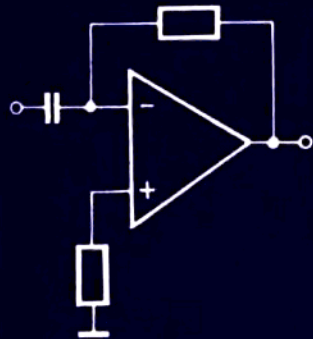


★ 职工高等工业专科学校教材

模拟电子技术基础

✦ 鲍绍宣 汪源濬 郭维芹 编



高等教育出版社

本书受原教育部委托,按照职工高等专科学校《模拟电子技术基础教学大纲(草案)》编写的教材。主要包括:半导体二极管及三极管、基本放大电路及其分析方法、场效应管放大器、负反馈放大器、功率放大器、集成运算放大器、正弦波振荡器、直流稳压源及晶闸管电路。

书中适当地压缩了分立单元部分内容,增加了集成运放的应用,加强了分析方法方面的训练。各章配有一定数量的例题、思考题和习题。

本书可作为职工高等专科学校电类专业“模拟电子技术基础”课程的教材,也可供全日制专科学校、函授等相应专业用作教材及从事电子技术的工程技术人员参考。

责任编辑 任庆陵

职工高等工业专科学校教材

模拟电子技术基础

鲍绍宣 汪源清 郭维芹 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民邮电出版社印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 23.25 字数 530 000

1988年2月第1版 1988年2月第1次印刷

印数0001—4 000

ISBN 7-04-000852-1/TN·51 定价 4.00 元

前 言

本书是受原教育部委托,按照职工高等专科学校《模拟电子技术基础教学大纲(草案)》编写的教材。

在内容处理上,适当地压缩了分立单元部分内容;精简了频率特性分析、分立单元设计;增加了集成运放的应用;加强了分析方法方面的训练;考虑到与微型计算机的应用相衔接,增加了微型计算机模拟通道设计。

在内容安排上,安排了10%左右的选讲内容,已用“*”注明。

本教材由哈尔滨电工学院鲍绍宣副教授任主编。编写的分工情况是,核工部九院曙光工学院汪源潜副研究员编写第一章、第七章和第三章的1、2节;上海第二工业大学郭维芹副教授编写第四章、第五章、第九章及第三章的第3节;鲍绍宣编写第二章、第六章、第八章,并负责全书定稿工作。邀请王秉翰编写了绪论。

本书由南京工学院李士雄教授主审。审阅小组成员有遇丕海、王秉翰、王鑫源。参加审阅工作的还有南京工学院衣承斌副教授及戴义宝讲师。他们精心地审阅了全书并提出许多宝贵的修改意见,对提高本书的质量起到了良好的作用。为此,表示衷心地感谢。

由于我们的水平所限,加之时间仓促,书中错误和不妥之处,在所难免,所以诚恳地希望得到使用本教材的师生给予批评和指正。

编 者

1986.4.2

本书常用符号表

A	放大倍数	I	直流电流
A_f	反馈放大器的放大倍数	i	交变电流
A_v	放大器空载时的电压放大倍数	I_C	集电极静态电流
A_v'	放大器带负载时的开环电压放大倍数	i_o	集电极电流交流分量
A_{vf}	放大器有反馈时的闭环电压放大倍数	i_C	集电极总电流
BW	放大器的带宽	I_o	集电极电流交流分量有效值
b	半导体三极管的基极	I_{cm}	集电极电流交流分量最大值
C	电容	ΔI_C	集电极电流的改变量
C_b	隔直电容(耦合电容)	I_s	信号源电流
C_c	发射极旁路电容	I_i	输入电流
$C_{b'c}$	基极-集电极电容	I_o	输出电流
$C_{b'e}$	基极-发射极电容	J	电流密度
C_i	输入电容	L	负载
C_o	输出电容	L	自感; 自感系数
C_L	负载电容	l	长度
c	半导体三极管的集电极	M	互感; 互感系数
D	二极管	N	电子型半导体
d	场效应管的漏极	n	电子浓度; 绕组的匝数比
E	直流电源电压	NF	噪声系数
E_C	集电极电源电压	P	空穴型半导体
E_E	发射极电源电压	p	空穴浓度
E_D	漏极电源电压	Q, q	电荷; 品质因数
E_G	栅极电源电压	Q	静态工作点
e	半导体三极管的发射极	R	电阻(直流电阻或静态电阻)
e	电子电荷量	R_b, R_c, R_e	半导体三极管的基极、集电极、发射极电阻
$\mathcal{E}$	电场强度	R_g, R_d	场效应管的栅极、漏极电阻
F	反馈系数	R_s	信号源内阻
F_v	电压反馈系数	R_L	负载电阻
f	频率	R_W	电位器
f_L	放大器的下限频率	r	微变电阻(交流电阻或动态电阻)
f_H	放大器的上限频率	r_{be}	半导体三极管的输入电阻
f_T	特征频率	r_{ce}	半导体三极管的输出电阻
G	电导	r_i	放大器的输入电阻
g	微变电导	r_o	放大器的输出电阻
g_m	跨导	S	开关
h	双口网络的混合参数		

s 场效应管的源极
 s 复频率变量
 T 温度
 T 双口有源器件
 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_o 输出电压
 V_T 场效应管开启电压
 V_P 场效应管的夹断电压

X, x 电抗
 Y, y 导纳
 Z, z 阻抗
 α 半导体三极管共基极接法的电流放大系数
 β 半导体三极管共射极接法的电流放大系数
 γ 稳压系数
 η 效率
 θ 导通角
 τ 时间常数
 φ 相位角
 Ω 欧姆
 ω 角频率

目 录

绪论.....	1	参考文献.....	50
		思考题和习题.....	50
第一章 半导体二极管及三极管		第二章 基本放大电路及其分析方法	
1.1 半导体知识简介.....	3	2.1 概述.....	52
1.1.1 固体导电机理.....	3	2.1.1 什么是放大器.....	52
1.1.2 半导体导电性能的特点.....	3	2.1.2 放大电路的构成条件.....	52
1.1.3 本征半导体.....	4	2.1.3 放大电路的组成及工作原理.....	52
1.1.4 掺杂半导体.....	7	2.1.4 放大电路图的习惯画法.....	54
1.1.5 掺杂半导体中载流子比例的变化.....	9	2.2 放大电路的图解分析法.....	54
1.1.6 PN结.....	10	2.2.1 静态分析.....	54
1.1.7 PN结的导电特性.....	13	2.2.2 动态分析.....	58
*1.1.8 二极管伏安特性表达式.....	15	2.2.3 静态工作点对波形失真的影响.....	62
1.1.9 PN结的结电容.....	18	2.3 放大电路的微变等效电路分析法.....	63
1.2 半导体二极管.....	20	2.3.1 三极管的 $\langle h \rangle$ 参数.....	64
1.2.1 半导体二极管的制造工艺和表示方法.....	20	2.3.2 放大器的微变等效电路分析法.....	68
1.2.2 二极管特性曲线偏离二极管伏安特性表达式的原因.....	21	2.4 放大器的工作点稳定问题.....	72
1.2.3 锗二极管和硅二极管的特性曲线的差别.....	23	2.4.1 温度对工作点的影响.....	73
1.2.4 温度对二极管特性的影响.....	23	2.4.2 射极稳定电路.....	74
1.2.5 二极管的主要参数.....	25	2.4.3 集电极-基极偏置电路.....	79
1.2.6 二极管的等效电路.....	30	2.5 共集电极电路.....	80
1.3 半导体三极管.....	31	2.6 共基极放大电路.....	84
1.3.1 三极管的结构.....	31	2.6.1 共基极放大电路.....	84
1.3.2 工作在放大区的三极管电流分配.....	32	2.6.2 三种基本组态的性能比较.....	86
1.3.3 三极管特性曲线.....	36	2.7 多级放大器.....	87
1.3.4 三极管主要参数.....	38	2.7.1 多级放大器的耦合方式.....	87
1.3.5 温度对三极管参数的影响.....	43	2.7.2 多级放大电路的组成.....	88
*1.3.6 半导体二极管、三极管简易测试方法.....	44	2.7.3 阻容耦合多级放大器的计算.....	89
附录 1.1.....	47	2.8 阻容耦合放大器的频率特性.....	94
附录 1.2 半导体器件型号命名方法.....	49	2.8.1 频率特性与通频带.....	94
本章小结.....	50	2.8.2 频率失真.....	96
		2.8.3 阻容耦合单级放大器的频率特性.....	97
		2.8.4 对数频率特性.....	103
		本章小结.....	109

参考文献.....110
思考题和习题.....110

第三章 场效应管放大器

3.1 结型场效应管.....114
3.1.1 结型场效应管的结构和工作原理.....114
3.1.2 N型沟道结型场效应管的特性曲线.....114
3.1.3 结型场效应管的参数.....120
3.1.4 温度对结型场效应管特性的影响.....122
3.2 绝缘栅型场效应管.....123
3.2.1 增强型绝缘栅场效应管.....124
3.2.2 耗尽型场效应管.....127
3.2.3 场效应管的分类、特点及使用时应注意的问题.....129
3.3 场效应管放大器.....131
3.3.1 场效应管放大器的直流分析.....131
3.3.2 场效应管放大器的交流分析.....137
本章小结.....143
参考文献.....144
思考题和习题.....144

第四章 负反馈放大器

4.1 反馈的基本概念.....148
4.1.1 什么是反馈.....148
4.1.2 单环反馈放大器的方块图.....150
4.1.3 基本反馈方程式.....150
4.1.4 反馈深度 $(1+AF)$151
4.1.5 环路放大倍数.....152
4.1.6 深度负反馈.....153
4.1.7 放大倍数的稳定性.....154
4.2 反馈的分类和四种基本反馈放大电路的分析.....154
4.2.1 反馈分类的原则.....154
4.2.2 电压串联负反馈.....156
4.2.3 电流并联负反馈.....159
4.2.4 电压并联负反馈与电流串联负反馈.....161
4.3 反馈电路的辨别.....163
4.3.1 辨别反馈元件和区分交、直流反馈.....163

4.3.2 判别正反馈和负反馈.....164
4.3.3 反馈类型的识别.....165
4.3.4 反馈电路综合辨识举例.....165
4.4 实际负反馈电路的分析方法.....166
4.4.1 划分反馈中“A”框和“F”框的原理.....167
4.4.2 划分A框与F框的规则.....171
4.5 反馈放大器的计算.....172
4.5.1 计算反馈电路的程序.....172
4.5.2 实例计算.....173
4.5.3 计算技巧的讨论.....181
4.6 负反馈的其它效果.....182
4.6.1 通频带的扩展.....182
4.6.2 非线性失真的改善.....184
4.6.3 噪声的抑制.....185
4.7 反馈放大器的稳定性.....186
4.7.1 负反馈放大器的稳定性问题.....186
4.7.2 反馈放大器稳定性的频率判据法.....187
4.7.3 反馈放大电路的稳定裕量.....188
本章小结.....188
参考文献.....188
思考题和习题.....189

第五章 功率放大器

5.1 概述.....192
5.1.1 功率放大器的特点和主要研究对象.....192
5.1.2 功率放大器的三种工作状态.....192
5.2 变压器耦合功率放大器.....193
5.2.1 变压器耦合甲类功率放大器.....193
5.2.2 变压器耦合乙类推挽功率放大器.....198
5.3 互补对称推挽功率放大器.....202
5.3.1 互补对称推挽电路的基本工作原理.....202
5.3.2 无输出电容互补推挽功率放大电路OCL.....207
5.3.3 集成功率放大器简介.....211
本章小结.....214
参考文献.....214
思考题和习题.....214

第六章 集成运算放大器

6.1 概述	217
6.1.1 什么是运算放大器	217
6.1.2 直接耦合的特殊问题	217
6.1.3 差动式放大电路	220
6.2 集成运算放大器的基本组成	234
6.3 集成运算放大器的主要技术指标及其测量方法	236
6.3.1 集成运放的主要技术指标	236
*6.3.2 集成运放主要技术指标的测量方法	240
6.4 运算放大器的两种基本电路	243
6.5 集成运算放大器在信号运算方面的应用	249
6.5.1 比例运算	249
6.5.2 求和运算	250
6.5.3 积分器	251
6.5.4 微分器	252
6.5.5 对数与反对数放大器	255
6.6 运算放大器在信号处理方面的应用	257
6.6.1 信号有源滤波	257
6.6.2 信号幅度比较	261
6.7 运算放大器在波形产生方面的应用	264
6.7.1 产生矩形波的电路	264
6.7.2 三角波发生器	266
6.7.3 锯齿波发生器	268
*6.8 运放在微型计算机模拟通道中的应用	269
6.8.1 传感器	269
6.8.2 仪用放大器	271
6.8.3 滤波器	274
*6.9 集成运放使用时的一些实际问题	280
6.9.1 不能正常工作情况	281
6.9.2 改善措施	282
6.9.3 保护措施	283
本章小结	285

参考文献	285
思考题和习题	285

第七章 正弦波振荡器

7.1 概述	290
7.1.1 产生振荡的条件	290
7.1.2 振荡器的一般形式	291
7.1.3 振荡的形成	291
7.2 RC正弦波振荡器	292
7.2.1 RC串并联网络振荡器	292
7.2.2 RC移相振荡器	294
7.2.3 双T型网络振荡器	296
7.3 LC正弦波振荡器	298
7.4 石英晶体振荡器	304
7.4.1 石英晶体谐振器的结构和特性	305
7.4.2 几种石英晶体振荡器	306
本章小结	308
参考文献	308
思考题和习题	308

第八章 直流稳压源

8.1 单相全波整流电容滤波电路	310
8.1.1 单相全波整流电路	310
8.1.2 单相全波整流电容滤波电路	311
8.1.3 单相桥式整流电容滤波电路	313
8.2 稳压管稳压电路	315
8.2.1 工作原理	315
8.2.2 稳压源质量指标	316
8.2.3 稳压管稳压电路的主要指标	317
8.2.4 参数选择	319
8.3 串联反馈式稳压电路	321
8.4 集成稳压电源	324
8.4.1 5G11的电路原理与使用	324
8.4.2 5G14的电路原理与使用	326
*8.5 开关型稳压电源	328
本章小结	329
参考文献	330
思考题和习题	330

第九章 晶闸管电路

9.1 晶闸管	333
9.1.1 晶闸管的结构和工作原理.....	333
9.1.2 晶闸管的主要定额.....	336
9.2 单相可控整流电路	338
9.2.1 单相半波可控整流电路.....	338
9.2.2 单相桥式可控整流.....	343
9.3 晶闸管的触发电路	346
9.3.1 单结晶体管.....	346
9.3.2 利用单结晶体管构成触发器.....	349

9.4 晶闸管电路的应用实例	354
9.4.1 大转矩电机的速度控制.....	354
9.4.2 液面检测器(锁定).....	355
9.4.3 医用高脉冲刺激器.....	355
9.4.4 电力工具的转矩控制.....	356
9.4.5 应急照明灯.....	356
9.4.6 采用双向可控硅的交流调压 和电机调速.....	356
本章小结	358
参考文献	358
思考题和习题	358

绪 论

以集成电路和计算机为标志的现代电子科学技术，在二十世纪下半期得到空前的发展。电子技术的应用已广泛渗透到各个领域，它必将对我国的现代化建设具有极其重要的作用。

以各种形式的电信号作为载体传递和加工信息，是现代科学技术的重要特征之一。以连续变化的电信号为研究对象的模拟电子技术，本世纪初就在无线电通信中受到重视。使其真正成为一门新兴学科并得以普遍应用，却是在具有放大作用的电子管特别是晶体三极管出现之后。近三十年来，随着集成电路等新型电子器件的出现，模拟电子技术已经成为现代科学技术的重要组成部分，成为每一个从事电气技术的科技人员必修的学科之一。

模拟电子技术以采用有源器件（包括分立器件和集成电路）为主要特征，把各种电子器件与电阻器、电容器、电感器、变压器等适当地连接起来，可以组成各种不同用途的电子线路。以电子线路为核心组装起来的电子设备，已广泛应用于通信、控制、计算技术和文化生活等各个方面。

学习模拟电子技术，就是要掌握有关电子器件（主要是半导体器件）、线路及其应用的知识。

《模拟电子技术基础》是高等工业专科学校电类专业的一门技术基础课。它以高等数学、普通物理学和电路理论为先修课程，一方面为后续专业课提供基础知识，另一方面还可直接用于工程实际。作为一种实践性很强的技术学科，电子技术具有不同于先修课的许多特点，相应地需要掌握一套可行的学习方法，才能取得事半功倍的效果。

首先，电子技术的研究对象很广；又都是由具体的元、器件组成的电路、设备；工作在电磁干扰较大的环境之中，情况很复杂。这种特殊情况，决定了模拟电子技术在分析方法上，与数学、电路理论不尽相同，有自己的特点。这些特点之一便是，为突出主要问题要学会对某些量作近似处理。这一点，初学者不是很容易习惯的。

其次，模拟电子技术是一门实践性很强的课程，与其他课程相比，更强调实验能力的培养。鉴于安装的复杂性、器件参数的分散性，通常是把定性分析、定量估算和实验调试三者结合起来，才能完成一个预定的电子线路方案。通过实验，学会使用工具、电子仪器和电子器件手册，这是一个合格的电子技术工作者应具备的实际工作能力。

简言之，学习电子技术可以概括为定性分析、定量估算和实验调试相结合的方法。通过听课、做习题、实验等环节，培养会“看”（看懂电路图）、会“算”（计算电路的性能指标）、会“选”（确定电路方案和元、器件型号和规格）和会“干”（调试实际电路）的“四会”能力。教学要求也充分反映了电子技术课重在应用的特点。

最后，对于职工高等工业专科学校的读者来说，学习电子技术课程要注意扬长避短。应在掌

握电子器件和电路的工作原理的基础上,充分发挥成人的理解能力较强和实践经验较多的优势,重视自学,培养分析判断和综合概括能力,力戒死记硬背定义和公式,着眼于思路和方法,问题就会由难转化为易。比如,掌握了微变等效电路分析法,就无须死记放大倍数、输入电阻、输出电阻等表达式,即使自己推导,也不会太难。未受过正规高等教育的职工,利用专业相近或爱好业余制作的条件,通过自学也能很好掌握电子技术,这种事例屡见不鲜。

电子世界丰富多采,日新月异。为了我国四化大业早日实现,应坚定信心,认真研究,尽快掌握电子技术。

第一章 半导体二极管及三极管

1.1 半导体知识简介

1.1.1 固体导电机理

从普通物理学知道下列关系式

$$\delta = \gamma E \quad (1.1.1)$$

$$\delta = \frac{1}{\rho} E \quad (1.1.2)$$

$$I = GV \quad (1.1.3)$$

$$I = \frac{1}{R} V \quad (1.1.4)$$

式(1.1.1)、(1.1.2)中的 δ 、 E 、 γ 、 ρ 为固体中某一点附近的电流密度、电场强度、电导率、电阻率。式(1.1.3)、(1.1.4)中的 I 、 V 、 G 、 R 为流过某固体的电流、加在该固体两端的电压、该固体的电导、该固体的电阻。式(1.1.1)、(1.1.2)称为欧姆定律的微分形式,式(1.1.3)、(1.1.4)称为欧姆定律的积分形式。 γ 、 ρ 、 G 、 R 都是表示固体导电性能的物理量。

根据经典导电理论, γ 可写成

$$\gamma = \frac{n\tau q^2}{2m_0} \quad (1.1.5)$$

式中的 n 为固体中某点附近的自由电子密度, q 是电子的电量, m_0 是电子的质量, τ 是自由电子在固体内与晶格碰撞的平均时间间隔。对于不同的固体来说, m_0 、 q 都是一样的,只是 n 、 τ 这两个物理量存在差别,其中 τ 对于各种固体差别不大,差别最大的是 n 。这样,物体的导电性能就主要由 n 来确定。导电性能良好的金属,其中 n 很大;而绝缘材料中几乎没有自由电子。半导体材料中自由电子密度介于两者之间。

1.1.2 半导体导电性能的特点

从导电性能上看,物体大体上可分成导体、半导体和绝缘体三大类。银是很好的导体,其电阻率为 $1.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ 。石蜡是很好的绝缘体,其电阻率为 $3.0 \times 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ 。它们的电阻率之间相差 24 个数量级。习惯上,把电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的物体称为半导体。

但是,本书里所指的半导体,不是泛指导电性能介于导体与绝缘体之间的物体,而是指其中具有特殊导电机理(双极性导电)的物体。因为,只有这样的半导体才能制成可利用的半导体器件。例如,具有双极性导电机理的锗(Ge)晶体,在室温下,其电阻率为 $47 \Omega \cdot \text{cm}$; 浓度适当的盐水也可以具有同样的电阻率,但前者能制成半导体器件,后者则不能。

具有双极性导电机理半导体材料的导电性能,与一般材料相比,有很明显的特点。

1. 对温度变化十分敏感。一般金属的电阻率受温度的影响比较小。例如,铜的温度升高 100°C 时,其电阻率增加不到一倍。而半导体材料硅(Si),温度升高 10°C 时,电阻率就降低到原来的一半。

2. 对掺入的杂质十分敏感。一般的导体,掺入 1% 的杂质后,其电阻率变化不大。半导体则不同,即使掺入杂质的比例再少一些,其电阻率也会有巨大的变化。例如,纯硅在室温下的电阻率为 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。如果在其中掺入 10^{-6} 的磷原子(P),则其电阻率下降到 $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$, 减少近六个数量级。

应该说,掺入了少量磷原子的硅,好象一立方米的大豆中只掺入一粒沙子那样,纯度仍然是很高的,但电阻率却变化如此之大!

3. 对光照和核辐射敏感。例如,一片沉积在绝缘材料上的硫化镉薄膜,无光照时其电阻约几十兆欧,有光照时降为几十千欧。在电离辐射下一般金属、绝缘材料的损伤容限在 10^{10} 拉德^①(rad)以上,而半导体的损伤容限却只有 $5 \times 10^7 \sim 5 \times 10^8$ 拉德。

此外,半导体的导电性能还受强电场、磁场的影响。

半导体导电性能的这些特点是与它的独特的导电机理相联系的。

1.1.3 本征半导体

所谓本征半导体是指高纯度的单晶半导体。下面介绍本征半导体的结构及其导电机理。

1. 半导体原子结构的表示方法

常见的半导体材料有硅和锗两种。它们都是四价元素,即最外层的电子都是 4 个。这些原子的内层电子被带正电的原子核紧紧拉住,在一般情况下不会变成自由电子,能够成为自由电子的只可能是最外层的某些电子。因此,从研究半导体材料的导电性能上看,可以把这些原子用一些简单模型代替。比如硅原子中共有 14 个电子,原子核带 14 个正电荷。总的看来,原子呈电中性。14 个电子在原子核外围的分布如图 1.1.1 所示。电子排列成 3 层,内层有 2 个电子,中层有 8 个电子,外层是 4 个电子,正中间是原子核。在讨论硅材料导电性能时,可用图 1.1.2 所示模型代替图 1.1.1。从外层电子向内看,原子核和内层电子可用一个带 4 个正电荷的小球代替。

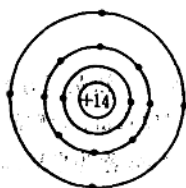


图 1.1.1 硅原子模型

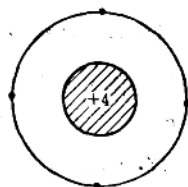


图 1.1.2 硅原子导电性能的等效模型

锗是另一种常用的半导体材料,它的原子核外边共有 32 个电子。这些电子共分 4 层。第一

① 拉德(rad):辐照单位(对应 1 克棉织品吸收能量为 100 尔格或 10^{-6} 焦耳)。

层 2 个,第二层 8 个,第三层 18 个,最外层 4 个。在讨论锗的导电性能时,也可用图 1.1.2 所示模型代替。不过,这时模型内部带 4 个正电荷的小球,代表的是带 32 个正电荷的原子核和内三层中包含的 28 个电子的综合体。

同样的原因,在讨论三价元素(如 B、Al、Ga)和五价元素(如 P、As、Sb 等)的导电性能时可相应地用图 1.1.3(a)和图 1.1.3(b)代替。

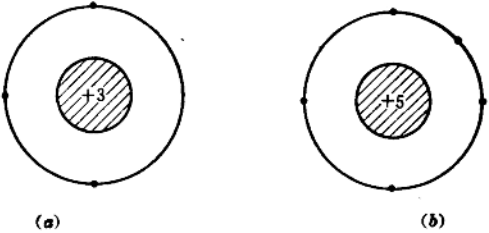


图 1.1.3 (a) 三价元素导电性能的原子等效模型
(b) 五价元素导电性能的原子等效模型

2. 本征半导体内部的原子是按一定规律排列的。图 1.1.4 是晶体结构的立体结构示意图。图 1.1.4(a)中的立方体对应晶体中原子排列的一个基本单元,常称为晶胞(意指晶体的“细胞”)。在这个单元中,上述简化的原子等效模型用圆球和球间连接管道代替。圆球代表原子核和内层电子,管道代表相邻原子的外层电子组成的共价键。每个共价键中有两个相邻原子的外层电子。

每个原子的周围有四个最邻近的原子,它们分布在一个正四面体的四个顶角上[见图 1.1.4(b)]。处在四面体中心的原子共有四个共价键,它们分别与周围最邻近的四个原子相连接。

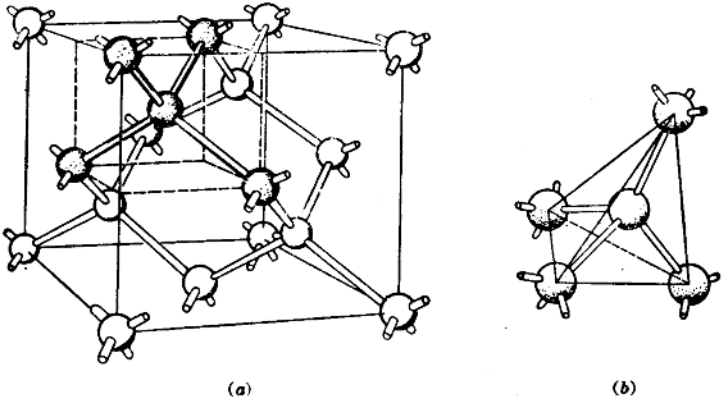


图 1.1.4 锗晶体结构示意图

为便于讨论,可用图 1.1.5 所示的平面结构代替图 1.1.4 所示立体图形。图 1.1.5 中,两相邻原子的外层电子对为共价键。在温度接近绝对零度时,晶体内部电子的动能很小,它们都被束缚在共价键之中。

3. 锗晶体的导电机理

在室温下($T=300\text{K}$),电子都处在热运动状态。晶体内部大量处在共价键中的电子,其运动

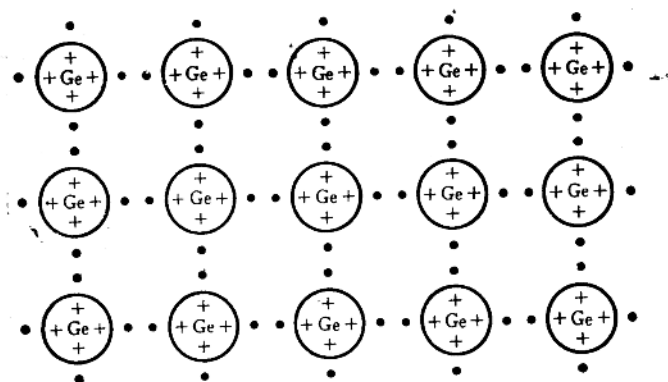


图 1.1.5 低温时硅晶体结构示意图
· 号表示电子, + 表示正电荷

速度是不同的,有的快,有的慢。其中极少数速度快、动能大的电子,有可能冲出共价键的束缚,并游离于晶格之间(图 1.1.6)。这些极少数的电子就变成自由电子。在外电场的作用下,它们就会沿着一定方向运动而形成电流。根据式(1.1.5)可知,自由电子的密度越大,晶体的导电率越大。

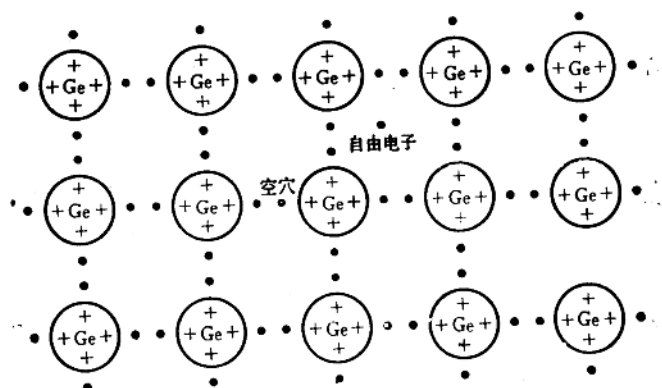


图 1.1.6 室温条件下锗晶体结构示意图
○ 表示空穴, · 表示电子

另外,共价键中的一个电子离开后,就留下一个空穴。空穴处的电荷是不平衡的,因为电子带走一个负电荷,就好像空穴附近多出一个正电荷。

由于在室温下,锗晶体内平均 10^9 个锗原子才提供一个自由电子。每一个空穴事实上都被周围处在共价键中的电子包围着。空穴周围共价键中的电子很可能移到空穴处,使原来的空穴被填补,同时在邻近的共价键处形成一个新的空穴。价电子这种填补空穴又形成新空穴的运动,相当于空穴在晶体中运动。空穴移动到哪里就把一个单位的正电荷带到那里。为了便于理解,我们把空穴设想成某个带正电荷的“粒子”。在常温和无外界电场的情况下,空穴“粒子”在晶体内

的移动是杂乱的。在外电场作用下,空穴“粒子”将沿电场强度的方向迁移。在迁移过程中,也可能与晶体中的原子发生“碰撞”。用 τ' 表示空穴“粒子”两次与晶格碰撞的平均时间间隔。在两次碰撞的间隙内空穴被外电场加速。被加速的程度与空穴“粒子”的某个等效质量 m'_0 有关。这样一来,我们就把处在共价键中的电子填补空穴的运动用一个假想的带正电的空穴“粒子”运动来代替。于是,本征半导体的电导率就可写成

$$\gamma = \frac{n\tau q^2}{2m_0} + \frac{\rho\tau'q^2}{2m'_0} \quad (1.1.6)$$

式中等号右边第一项与式(1.1.5)相同,第二项是空穴在电导率中的贡献。

不难看出,一块电中性的晶体中,自由电子数与空穴数是相等的。有时称它们为电子-空穴对。

以上讨论的是锗晶体的导电机理。这个讨论也适用于硅晶体。但是,在同样的温度下,硅晶体内的自由电子-空穴对要比锗晶体中的少三个多数量级。在硅原子中,外层的四个电子位于第三层;在锗原子中,外层的四个电子位于第四层。硅原子的外层电子距带正电的原子核要比锗原子的外层电子到原子核的距离近一些。因此,硅原子核对其外层电子的吸引力要比锗原子核对其外层电子的吸引力大一些。硅晶体中的共价键要比锗晶体中的共价键“结实”一些。锗晶体共价键中的电子,其动能超过0.7eV(eV为能量单位,称为“电子伏”, $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$)就能变成自由电子,而硅晶体共价键中的电子,其动能必须超过1.1eV才能变成自由电子。在同样的温度下,两种晶体中外层电子热运动的动能基本相同,但硅晶体内共价键中的电子,只有那些具有更大动能的极少部分才能摆脱共价键的束缚,形成电子-空穴对。因此,在外界温度和其它条件相同的情况下,硅晶体的导电率要比锗晶体的导电率低三个多数量级。

1.1.4 掺杂半导体

顾名思义,掺杂是指在本征半导体中掺入一些杂质。这里的掺杂与一般的掺杂概念有些差别:掺入的半导体杂质系指三价元素或五价元素,不是任意的杂质。另外,在本征半导体中掺入微量三价或五价元素之后,整个晶体仍然处于单晶状态,晶格结构不被破坏。掺杂以后的晶体中,只是用三价或五价元素的原子置换极少数本征晶体中的原子。

制成各种半导体器件常用的掺杂半导体,其中杂质原子只有全部原子的 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 。

1. N型半导体

图1.1.7所示是在本征半导体锗中掺入少量五价元素磷(P)以后的晶体结构图。这里用图1.1.3所示五价元素原子的简化模型代替磷原子。磷原子的最外层有五个电子,其中四个电子与相邻的锗原子的外层电子组成共价键。还多一个电子被吸附在磷原子的附近,因为磷原子的内层电子和原子核相当于一个带五个正电荷的小球,它对电子有一定的吸引力。但是,磷原子对这个多余电子的约束力比起它对另外已组成共价键的四个电子的约束力要小得多。只要这个电子的动能超过0.01eV,就可以脱离磷原子的吸引力而变成自由电子。在低温($T=10\text{K}$ 以下)时,这些多余的电子都被吸附在各个磷原子周围,此时这些电子热运动的动能几乎为零。当温度升到 $T=100\text{K}$ 时,大约有95%没有组成共价键的电子变成自由电子;在室温($T=300\text{K}$)条件下,

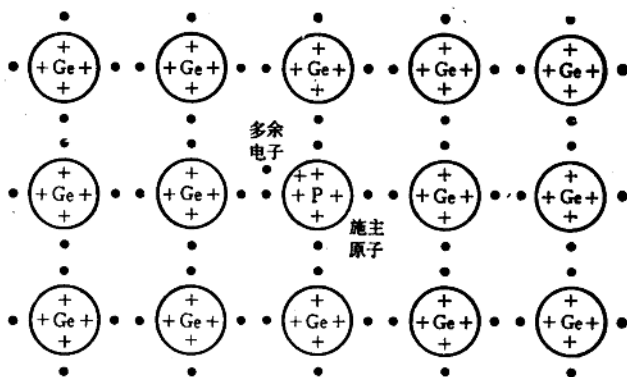


图 1.1.7 锗晶体中掺入少量磷原子的结构图

·表示电子

它们事实上全部都变成自由电子了。

因此,在本征半导体锗中掺入一个五价的磷原子,就等于在晶体中增加了一个自由电子。掺杂过程产生的自由电子与本征半导体内由于热运动或其它因素产生的电子-空穴对不同。掺杂过程只产生一个自由电子,并不形成空穴。一个电子离开磷原子后,留下来的只是一个不能自由移动的带一个正电荷的磷离子。这种掺杂半导体中的电流传递者主要是带负电的电子,习惯上称它为 **N 型半导体**。

磷原子(或其它五价元素的原子)在掺杂半导体中是给出一个电子的,习惯上称这些元素为 **施主杂质**。

2. P 型半导体

图 1.1.8 是在本征半导体锗中掺入微量三价元素铟(In)后的结构示意图。图中,用图 1.1.3 所示的三价元素原子的等效模型代替了铟原子。在晶格中,铟原子置换了少量的锗原子。铟原

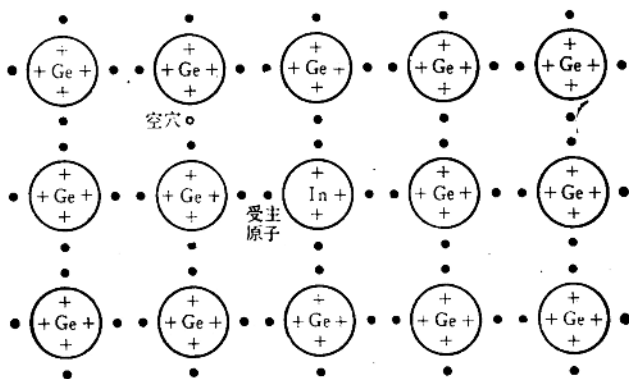


图 1.1.8 锗晶体中掺入少量三价元素铟后的结构图

·表示电子, ○表示空穴