8 个共有电子的稳定结构,如图 1-2 所示。

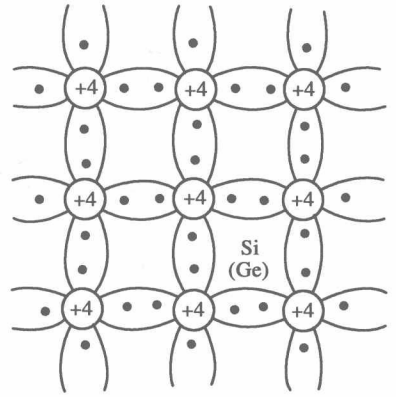


图 1-2 Si(Ge)晶体中的共价键结构

3) 本征半导体中的两种载流子——自由电子和空穴

从大学物理学中已知,金属导体的导电机理是导体中大量的带有负电荷的自由电子,它们在电场的作用下作定向移动而形成电流。因此,自由电子是金属导体中的载流子,且为唯一的一种载流子。

(1) 热力学温度 0 度(0 K)时本征半导体中无载流子

本征 Si(Ge)原子共价键上的两个电子受两个相邻原子核的共同束缚,故称为束缚电子。束缚电子与原子核间有较强的结合力,在热力学温度 0 K 且无外部激发能量时,本征 Si(Ge)的价电子不能挣脱原子核的束缚成为自由电子。此时在本征半导体中没有运载电荷的载流子,当外电场作用时不会产生电流。在这一条件下,本征 Si(Ge)是良好的绝缘体。

(2) 本征半导体受激发产生自由电子和空穴

价电子在外部能量作用下,脱离共价键而成为自由电子的过程称为激发,电子脱离共价键所需的最小能量称作激活能,用 E_g 表示,Si 的激活能 $E_g = 1.1 \text{ eV}$ (电子伏特),Ge 的激活能 $E_g = 0.68 \text{ eV}$ 。光照和热辐射都是激活能的来源。

① 本征半导体中的自由电子载流子

当共价键上的电子获得激活能后,就可挣脱共价键的束缚成为自由电子,它们是带负电荷量的粒子,称为载流子,如图 1-3 所示。因此,自由电子是本征半导体中的一种载流子。在外电场的作用下,自由电子将逆着电场方向运动而形成电流。载流子的这种运动称为漂移,所形

成的电流称为漂移电流。

② 本征半导体中的空穴载流子

价电子挣脱原子核的束缚成为自由电子后,在原来的共价键中便留下一个空位(见图 1-3 中的 a)。该空位会被相邻原子的价电子填补,而这一价电子原来的位置上又出现新的空位(见图 1-3 中的 b)。这样,在半导体中就出现了价电子填补空位的运动,使空位产生了移动,移动的空位称为空穴。在外电场的作用下,填补空位的价电子做定向移动也形成漂移电流,但这种价电子的填补运动是由空穴的产生而引起的,且始终在原子的共价键之间进行,故不同于自由电子在晶格中的运动。同时,价电子填补空位的运动无论在形式上还是在效果上都表明,空穴运动的方向与自由电子运动的方向相反。为了区别带电粒子的这两种方向相反的运动,把后一种运动称为空穴运动。空穴被看作是正电荷带电粒子——空穴载流子。需要注意的是:出现空穴载流子是半导体导电机理的一个重要特点。

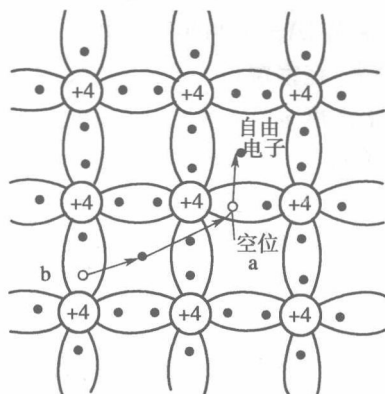


图 1-3 半导体中的两种载流子

综上所述,本征半导体中存在着两种载流子:带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴,它们是成对出现的,故亦称为电子空穴对。由于二者电荷量相等,极性相反,所以本征半导体呈电中性。它们受外电场的作用时,电子形成电子电流,空穴形成空穴电流。虽然两种载流子的运动方向相反,但因它们所带的电荷极性也相反,所以两种电流的实际方向是相同的,其和就是半导体中的电流。

4) 本征浓度——载流子的产生与复合

本征半导体受外界能量激发,产生电子空穴对,这一物理现象称为载流子的产生;而电子和空穴在无规则的热运动中相继碰撞而互相填补,使电子和空穴成对消失,这一过程称为载流子的复合。电子空穴对的产生和复合是半导体内不断进行着的一对矛盾运动。在一定的温度下,伴随电子空穴对的大量产生,其复合数量也在逐渐增加,最终使产生与复合达到动态平衡(载流子的产生和复合仍在不断进行,但单位时间内产生量和复合量相等)。此时半导体中自由电子和空穴浓度(1 cm^3 中的载流子数目)将保持一定的数值。若温度升高,本征激发增强,使载流子产生量大于复合量,这就打破了原有的平衡,载流子数量的增加又使电子和空穴的复合机会增多。所以在新的升高的温度下,载流子的产生和复合最终达到新的动态平衡。此时,虽然电子和空穴的数量仍相等,但是载流子浓度将稳定在较高的数值上。

总之,在本征半导体中,当温度一定时,空穴浓度 p_i 和电子浓度 n_i ^①(均称为本征载流子浓度)一定,并且相等。理论分析表明,Si 和 Ge 的本征载流子浓度与温度有关,可用下式表示:

$$n_i(T) = p_i(T) = AT^{3/2} e^{-E_g/(2kT)} \quad (1-1)$$

式中: E_g ——半导体激活能;

T ——热力学温度;

① p_i 和 n_i 的下标是 Intrinsic(固有的、本征的)的字头。

k ——玻耳兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K);

A ——与半导体材料有关的系数。

在室温(约 $27\text{ }^\circ\text{C}$)时,本征 Si 的载流子浓度 $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$,本征 Ge 的载流子浓度 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 。本征 Si(Ge)载流子浓度的差异是因激活能的不同而形成的。

本征载流子的浓度随温度的上升而迅速增加。因此,半导体的导电能力亦随温度的上升而显著增强,这是半导体导电的一个重要特性。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体的导电能力很弱,不能直接用来制备半导体器件。但如果在本征半导体中掺入微量的其他的元素,其导电能力会显著增强。掺入的元素称为杂质,掺杂后的半导体就称为杂质半导体。杂质半导体是制备半导体器件的材料。

根据掺入杂质的不同,将杂质半导体分为电子型半导体(N 型半导体)和空穴型半导体(P 型半导体)两种^①。由于 Si 和 Ge 具有相同的原子结构简化模型,掺杂机理也相同,所以下面均以 Si 半导体材料为例进行讨论。

1) N 型半导体

(1) N 型半导体的构成

按照制定的工艺流程,在本征 Si 中掺入微量的 5 价元素磷(或砷或锑等)构成 N 型半导体。因为磷(P)是微量的,故掺入后基本不会改变本征硅的晶体结构。但在晶体点阵的某些位置上,硅原子将被磷原子替代,如图 1-4(a)所示。磷原子的 5 个价电子中有 4 个与相邻的 4 个硅原子组成共价键,多余的 1 个价电子处于共价键之外,不受其束缚。同时,它受磷原子核的吸引力又很弱,故在室温下就能被激发,从而脱离磷原子成为自由电子(但应注意,产生电子的同时并不产生空穴)。这样,每个磷原子都能提供一个自由电子,从而使半导体中的自由电子的数量大增。因此,掺杂后半导体的导电能力大大增强^②。

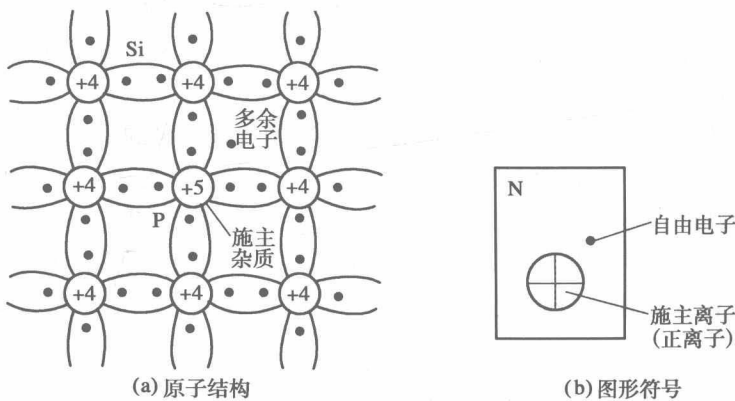


图 1-4 N 型半导体的原子结构和图形符号

^①N 和 P 分别是 Negative(负)和 Positive(正)的字头。

^②例如,已知本征硅的原子密度为 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$,当掺杂量为百万分之一(10^{-6})时,杂质浓度为 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。在常温下,本征硅的 $n_i = 1.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$,二者相差 10^6 数量级,即自由电子的数量比掺杂前净增 10^6 倍。