



高等学校试用教材

华东师范大学物理系
万嘉若 林康运 等编

电 子

线 路

基 础

上 册

本书是根据一九八〇年高等学校理科教材编审委员会审定的《电子线路基础教学大纲》编写而成的。全书的内容可按照三种方案供各校选用：① 1~7章、10章和11章（约92学时）；② 1~11章（约110学时）；③ 1~12章（约140学时）。

从高等师范院校物理系的培养目标出发，本书在编写过程中：1) 系统地阐述了无线电电子技术的基本概念、基本电路原理、基本分析方法；2) 坚持课堂教材与实验教材相配合、原理电路与实用电路相结合、单元电路与整机电路相对应的理论联系实际原则；3) 注意了新旧内容的取舍；4) 为促进教材现代化，特摄制一套电子线路基础演示实验录像片，与实验教材三位一体，配套使用。全书分上、下两册，上册包括半导体管原理和特性、放大器基础、反馈放大器、功率放大器、直流放大器和集成运算放大器、调谐放大器和正弦波振荡器；下册包括无线电广播与接收、直流稳压电源、场效应管电路、脉冲与数字电路、黑白电视接收机。

本书为上册，可作为高等师范院校物理专业试用教材，也可供其他大专学生作为学习电子技术的教材用书，并供有关师生和工程技术人员和青年读者自学参考。

责任编辑：郭玉凤

高等学校试用教材
电子线路基础
上册

华东师范大学物理系
万嘉若 林康运 等编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京顺义县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 插页 1 字数 390,000

1985年10月第1版 1985年10月第1次印刷

印数 00,001—7,350

书号 13010·01137 定价 3.00 元

序

华东师范大学物理系曾接受教育部委托,由我和万嘉若等同志,在1960年编写出版“无线电电子学”三册,其后又于1964年编写出版了“无线电基础”。十年动乱中,教学一度停顿。但在这一期间,电子技术却发展很快。电子线路,日新月异。电子计算机的应用也日益普遍。对于作为高等师范院校物理专业基础课的“电子线路基础”,在内容安排上和联系实际的处理是不容易的。既要考虑到学科的发展,又要考虑到我国目前的基础以及各校在物质条件、师资水平和学生来源上的不平衡。我校虽然积极承担了编写任务,但由于人力和经验不足,仓促成书,恐难符合广大读者的重望。本人因原不从事这一方面的工作,这次未能参加编写。希望使用本书的教师和同学,随时提出宝贵意见,以便进一步改进。

陈 涵 奎

一九八一年十月十六日

编者说明

本书原稿曾在华东师范大学物理系七八、七九两届学生“无线电基础”课中试用。后根据八〇年六月高等学校理科教材编审委员会审订的高等师范院校物理系《电子线路基础教学大纲》作了修改,经八一年一月审稿会通过。根据会议意见,对教材内容作了必要的增删。又经陈承志副教授复审了部分章节,最后由林康运、郭三宝负责全书修改和整理,万嘉若教授最后定稿,交付出版。

从高师培养目标出发,按照课程特点和多数师范院校的实际情况,本书在编写、增删、修改工作中注意了下列几点:

1. 力求深入浅出地、系统地阐述无线电电子技术的基本概念、基本电路原理、基本分析方法和整机原理;
2. 从课堂教材与实验教材相配合、原理电路与实用电路相结合、单元电路与整机电路相对应等方面体现理论联系实际的原则;
3. 既注意新内容的增添,又保留传统内容的基本部分作为学习新内容的入门;
4. 适应全国近 200 所高等师范院校不同的条件,全书内容可供各校灵活选用。大体有三种方案:(1)选 1~7 章、10 章和 11 章(约 92 学时);(2)选 1~11 章(约 110 学时);(3)选 1~12 章(约 140 学时)。
5. 为适应教学改革,促进教材的现代化,华东师范大学特摄制一套《电子线路基础演示实验录像片》,与本教材和郭三宝等编《电子线路基础实验》教材三位一体,配套使用。
6. 为便于教学,每章末均附有思考题和练习题。书末附有主要参考书目、习题的部分答案和附录,供参考。

编写过程中,承陈涵奎教授经常关心和指导。万嘉若教授负责主持编写工作。书稿第 1~4 章和第 6~10 章由林康运同志编写。第 12 章、第 5 章和第 11 章由陈贤尧、周学松、潘麟章、刘必虎和王凯同志分工编写。参加过书稿讨论的有俞钟俊、马贞洁、李培健、王忠俊等同志。由林康运和郭三宝同志先后三次对全书进行增删和修整工作。万嘉若教授最后审阅定稿,并编写了附录。本校无线电专业组许多同志对习题解答、实验验证、书稿绘图和誊写工作给予很大的帮助与支持。

本书在审稿会上,得到东北师范大学、南京大学、北京师范大学、西南师范学院、华中师范学院、天津师范大学、华南师范学院、湖南师范学院、陕西师范大学、四平师范学院以及延边大学等兄弟院校老师们认真负责的审阅,指出错误和不妥之处,提出修改建议。此外,山西大学田英老师、广西民族学院庞钴武老师和扬州师范学院茅中良老师曾利用暑期专程来我校具体指教和讨论修改意见。上海无线电十八厂等单位的同志对部分章节内容给予指点和帮助。责任编辑

郭玉风同志对全书作了仔细的审阅，提出许多不妥之处和具体的修改建议，在此一并致以衷心的感谢。

我们恳切地期望兄弟院校师生和广大读者对本书给予批评和指正。

编 者

一九八四年三月

符号说明

辅助符号

1. 顶部记号

- 直流量、平均值(例: 电压平均值 \bar{V} ; 直流电流放大系数 $\bar{\beta}$)
- ——复数(例: 正弦交流电压复数值 \dot{V})

2. 侧部记号

- Δ ——微变量(例: 集电极电流微变量 Δi_c)、反映(阻抗)
- | |——绝对值、模

3. 脚注记号

- $A(a)$ ——受主
- $B(b)$ ——晶体管基极、击穿(例: 基极对地电压 V_b ; 击穿电压 V_{br})
- $C(c)$ ——晶体管集电极、电容器、载波、临界(耦合)、共模
- $D(d)$ ——二极管、场效应管漏极、失真系数、扩散、施主、差模、双端
- $E(e)$ ——晶体管发射极、能级(或能带宽度)、直流电源
- $F(f)$ ——反馈、调频、正向、反映(阻抗)
- $G(g)$ ——场效应管栅极
- H ——高端、行扫描、行同步脉冲间距
- $I(i)$ ——电流、输入、本征
- j ——门限、PN结
- L ——低端、负载
- M ——允许最大值、额定值
- m ——振幅、调幅、互感、质量
- max——最大值
- min——最小值
- $N(n)$ ——电子、中和、噪声
- o ——输出、直流量、谐振固有量、中频段、开环、恒流、谐振或中心(频率)
- off——关闭
- on——开启
- os——输入失调
- $P(p)$ ——空穴、功率、峰值、夹断、调相
- PP(或P-P)——峰峰值
- Q ——工作点
- R ——电阻
- r ——交流等效电阻、上升(时间)、反向、逆程
- rms——均方根值
- $S(s)$ ——场效应管源极、信号源、饱和、正程、单端
- T ——周期、特征(频率)、温度、势垒

- t ——时间、温度
 $V(v)$ ——电压、场扫描
 Z ——齐纳(稳压)
 Σ ——总的量、虚地点

二、主要符号

- A 放大倍数(增益)、安培
 $B(b)$ 频带宽度、电纳、晶体管基极
 BV_{CEO} 基极开路时 $c-e$ 间的击穿电压
 BV_{CBO} 射极开路时 $c-b$ 间的击穿电压
 BV_{CER} $b-e$ 间接入电阻时 $c-e$ 间的击穿电压
 BV_{EBO} 集电极开路时 $e-b$ 间的击穿电压
 BV_{DS} 漏源间的击穿电压
 $C(c)$ 电容、晶体管集电极
 $^{\circ}C$ 摄氏温度
 $CMRR$ 共模抑制比
 CP 时钟脉冲
 $D(d)$ 二极管、场效应管漏极、非线性失真系数
 dB 分贝
 $E(e)$ 直(交)流电源电压、晶体管发射极
 F 反馈系数
 f 频率
 $G(g)$ 电导、用分贝表示的增益、场效应管栅极
 g_m 跨导
 h 三极管混合参数
 I 直流电流、交流电流有效值
 I_{CEO} 穿透电流
 I_{CBO} 反向饱和电流
 i 交流电流瞬时值、直流上叠加交流的总电流
 j $\sqrt{-1}$
 K 开关、绝对温度、耦合系数
 $K_{0.1}$ 矩形系数
 k 耦合系数、玻尔兹曼常数
 L 电感
 M 互感
 m 调幅系数
 N 电子型半导体、变压器绕组的匝数、杂质原子浓度、温度系数
 n 电子浓度、变压器匝数比
 $P(p)$ 空穴型半导体、功率(瞬时功率、空穴浓度)
 Q 静态工作点、 LC 回路品质因数、触发器输出端
 q 电子电量
 $R(r)$ 电阻(动态电阻、微变等效电阻)

- $S(s)$ 场效应管源极、稳压系数、脉动系数、信噪比、西门子、秒
- $T(t)$ 晶体管、周期、绝对温度(时间、摄氏温度)
- Tr 变压器
- $V(v)$ 直流电压(交流瞬时电压或直流上叠加有交流的总电压)、交流电压有效值、伏特
- W 电位器、瓦特
- X 电抗
- $Y(y)$ 导纳(y 参数)
- $Z(z)$ 阻抗(z 参数)
- α 共基连接下电流放大系数、自由振荡阻尼系数
- β 共射连接下电流放大系数
- γ 纹波因数
- η 效率、插入损耗
- μ 放大因数
- θ 导电角
- λ 波长
- π 3.14159...
- ρ 电阻率、LC 回路特性阻抗
- τ 时间常数
- φ 相位角
- ω 角频率
- Ω 欧姆、低频(调制信号)角频率
- ξ 谐振回路失谐量

目 录

序	1	2.2.3 放大器的动态范围	40
编者说明	2	2.3 放大器的偏置电路	42
符号说明	4	2.3.1 工作点的稳定性问题	42
		2.3.2 分压式电流负反馈偏置放大器	42
		2.3.3 其它稳定工作点的偏置电路	45
第一章 半导体管的原理和特性		2.4 等效电路分析法	47
1.1 半导体的导电原理	1	2.4.1 简单的等效电路	47
1.1.1 半导体的特点	1	2.4.2 低频 h 参数等效电路	49
1.1.2 本征半导体	1	2.4.3 放大器的输入电阻和输出电阻	53
1.1.3 杂质半导体	4	2.4.4 等效电路法分析举例	55
1.1.4 PN 结	5	2.5 放大器的频率特性	57
1.2 半导体二极管	7	2.5.1 放大器中频段增益	58
1.2.1 二极管的结构、符号和分类	7	2.5.2 放大器低频段频率特性	59
1.2.2 二极管的伏安特性	8	2.5.3 放大器高频段频率特性	61
1.2.3 二极管的电容效应	10	2.6 多级放大器	63
1.2.4 二极管的等效电路	12	2.6.1 级间耦合方式	63
1.2.5 二极管的主要参数	12	2.6.2 多级放大器的增益	65
1.3 半导体三极管	13	2.6.3 多级放大器的频响	67
1.3.1 三极管的工作原理	13	*2.7 放大器的设计	69
1.3.2 三极管的电流分配关系	15	思考题、练习题	71
1.3.3 三极管的特性曲线	17	主要参考书目	74
1.3.4 三极管的主要参数	20		
1.3.5 三极管的 T 型等效电路	22		
思考题、练习题	23		
主要参考书目	24		
		第三章 反馈放大器	
第二章 放大器基础		3.1 反馈的基本概念	75
2.1 概述	25	3.1.1 反馈放大器的构成	75
2.1.1 放大器的基本概念	25	3.1.2 反馈放大器的基本关系式	76
2.1.2 放大器的工作原理	25	3.2 反馈放大器的四种基本类型	77
2.1.3 放大器的直流通路和静态工作点	27	3.2.1 反馈放大器的基本类型和传输函数	77
2.1.4 放大器的性能指标	31	3.2.2 串联电流负反馈	79
2.2 放大器的图解法	36	3.2.3 并联电压负反馈	80
2.2.1 静态工作点和直流负载线	36	3.2.4 串联电压负反馈	81
2.2.2 交流负载线和动态分析	38	3.2.5 并联电流负反馈	82
		3.3 负反馈对放大器性能的影响	83

3.3.1	提高增益稳定性	83
3.3.2	改善频率响应	84
3.3.3	负反馈放大器的输入电阻和输出电阻	86
3.3.4	减小非线性失真	88
3.3.5	抑制内部噪声	88
3.4	负反馈放大器的分析	89
3.4.1	串联电流负反馈放大器	89
3.4.2	并联电压负反馈放大器	92
3.4.3	射极输出器	93
3.4.4	共基放大电路	98
3.4.5	四种基本类型负反馈电路的特点比较	101
*3.4.6	多级负反馈放大器	101
	思考题、练习题	104
	主要参考书目	110

第四章 功率放大器

4.1	功率放大器的特点和分类	111
4.1.1	功率放大器的特点	111
4.1.2	功率放大器的分类	112
4.2	甲类功率放大器	113
4.2.1	变压器的作用	113
4.2.2	甲类功放电路分析	115
4.2.3	甲类功放电路设计举例	120
4.3	乙类推挽功率放大器	122
4.3.1	乙类推挽功放电路原理	122
4.3.2	输出功率、效率、管耗和耐压	125
*4.3.3	乙类推挽放大器的非线性失真	127
*4.3.4	乙类推挽功放电路设计举例	129
4.4	无输出变压器功放电路	130
4.4.1	互补对称式电路原理	130
4.4.2	实际互补对称式功放电路的组成	131
*4.4.3	OCL 电路	135
4.5	扩音机	135
4.5.1	扩音机电路实例	135
4.5.2	高品质晶体管扩音机	138
4.5.3	扩音机扬声器的配接方法	138
	思考题、练习题	140
	主要参考书目	141

第五章 直流放大器和集成运算放大器

5.1	直流放大器的特点	142
5.1.1	级间耦合问题	142
5.1.2	零点漂移问题	144
5.1.3	零输入和零输出的问题	144
5.2	差动式直流放大器	144
5.2.1	典型差动电路	145
5.2.2	差动电路的其它形式	151
5.3	运算放大器	159
5.3.1	概述	159
5.3.2	运算放大器的基本特性与功能	160
5.4	集成运算放大器	165
5.4.1	集成电路的基础电路	166
5.4.2	集成运算放大器及其应用	170
*5.4.3	集成运算放大器参数测量及使用方法	179
	思考题、练习题	181
	主要参考书目	184

第六章 调谐放大器

6.1	调谐放大器的特点	185
6.1.1	概述	185
6.1.2	调谐放大器的特点	186
6.2	谐振回路	187
6.2.1	LC 并联回路的谐振特性	187
*6.2.2	并联回路的谐振曲线和通频带	188
*6.2.3	耦合谐振回路	190
6.2.4	信号源负载和谐振回路	195
6.3	晶体管高频等效电路	197
6.3.1	共基极晶体管高频T型等效电路	197
6.3.2	晶体管共射混合π型等效电路	198
6.3.3	f_{β} 、 f_T 、 f_{α} 的关系	199
6.3.4	晶体管Y参数及其等效电路	201
6.4	调谐放大电路特性分析	204
*6.4.1	用Y参数等效电路分析调谐放大器	204
6.4.2	单调谐放大器	207
6.4.3	调谐放大器的稳定性问题	211
6.5	中频放大电路	213
6.5.1	双调谐中频放大电路	213
*6.5.2	多级单调谐中频放大电路	216

6.5.3 参差调谐放大器	216
6.5.4 集成运放组成中频放大器	218
思考题、练习题	219
主要参考书目	220

第七章 正弦波振荡器

7.1 自激振荡原理与条件	221
7.1.1 自激振荡和振荡条件	221
7.1.2 振荡的建立与稳定	224
7.2 变压器耦合 LC 振荡器	228
7.2.1 振荡器的偏置和工作状态	228
7.2.2 变压器耦合振荡器分析	229
7.3 三点式 LC 振荡器	231
7.3.1 电感三点式振荡器	231
7.3.2 电容三点式振荡器	233

7.3.3 三点式振荡器组成原则	234
7.3.4 频率稳定度及 LC 振荡器的改进	234
7.4 石英晶体振荡器	239
7.4.1 石英谐振器	240
7.4.2 石英晶体振荡器	241
7.5 RC 振荡器	243
7.5.1 RC 相移振荡器	243
7.5.2 RC 桥式振荡器	247
*7.5.3 RC 桥式振荡器应用实例	251
思考题、练习题	253
上册主要参考书目	255
上册部分练习题答案	256
上册主要参考书目	253
附录 线性电路分析的理论基础	259

第一章 半导体管的原理和特性

半导体器件是近代电子学的重要组成部分。本章在复习半导体导电原理的基础上,介绍PN结单向导电原理, 半导体二极管的伏安特性、参数、以及半导体三极管(简称三极管)的电流分配关系、特性和参数。这些内容也是学习集成电路的基础知识。

1.1 半导体的导电原理

1.1.1 半导体的特点

物质按导电能力可分为导体、半导体和绝缘体三大类。电阻率小于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 的属于导体。电阻率大于 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 的属于绝缘体。电阻率介于上述数值之间的为半导体。半导体器件多以硅或锗的单晶体为基本材料,故半导体管又常称“晶体管”。

半导体获得广泛应用的原因是基于以下一些特点:

1. 在纯净半导体中掺入微量杂质, 导电能力急剧增强。例如, 单晶硅中掺入百万分之一的某种杂质, 电阻率几乎可下降一百万倍。
2. 半导体电阻率随温度升高而迅速减小, 温度系数是负的。此外, 电场、磁场和光照作用都会影响半导体的导电能力, 利用半导体的各种特性可制成如热敏电阻、光导管、晶体三极管、场效应管和集成电路等器件。

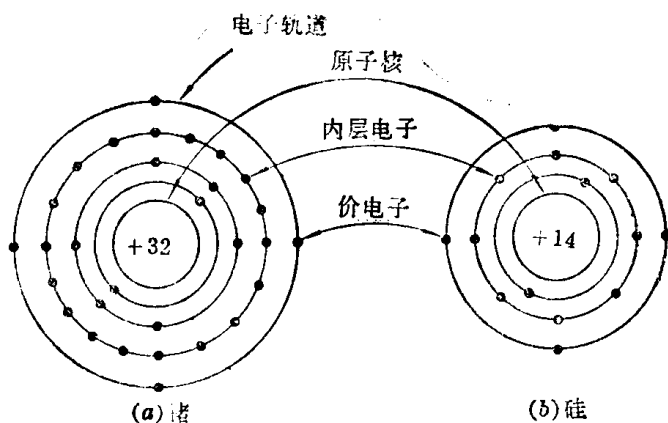


图 1.1.1 原子模型

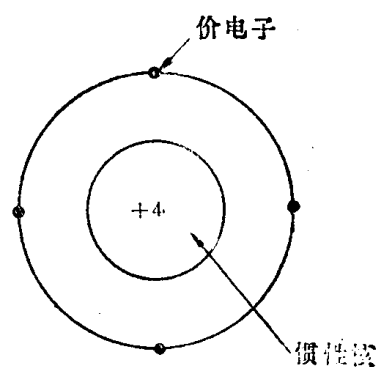


图 1.1.2 原子的简化模型

1.1.2 本征半导体

一、单晶硅中原子的共价键结构

物质的导电性能决定于原子结构。图 1.1.1 给出硅和锗的原子模型, 它们的原子序数分别是 14 和 32, 图中最外层的电子称为价电子, 它们都有四个价电子, 属于四价元素。若将图中内

层电子与原子核看作一个整体,称为惯性核,则四价元素的原子模型可简化如图 1.1.2 所示。

当许多原子排列为对称的周期性点阵时,即成晶体结构,如图 1.1.3 所示。图中相邻原子通过一对价电子互相牵制,这一对价电子组成所谓“共价键”。在晶体结构中,每个原子的价电子不再单为自身原子核所束缚,而为晶体中全体原子所共有,孤立原子的能级分裂成许多相差极微的能级而形成能带^①。

为形象起见,常以图 1.1.4 所示形式来描述晶体中的共价键结构。根据原子理论我们知道,外层电子为八个的原子才处于稳定状态。由图可见,硅(或锗)原子只有四个价电子,但由于相邻原子之间共有价电子而构成共价键的结果,使每个硅原子周围如同有八个电子,成为稳定的原子结构,因此,在正常情况下,共价键的价电子不能参与导电。

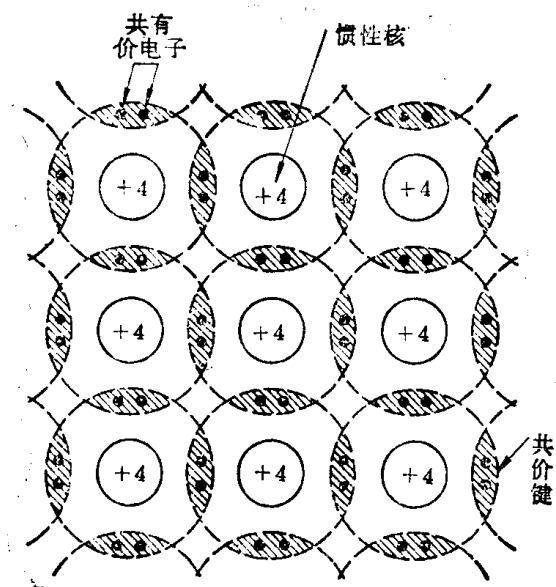


图 1.1.3 硅的晶体结构

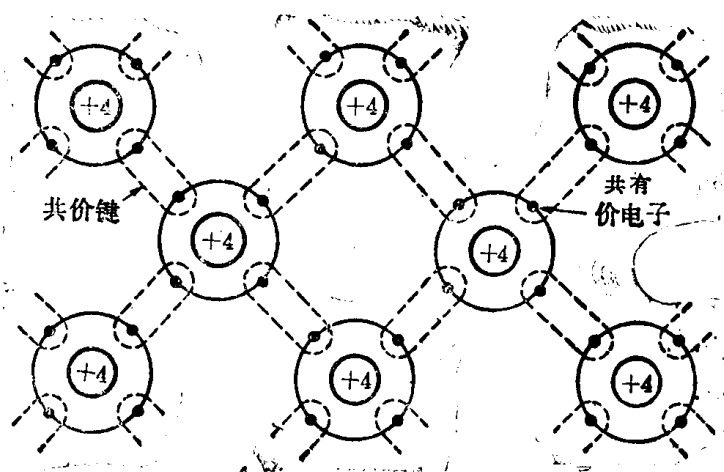


图 1.1.4 共价键结构

二、本征半导体中的载流子——电子和空穴

存在于物质结构中可以自由移动的带电粒子统称为载流子。如金属导体中的自由电子就是带负电的载流子。

纯净和结构完整的半导体称为本征半导体。在绝对零度和无外界激发状态下,本征半导体中的价电子几乎都处于共价键结构而不能参与导电。若受到热或光等外界因素激发,少量共价电子挣脱价键束缚而成为自由电子,与此同时,在每个挣脱价电子的价键处留下一个空位,在图 1.1.5 中用“○”表示,常称这种空位为空穴。当出现一个空穴时,由于失去一个带负电的价电子,该原子附近呈现正电性,所以空穴是带有电荷量与电子相等的正电荷。出现一个空穴,附近的共价电子就有了活动余地,很容易过来填补这个空穴,同时在邻近价键上出现空穴,这个过程相当于空穴的移位。在外电场作用下,空穴的不断移位可认为是正电荷的定向运动^②。与电子定向

^① 关于半导体导电机理的能带理论可参阅童诗白主编《模拟电子技术基础》上册第一章。

^② Shockley, W. "Electrons & Holes in Semiconductors" D. Van Nostrand Company, Inc. Princeton, N. J. reprinted February, 1963.

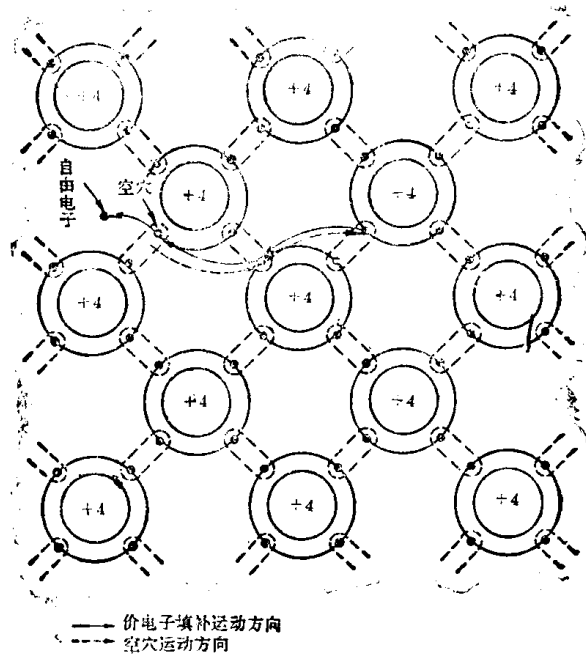


图 1.1.5 本征半导体中载流子

运动形成的电子电流相仿,空穴的定向运动则形成空穴电流。

由上述本征半导体中导电载流子的情况可见,金属和半导体两者的基本区别在于:金属为单极型的,即只由负电荷的电子构成载流子,而半导体则是双极型的,即有符号相反的两种载流子,电子和空穴。

三、本征激发和复合

由于热运动使价电子挣脱共价键的束缚,从而产生载流子,这一现象称为本征激发。在本征激发下,半导体内电子和空穴成对地产生,所以在本征半导体中,自由电子(以下简称电子)数量等于空穴的数量。单位体积中的电子(或空穴)数称为电子(或空穴)浓度,常以 n_i (或 p_i)表示。根据玻尔兹曼统计理论和量子理论分析,可得

$$n_i = p_i = AT^{3/2}e^{-E_g/2kT} \quad (1.1.1)^{[6]}$$

式中 A 是常数 (4.28×10^{15}); T 是绝对温度; k 是玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} J/K); E_g 是半导体材料的禁带宽度。在室温下 ($T=300$ K),硅的 E_g 约为 1.1 eV(电子伏特),锗的 E_g 约为 0.67 eV。由上式可推算,硅的 n_i (或 p_i) 约为 $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 锗的约为 $2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。室温下,硅的本征载流子浓度远小于锗的本征载流子浓度,所以硅器件的漏电流比锗器件小得多。

与本征激发相反,由于电子与其它粒子碰撞时可能失去动能并陷入某些空穴,致使电子和空穴成对地消失,这种现象称为复合。在半导体内,本征激发和复合,这两种现象同时存在,当单位时间、单位体积内本征激发产生的电子空穴对(产生率)等于复合掉的电子空穴对(复合率)时,激发与复合达到动态平衡,在一定温度下,本征半导体中载流子浓度维持一定,此即为(1.1.1)式的物理意义。实验和分析表明,在室温附近,对硅而言,温度每升高 8°C , n_i 约增加一倍。对锗而言,温升 10°C , n_i 约增加一倍。温度越高, n_i 越大,而电阻率越小,这表明半导体具有负温度系数。

1.1.3 杂质半导体

在室温下,硅晶体中原子浓度约为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, 本征载流子浓度 n_i 约为 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 两者相比,载流子所占百分比甚小,所以本征半导体的导电能力很差,实用价值不大。但是,有目的地在本征半导体中掺入少量杂质,则其导电能力和导电类型将会发生显著变化。

一、N型半导体

将微量五价元素,例如磷(P),掺入单晶硅中,一些磷原子将取代晶格结构中的硅原子,形成如图 1.1.6 所示结构。每个磷原子外层的五个价电子,除了与相邻四个硅原子以共价键方式相

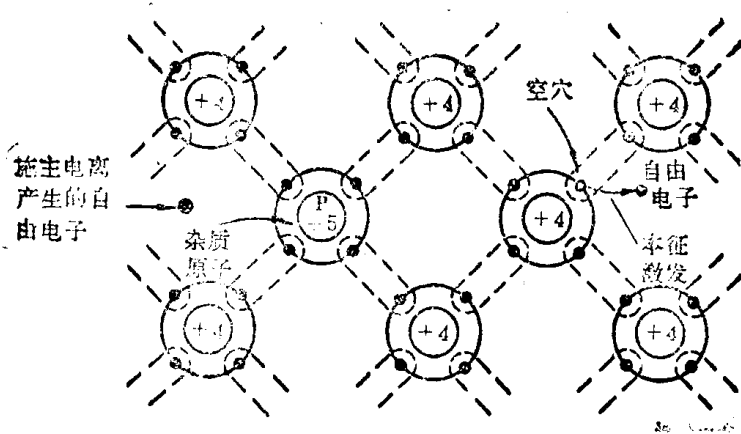


图 1.1.6 N型半导体中载流子

结合以外,还多一个价电子。室温下,这个价电子非常容易挣脱磷原子核的束缚成为自由电子,而磷原子则变为正离子被束缚在晶格结构中,这种现象称为施主电离。假如掺杂浓度为百万分之一,每个磷原子产生一个自由电子,则由掺杂产生的自由电子浓度约为 10^{16} cm^{-3} 数量级,远大于本征激发产生的电子和空穴浓度,于是电子成为这种半导体中主要的载流子。我们称这类半导体为N型(即电子型)半导体,并且称电子为多数载流子,空穴为少数载流子。

二、P型半导体

将微量三价元素,例如硼(B),掺入单晶硅中,一些硼原子取代晶格结构中的硅原子,形成如图 1.1.7 所示结构。硼是三价元素,每个硼原子只能与相邻三个硅原子之间构成完整的共价键,而与相邻的第四个硅原子之间构成不完整的共价键,即价键上存在一个空位,这种状态,使邻近硅原子价键上的价电子很容易过来填补,其结果使硼原子变为负离子,而且在邻近硅原子的价键上出现一个空穴,这种现象称为受主电离。室温下,受主电离所需的能量很小,几乎每个硼原子都被电离,使掺杂后的半导体中存在大量的空穴和束缚于晶格结构中的负离子。与N型半导体相对应,这种以带正电的空穴为主要载流子的半导体称为P型(即空穴型)半导体,其中大量的空穴称为多数载流子,少量的电子叫做少数载流子。

如果在N型半导体中掺杂足够浓度的P型杂质,空穴将大部分电子复合掉,还多出大量空穴,结果使N型半导体转变为P型半导体,这种作用称为杂质补偿。在制造平面型半导体管和集成电路中,广泛采用的多次扩散掺杂工艺就是利用这种杂质补偿作用。

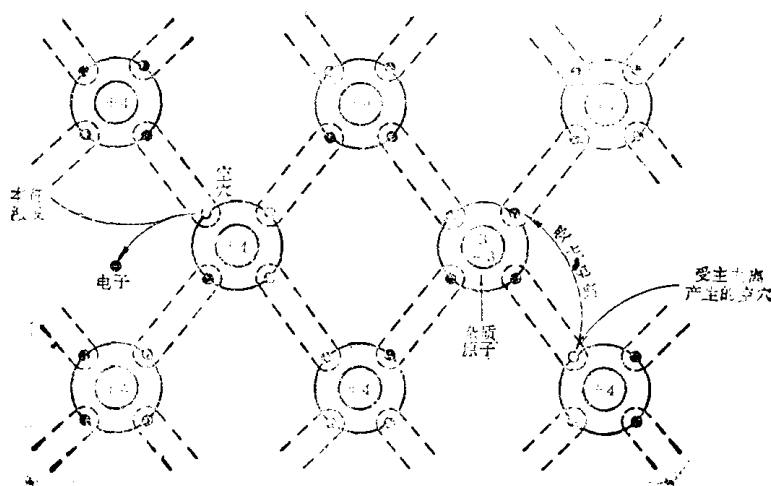


图 1.1.7 P型半导体中载流子

1.1.4 PN 结

一、PN 结的形成

PN 结是将 P 型和 N 型半导体通过一定的掺杂工艺结合而成的。结合以后，交界面两边的载流子浓度相差很大，P 区的空穴浓度大，大量空穴将通过交界面向 N 区扩散，与此同时，N 区的电子浓度大，电子将向 P 区扩散。由两类多数载流子的扩散运动形成扩散电流，方向从 P 区流入 N 区。上述扩散过程是有限度的，因为当交界面两边的载流子向对方扩散后，在交界面两侧分别留下不能移动的正、负离子，如图 1.1.8 所示。在交界面附近，P 区内留下带负电的受主杂质

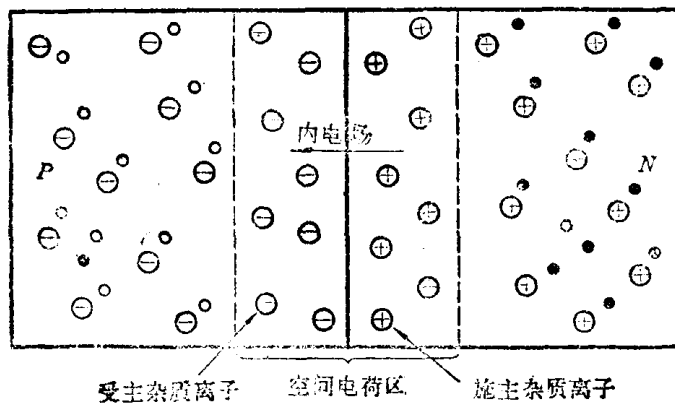


图 1.1.8 动态平衡下的 PN 结

离子，形成负空间电荷层。在另一边 N 区内留下带正电的施主杂质离子，形成正空间电荷层。在正、负空间电荷层之间建立一定的电位差和内电场，电场方向由 N 区指向 P 区。内电场将削弱扩散运动，但有利于交界面两边少数载流子各自向对方的漂移运动，产生漂移电流，方向由 N 区流入 P 区。起初，扩散电流远大于漂移电流，随着扩散进行，正、负空间层的电荷量增加，内电场随着增强，扩散电流逐渐减小，直至扩散电流等于漂移电流，达到动态平衡。在动态平衡下，交界面上维持一定宽度(约几微米~几十微米)的正、负空间电荷区，这就是 PN 结。在空间电荷区内，

几乎不存在载流子,故可称耗尽区。它对两边多数载流子的扩散过程具有阻挡作用,又可称阻挡层或势垒区。在势垒区中,内电场和电位分布情况如图 1.1.9 所示。

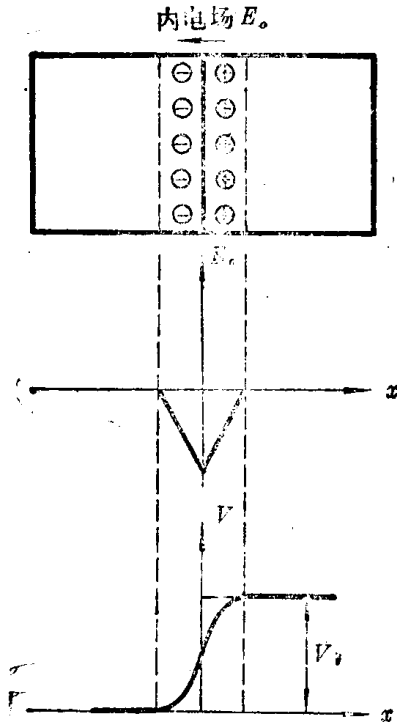


图 1.1.9 PN 结的内电场和电位分布

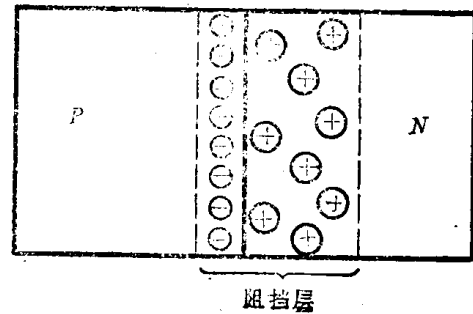


图 1.1.10 不对称 PN 结

PN 结两侧的正、负空间电荷区,带电量相等,整体保持电中性。假如 P 区和 N 区的掺杂浓度相同,那么正电荷层的厚度等于负电荷层的厚度。实际使用的 PN 结,两边掺杂浓度往往相差很大,形成所谓不对称 PN 结。例如,设 P 区掺杂浓度远大于 N 区掺杂浓度,则正空间电荷层厚度远大于负空间电荷层厚度,如图 1.1.10 所示,图中阻挡层(或耗尽区)主要伸入 N 区。这种 PN 结常记作 P^+N 结, P^+ 代表高掺杂区。

二、PN 结的单向导电性

单向导电性是 PN 结的基本特性。下面用载流子运动的规律解释这种特性。

按图 1.1.11 将电源 E 的正极接 P 区,负极接 N 区,这种连接方式称为正向接法,或称正向偏置。这时,外加电压在阻挡层内附加一外电场,方向与 PN 结内电场相反,结内电位差由 V_0 减小到 $(V_0 - V_f)$,破坏了原先的动态平衡,多数载流子被驱向阻挡层,空间电荷减少,阻挡层变薄,两边的多数载流子易于通过阻挡层,扩散电流增大,通过 PN 结的主要是扩散电流。扩散电流随外加电压的增加而明显增大,故正向偏置时,PN 结呈现很小的电阻值,处于正向导通状态。

若按图 1.1.12 将电源正极接 N 区,负极接 P 区,则这种连接方式称为反向接法,或称反向偏置。此时,阻挡层中,外加电场与内电场方向一致,结内电位差由 V_0 增至 $(V_0 + V_f)$,驱使更多的多数载流子背离阻挡层,空间电荷增加,阻挡层变厚,多数载流子的扩散电流将被削弱,而漂移电流基本不变,于是通过 PN 结的电流主要取决于漂移电流。温度不变,少数载流子的浓度不变,通