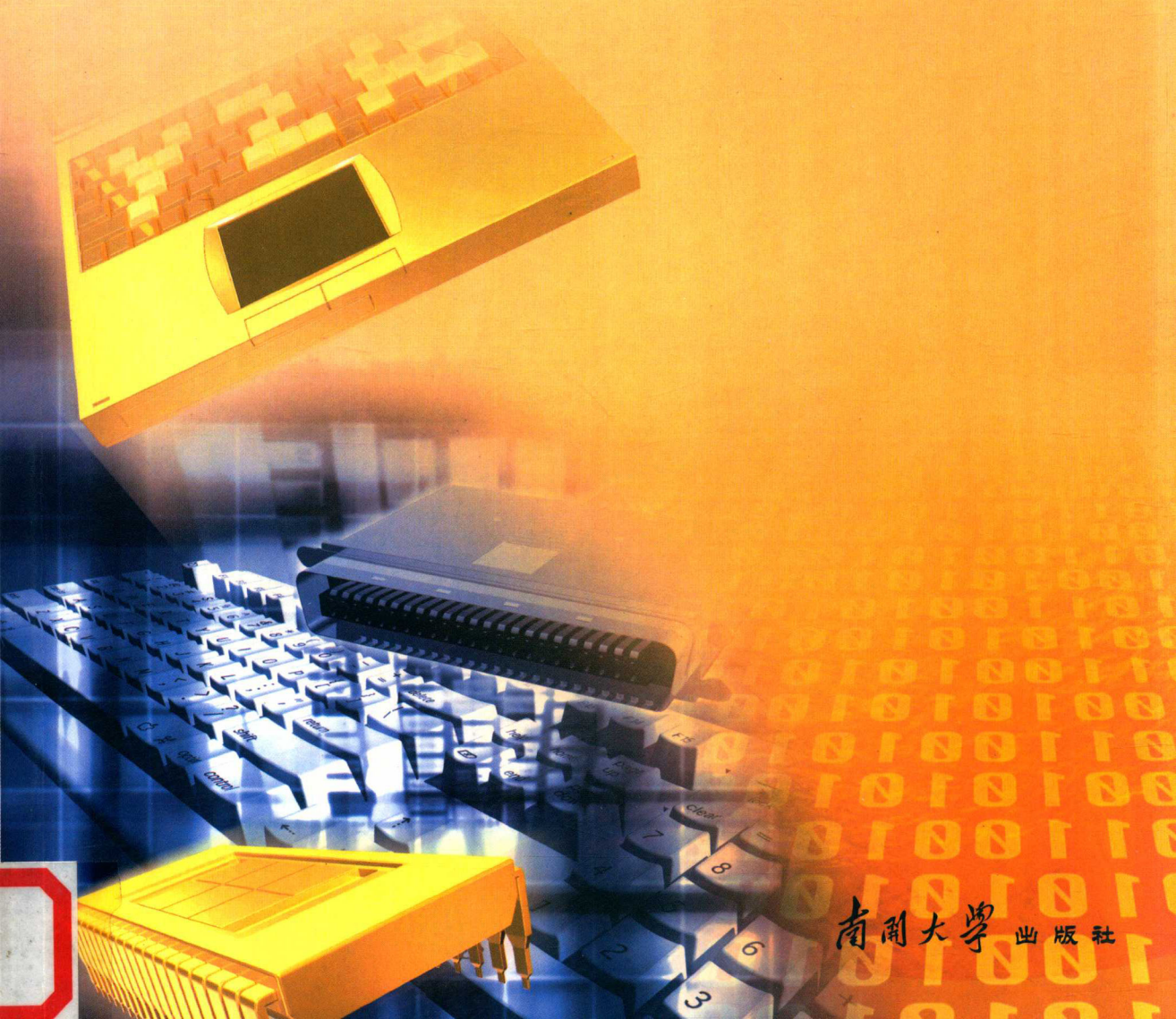




二十一世纪高等院校精品规划教材

MO NI DIAN ZI 模拟电子技术

吴显鼎 主编



南京大學出版社



二十一世纪高职高专精品规划教材

模拟电子技术

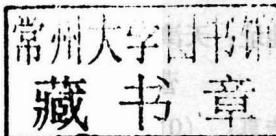
主 编 吴显鼎

副主编 贺素霞 张植才 吕琳琳

马志刚

参 编 蔡艳艳 乐丽琴 李海霞

李文方 李保珍



常州大学出版社

全书共分为11个章节,内容包括半导体器件、放大器电路分析基础、放大电路的频率特性、场效应管及放大电路、负反馈放大电路、直流放大电路及运放、集成运放的应用、波形产生电路、功率放大电路、直流稳压电源、电子电路读图。

本书配有常用文字符号说明、附录、电子电路识图等内容,并选用了一定数量的思考题和习题,以利于巩固理论和加深理解,为进一步学习电子技术的其他课程起到引导的作用。

本书可作为高职高专和本科院校的职业技术学院机电类相关专业教材,也可作为社会各种技能型人才教育培训以及社会其他相关从业人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 吴显鼎主编. — 天津:南开大学出版社, 2010.9

ISBN 978-7-310-03557-1

I. ①模… II. ①吴… III. ①模拟电路—电子技术
IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第154877号

南开大学出版社出版发行

出版人:肖占鹏

地址:天津市南开区卫津路94号 邮政编码:300071

营销部电话:(010) 58697906

营销部传真:(010) 59003964 邮购部电话:(010) 59003964

*

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

2010年9月第1版 2010年9月第1次印刷

787×1092毫米 16开本 21印张 495千字

定价:33.00 元

如遇图书印装质量问题,请与本社营销部联系调换,电话(010) 58697906

版权所有 侵权必究

前 言

本书常用文字符号说明

模拟电子技术是电子及相关工科类专业的一门专业基础课,在整个课程体系中起到了承上启下的重要作用。随着科学技术的日新月异、电子技术学科的迅速发展,原有电子技术课程教学内容和学时,已不能满足新技术发展的需要。这样编写一本既能满足课程培养方案及培养目标的基本要求,又具有一定特色的教材是我们一直以来的愿望。

我们在反复讨论基本要求的基础上,对教材内容作了精选安排,同时本教材在编写的过程中参考了大量的同类教材,又吸取其优点,因而本教材具有以下特点:①与以往教材相比,本教材教学内容遵循“轻内部结构分析,重元器件功能及应用”的原则,更偏向于与工程应用相结合。②注重基本概念、基本理论和基本分析方法,以及从上述“三基”延伸发展而成的重要内容要抓住重点、难点。③针对培养应用型人才和三本院校及高职高专院校的特点,从以下几个方面安排了教材内容:强化集成、淡化分立;强化外部特性、淡化内部器件原理;强化宏观设计、淡化微观细节;强化定性分析、淡化定量推导。④注重应用部分的编写,在基本内容中增加了应用实例、电子电路识图和附录部分。⑤突出了随着时代的发展新器件的应用性、新颖性、与时俱进的特点。⑥紧密结合现代电子科技的发展趋势,增加较新的电子产品的讲授,使学生的知识结构与科技发展相结合。

本书配有常用文字符号说明、电子电路识图、附录等内容,并选用了一定数量的思考题和习题,以利于巩固理论和加深理解,为进一步学习电子技术的其他课程起到引导的作用。

参加本书编写工作的有黄河科技学院吴显鼎、贺素霞、李海霞、乐丽琴、李文方、蔡艳艳,沧州职业技术学院张植才、吕琳琳,新乡职业技术学院马志刚,河北农业大学海洋学院李保珍。吴显鼎同志负责全书的审定工作。在编写过程中,作者参阅了许多同行专家们的论著文献,在此一并真诚致谢。

编者

本书常用文字符号说明

本书常用符号中,一个符号通常包含两部分内容即基本符号和下标。为了符号的统一和学习的方便,现将常用符号和表示的含义规定如下:

1. 元器件符号

VD	二极管
VT	三极管
VD _Z	稳压管
VS	可控硅
LED	发光二极管

2. 电压、电流符号

V_{CC}	三极管集电极直流电压
V_{EE}	三极管发射极直流电压
$\dot{U} \dot{I}$	正弦电压、电流相量表示形式
$\dot{U}_i \dot{I}_i$	输入电压、输入电流
$\dot{U}_i' \dot{I}_i'$	净输入电压、净输入电流
$\dot{U}_o \dot{I}_o$	输出电压、输出电流
U_{om}	输出电压最大值
$U_{o(AV)}$	输出电压平均值
$\dot{U}_S$	信号源电压
$\dot{U}_{REF}$	参考电压
I_B	大写字母、大写下标表示直流量
i_B	小写字母、大写下标表示含有直流成分电流瞬时值
i_b	小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值

3. 电阻

R_s	信号源内阻
R_i	输入电阻
R_o	输出电阻

R_{if}	具有反馈时的输入电阻
R_{of}	具有反馈时的输出电阻
R_f	反馈电阻
R_b	基极电阻
R_c	集电极外接电阻
R_e	发射极外接电阻
R_L	负载电阻
R_w	电位器

4. 功率

p	瞬时功率
P	平均功率
P_o	输出功率
P_c	集电极损耗功率
P_D	直流电源提供功率

5. 频率

f	频率通用符号
f_H	放大电路的上限截止频率
f_L	放大电路的下限截止频率
BW	通频带
f_{HF}	具有负反馈时放大电路的上限截止频率
f_{LF}	具有负反馈时放大电路的下限截止频率
f_{BWF}	具有负反馈时的通频带
f_α	共基极接法时三极管电路放大系数的上限截止频率
f_β	共发射极接法时三极管电路放大系数的上限截止频率
f_T	三极管的特征频率

6. 放大倍数、增益

A_u	电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数
A_{ud}	差模电压放大倍数
A_{uc}	共差模电压放大倍数
A_{od}	开环差模电压放大倍数
A_f	闭环电压放大倍数
A_{id}	开环差模电流放大倍数
A_{if}	闭环电流放大倍数

7. 器件参数

U_T	温度的电压当量	
I_D	二极管电流、漏极电流	
I_S	反向饱和电流、源极电流	
I_F	最大整流电流	
U_Z	稳压管稳定电压值	
I_Z	稳压管工作电流	
I_{ZM}	最大稳定电流	1
b	基极	1
c	集电极	2
e	发射极	2
I_{CBQ}	发射极开路,集—基极间反向饱和电流	3
I_{CEO}	基极开路,集—射极间穿透电流	3
I_{CM}	集电极最大允许电流	5
P	空穴型半导体	6
N	电子型半导体	8
$r_{bb'}$	基区体电阻	9
$r_{b'e}$	发射结的微变等效电阻	10
r_{be}	共射接法下,基—射极间的微变等效电阻	14
r_{ce}	共射接法下,集—射极间的微变等效电阻	16
α	共基接法下,集电极电流的变化量与发射极电流的变化量之比	18
$\bar{\alpha}$	共基接法下,集电极电流的变化量与发射极电流的直流量之比	19
β	共射接法下,集电极电流的变化量与基极电流的变化量之比	20
$\bar{\beta}$	共射接法下,集电极电流的变化量与基极电流的直流量之比	21
g_m	跨导	21
U_{EBO}	集电极开路时,发射极—基极间的击穿电压	25
U_{CEO}	基极开路时,集电极—发射极间的击穿电压	27
I_{IB}	集成运放输入偏置电流	30
D	场效应管漏极	32
G	场效应管栅极	32
S	场效应管源极,整流电路的脉动系数	37
U_P	场效应管夹断电压	37
r_{DS}	场效应管漏源间的等效电阻	37
I_{DSS}	结型、耗尽型场效应管 $U_{GS}=0$ 时的 I_D	38
K_{CMRR}	共模抑制比	39
Q	静态工作点,LC 回路的品质因数	42
τ	时间常数	42
η	效率	42
$\phi(\theta)$	相角	43

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体基本知识	1
1.1.1 本征半导体	2
1.1.2 掺杂半导体	3
1.2 PN 结	5
1.2.1 两种半导体接触现象	5
1.2.2 PN 结的单向导电特性	6
1.2.3 PN 结的击穿	8
1.2.4 PN 结的电容效应	9
1.2.5 二极管	10
1.2.6 稳压二极管	14
1.2.7 二极管的应用	16
1.2.8 其他二极管	18
1.3 半导体三极管	19
1.3.1 三极管的结构及类型	20
1.3.2 三极管的三种连接方式	21
1.3.3 三极管的放大作用	21
1.3.4 三极管的特性曲线	25
1.3.5 三极管的主要参数	27
1.3.6 二、三极管的极性判别法	30
思考题与习题	32
第 2 章 放大电路分析基础	37
2.1 放大电路工作原理	37
2.1.1 电路组成	38
2.1.2 直流通路与交流通路	39
2.2 放大电路的直流状态分析	42
2.2.1 解析法确定静态工作点	42
2.2.2 图解法确定静态工作点	42
2.2.3 电路参数对 Q 点的影响	43



2.3 放大电路的动态分析	45
2.3.1 图解法分析动态特性	45
2.3.2 放大电路的非线性失真	48
2.3.3 微变等效电路	50
2.3.4 三种基本形式放大电路的分析	52
2.4 静态工作点的稳定及其放大电路	62
2.4.1 温度对三极管参数的影响	62
2.4.2 稳定静态工作点电路原理及分析	63
2.5 多级放大电路	70
2.5.1 多级放大电路的耦合方式	70
2.5.2 多级放大电路的指标计算方法	74
2.6 实用制作电路举例	77
2.6.1 声控闪光电路	77
2.6.2 触摸延时开关电路	78
思考题与习题	79
第3章 放大电路的频率特性	88
3.1 频率特性的一般概念	88
3.1.1 频率特性的概念	88
3.1.2 频率失真	93
3.2 三极管的频率参数及共射电路的电容选择	94
3.2.1 三极管的频率参数	94
3.2.2 电容对共射电路的影响以及选择	95
3.3 单管共射极放大电路的频率特性	95
3.3.1 三极管的混合 π 型等效电路	96
3.3.2 阻容耦合单管共射放大电路的频率特性	98
3.3.3 直接耦合单管共射放大电路的频率特性	103
3.4 多级放大电路的频率特性	104
思考题与习题	105
第4章 场效应管及其放大电路	108
4.1 概 述	108
4.1.1 结型场效应管	108
4.1.2 绝缘栅型场效应管	114
4.1.3 FET的主要参数	118
4.1.4 FET使用注意事项	118
4.2 场效应管放大电路	119
4.2.1 静态工作点与偏置电路	119

4.2.2 FET 放大电路的小信号模型分析法	122
4.2.3 共源极放大电路	122
4.2.4 共漏极放大电路	125
思考题与习题	126
第 5 章 负反馈放大电路	129
5.1 负反馈的基本概念	129
5.1.1 反馈的含义	129
5.1.2 反馈的类型及其判断方法	130
5.1.3 负反馈放大电路的四种基本组态	133
5.2 负反馈对放大器性能的影响	136
5.2.1 使放大倍数下降,稳定性提高	136
5.2.2 稳定输出信号	137
5.2.3 展宽通频带	138
5.2.4 抑制非线性失真	139
5.2.5 对输入阻抗的影响	139
5.2.6 对输出阻抗的影响	140
5.3 负反馈放大电路的估算方法	142
5.3.1 电压串联负反馈的估算方法	143
5.3.2 其他三种组态放大电路的估算方法	144
5.4 负反馈技术应用举例	145
思考题与习题	147
第 6 章 直流放大电路及运放	153
6.1 零点漂移	153
6.2 差动放大电路	154
6.2.1 基本形式及信号类型	154
6.2.2 主要技术指标	155
6.2.3 长尾式差放电路	156
6.2.4 恒流源式差放电路	157
6.2.5 差动放大电路的估算及四种输入方式	158
6.3 电流源电路	161
6.3.1 镜像电流源	162
6.3.2 比例电流源	163
6.3.3 微电流源	163
6.3.4 电流源应用举例	164
6.4 集成运放简介	167
思考题与习题	171

第7章 集成运放的应用	176
7.1 集成运放的应用基础	176
7.1.1 低频等效电路	177
7.1.2 理想运放的条件	178
7.1.3 运放工作在线性区的特性	179
7.1.4 理想运放工作在非线性区的特性	180
7.2 运算电路	181
7.2.1 比例运算电路	181
7.2.2 求和电路	186
7.2.3 积分电路及微分电路	190
7.2.4 对数与指数运算电路	194
7.2.5 乘法运算电路	196
7.3 有源滤波电路	200
7.3.1 低通滤波电路(LPF)	201
7.3.2 高通滤波电路(HPF)	204
7.3.3 带通滤波电路(BPF)	205
7.3.4 带阻滤波电路(BEF)	207
7.3.5 全通滤波电路(APF)	208
7.4 电压比较器	209
7.4.1 简单电压比较器	210
7.4.2 滞回电压比较器	213
7.4.3 窗口电压比较器	215
7.5 集成运放应用举例	216
思考题与习题	219
第8章 波形产生电路	224
8.1 非正弦波产生电路	224
8.1.1 矩形波产生电路	224
8.1.2 三角波产生电路	226
8.1.3 锯齿波产生电路	228
8.2 正弦波产生电路	230
8.2.1 产生振荡的条件	230
8.2.2 RC正弦波振荡电路	232
8.2.3 LC正弦波振荡电路	236
思考题与习题	241
第9章 功率放大电路	245
9.1 功率放大电路概述	245

9.1.1	功率放大电路的特点	245
9.1.2	功率放大电路的分类	246
9.2	互补对称功率放大电路	247
9.2.1	乙类双电源互补对称功率放大电路	247
9.2.2	甲乙类互补对称功率放大电路	250
9.2.3	复合互补对称功率放大电路	253
9.3	集成功率放大电路	255
9.3.1	LM386 集成功率放大器	256
9.3.2	LM386 的典型应用	257
* 9.4	功率放大器的安全运行	258
9.4.1	功率管的二次击穿	258
9.4.2	功率管的散热问题	259
	思考题与习题	261
第 10 章	直流稳压电源	265
10.1	直流电源的组成及各部分作用	265
10.2	单相整流电路	266
10.2.1	半波整流电路	266
10.2.2	桥式整流电路	267
10.3	滤波电路	269
10.3.1	电容滤波电路	269
10.3.2	其他滤波电路	271
10.4	倍压整流电路	273
10.4.1	二倍压整流电路	273
10.4.2	多倍压整流电路	274
10.5	稳压电路	274
10.5.1	稳压电路的主要指标	274
10.5.2	硅稳压管稳压电路	275
10.5.3	串联型稳压电路	277
10.6	集成稳压电路	280
10.6.1	三端集成稳压电路概述	280
10.6.2	基本应用电路	283
10.6.3	扩展应用电路	284
10.7	开关型稳压电路	286
	思考题与习题	288
第 11 章	电子电路读图	292
11.1	读图基本思路与步骤	292

• 6 •

◎第1章 半导体器件◎

半导体器件是现代电子技术的重要组成部分，是构成各种电子电路（包括模拟电路、数字电路、集成电路和分立元件电路）的基础。常用半导体器件主要是指半导体二极管、稳压管、三极管、场效应管等分立元件，近年来，人们将部分集成电路也视为常用半导体器件。

半导体器件具有重量轻、体积小、功耗低、品种齐全、可靠性高、使用寿命长等优点而得到了广泛的应用。作为基础知识，本章首先介绍半导体的基本特性，半导体中载流子的运动，半导体的核心环节—PN 结及其单向导电特性，然后着重讨论半导体二极管、稳压管、三极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数，并在此基础上对二极管、三极管的极性判别法作简要的介绍。

1.1 半导体基本知识

自然界的各种物质按其导电性能可分为三大类，即导体、半导体和绝缘体。

物质的导电特性取决于其原子结构。导体一般为低价金属元素，如铜、铁、铝等金属。金属导体原子最外层电子极易挣脱原子核的束缚而成为自由电子，构成导电载流子，在外电场作用下，这些自由电子产生定向运动，形成电流，表现出较好的导电特性。绝缘体一般为高价元素（如惰性气体）和高分子物质（如橡胶）。绝缘体最外层电子受原子核的束缚力很强，很难挣脱原子核的束缚成为自由电子，故导电特性差。通常把导电特性处于导体和绝缘体之间的这类物质统称为半导体。

在电子器件中，用得最多的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs），以及掺杂硼（B）、磷（P）、铟（In）、锑（Sb）等杂质而制成其他化合物半导体。

半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同以外，它还具有不同于其他物质的特性，例如，在半导体受到外界光和热的刺激时，其导电能力将发生显著的变化（称为热敏性和光敏性），说明半导体导电能力受环境因素影响较大；在纯净的半导体中掺入某些特定的杂质时，其导电能力也会发生显著的变化（称为掺敏性），说明半导体的导电能力具有可控性。这些特性表明，半导体器件的导电机理必然不同于其他物质，为了理解这些特性，有必要了解半导体的结构。现以硅（Si）为例来说明。

硅（Si）是4价元素，其原子序数是14，原子中有14个电子围绕原子核旋转运动，其原子最外层轨道上有4个电子，称为价电子。为简便起见，常把带有+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所示。

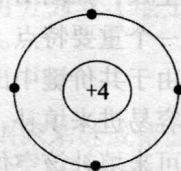


图1.1.1 4价元素原子的简化原子结构模型

在硅的晶体中，原子在空间排列成规则的晶格。每个原子的最外层的价电子不仅受到自身原子核的吸引而围绕其运动，同时还受到相邻原子核的吸引而出现在围绕相邻原子核的轨道上。于是，两个相邻原子共有一对价电子，组成一对共用电子对，称为共价键结构，由此可知，每个原子的外层可视为拥有 8 个价电子，如图 1.1.2 所示。高中化学中就曾学过，8 个价电子构成的共价键结构，使得这些原子处于较为稳定的状态，即 Si 晶体中，每个原子都和周围的 4 个原子以共价键的形式互相紧密地联系在一起。

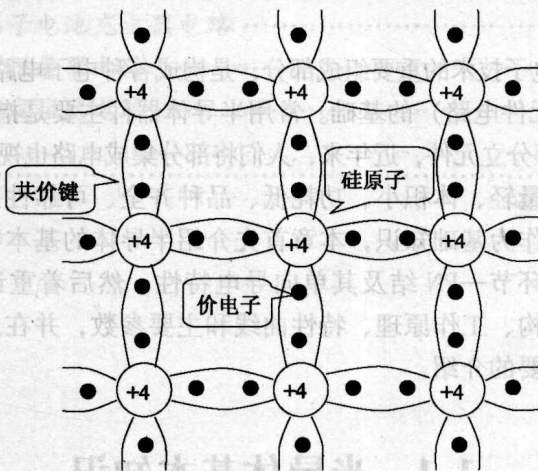


图 1.1.2 硅晶体中的共价键结构

1.1.1 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净的、结构完整的半导体晶体。决定半导体导电能力强弱的物理量是电导率，电导率与材料内单位面积中所含的电荷载流子的数目有关，电荷载流子的浓度越高，其电导率越高。

在本征半导体中，因晶体中共价键的结合力很强，在温度为绝对零度 ($T=0K$) 时，共价键中价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚，因此，晶体中不存在能够导电的载流子，因此在 $T=0K$ 时晶体相当于一个绝缘体，不能导电。但是，当温度升高时，例如，在室温下，将有少数共价键中的价电子获得足够的能量挣脱共价键的束缚而成为自由电子，形成电子载流子，这种现象称为热激发或本征激发。由于自由电子的数量很少，故本征半导体的导电能力较弱。

当价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时，原共价键中就留下一个空位，这个空位称为空穴，如图 1.1.3 所示，图中黑点表示电子，圆圈表示空穴。空穴是区别半导体与导体的一个重要特点。

由于共价键中出现了空穴，在外加电场或其他能源的作用下，邻近共价键中的价电子比较容易进来填补，而在这个价电子原来的位置上又将留下一个空位，以后其他地方的电子又可来填补该空位，这种价电子的填补运动就相当于带正电的空穴在运动。为使其与自由电子的运动区别开来，将这种填补运动称为空穴运动，并将空穴视为带正电的载流子，它所带的电量与电子相等，符号相反。

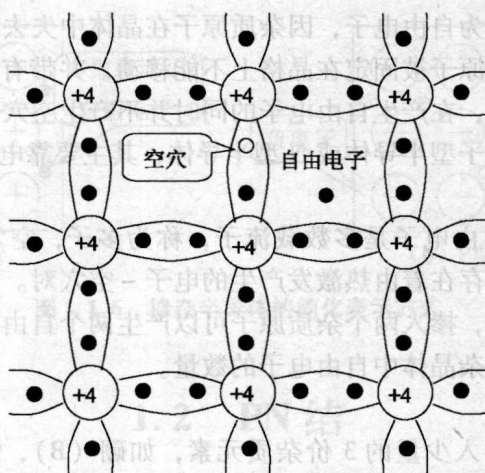


图 1.1.3 本征半导体中的自由电子与空穴

由此可见，半导体中存在两种载流子，一种是带负电的自由电子，一种是带正电的空穴。于是在外电场作用下，通过半导体的电流可看作由两部分组成，一部分是自由电子的定向移动形成的电子电流，一部分是价电子按一定方向填补空穴，即空穴的定向移动形成的空穴电流。

当自由电子进入空穴时，空穴就会消失，这种现象称为复合。在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现的，称为电子-空穴对。在一定温度下，电子-空穴对的产生过程和复合过程是相对平衡的，载流子的浓度也是一定的。

半导体内载流子的浓度跟许多因素有关，除了跟半导体材料本身的性质有关以外，还与温度有关，随着温度的升高，基本上按指数规律上升。对于硅材料，大约温度每上升 8 度，本征载流子浓度增加 1 倍；对于锗材料，大约温度每升高 12 度，载流子浓度增加 1 倍。除此之外，半导体载流子浓度还与光照有关，人们也正是利用此特性将半导体制成光敏器件。

1.1.2 掺杂半导体

在本征半导体中，通过热激发产生的自由电子数和空穴数还远不能使半导体具有良好的导电能力。但人为地、有控制地掺入少量的特定杂质时（称为掺杂），其导电特性将发生质的变化，掺入杂质的半导体称为掺杂半导体或杂质半导体。掺杂的方法是将少量的杂质元素加入到加热的硅或锗晶体中。因掺入杂质不同，掺杂半导体可分为 N（电子）型半导体和 P（空穴）型半导体。

1. N 型半导体

在硅或锗的晶体中掺入少量的 5 价杂质元素，如磷、锑、砷等，则原来硅或锗晶体的晶格中的一些 Si 原子被杂质原子替代。杂质原子的最外层有 5 个价电子，它与周围 4 个 Si 或 Ge 原子组成共价键时，将余出 1 个价电子，该电子不受共价键的束缚只受自身原子核的吸引，原子核的吸引力较弱，故它只要受到较少的能量就很容易挣脱成为自由电子。如

室温下该价电子就可以成为自由电子，因杂质原子在晶体中失去电子故称为施主原子或施主杂质。失去电子的杂质原子被固定在晶格上不能移动，并带有正电荷，称为正离子，用符号 $\oplus$ 表示。需注意的是，在产生自由电子的同时并不产生空穴。这种掺杂半导体中有多余的自由电子，故称为电子型半导体或N型半导体，其主要靠电子导电，它的共价键结构如图1.1.4所示。

在N型半导体中，自由电子是多数载流子，称为多子，空穴是少数载流子，称为少子。当然在掺杂晶体中还存在着由热激发产生的电子-空穴对。显然，掺入一个杂质原子可以多产生一个自由电子，掺入两个杂质原子可以产生两个自由电子。通过控制掺入杂质原子的数量就可以控制掺杂晶体中自由电子的数量。

2. P型半导体

在硅或锗的晶体中掺入少量的3价杂质元素，如硼（B）、镓、铟等，则原来晶体晶格中的一些原子将被杂质原子替代。杂质原子的最外层只有3个价电子，它与周围4个Si或Ge原子组成共价键时，将缺少1个价电子，所以形成一个空位。其他共价键的电子只需摆脱原子核的束缚，就能转到该空位上，形成空穴。因此，在较少能量下就能形成空穴，并留下带负电的杂质离子（用 $\ominus$ 表示），固定在晶格上不能移动。因杂质原子在晶体中接受电子，故称为受主原子或受主杂质。这种杂质半导体中有多余的空穴，故称为空穴型半导体或P型半导体。P型半导体主要靠空穴导电，其共价键结构如图1.1.5所示。

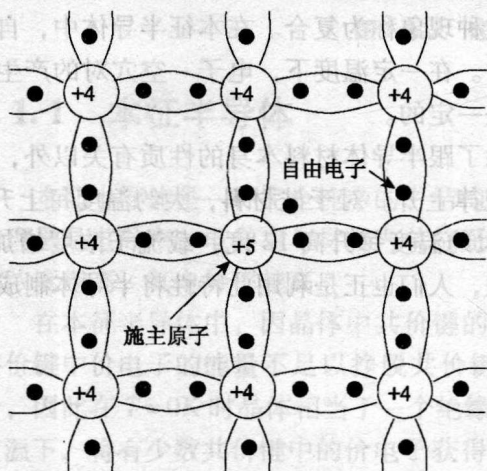


图 1.1.4 N型半导体的共价键结构

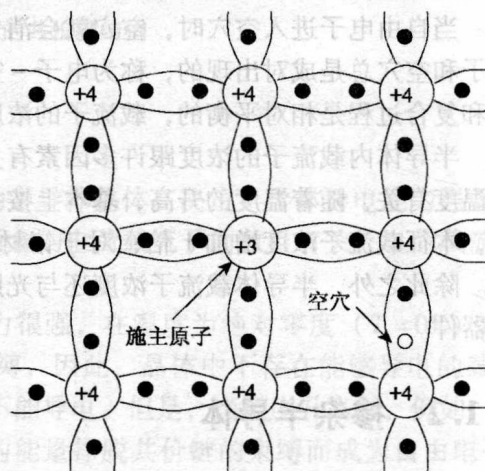


图 1.1.5 P型半导体的共价键结构

在P型半导体中，空穴是多数载流子，称为多子；自由电子是少数载流子，称为少子；当然在掺杂晶体中还存在着由热激发产生的电子-空穴对。控制掺入杂质的多少，便能控制空穴数量。

综上所述，在掺杂半导体中多数载流子的浓度主要由掺入的杂质浓度决定，而少数载流子的浓度则与温度密切相关。掺杂半导体里尽管杂质含量很微弱，但它们对半导体的导电能力却有很大的影响。P型半导体和N型半导体虽然各自都有一种多数流子，但对外仍呈电中性，它们的导电特性主要是由掺杂浓度决定。为简便起见，N型半导体和P型半导体的表示方法如图1.1.6所示。