

内 容 简 介

本书是华中工学院自动控制系工业电子学教研室近年来在总结教学经验和学习国内外较新的教材和文献资料的基础上编写而成的。本书分上、中、下三册出版。上册包括：放大电路基础，频率特性与多级放大，场效应管放大器以及反馈放大器与正弦波振荡器；中册包括：功率放大器，运算放大器，直流稳压电源和电子电路的计算机辅助分析；下册包括：脉冲数字电路，触发器与多谐振荡器，基本数字部件，场效应管数字集成电路和晶闸管电路。

书中通过各种半导体器件及其电路，阐述电子技术中的基本概念、基本原理和基本分析方法。各部分内容均介绍了电路实例，并配有一定数量的例题和习题。

本书可供高等学校电力工程专业和与其相近的专业作为“电子技术基础”课程的试用教材，也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

电 子 技 术 基 础

上 册

华中工学院工业电子学教研室编

康 华 光 主 编

*

人 民 教 育 出 版 社 出 版

新 华 书 店 北 京 发 行 所 发 行

北 京 印 刷 一 厂 印 装

*

开本 787×1092¹/₃₂ 印张 14 千字 337,000

1979年3月第1版 1979年9月第1次印刷

印数 00,001—105,000

书号 15012·0140 定价 1.15 元

序 言

本书是根据高等学校工科基础课电工、无线电类教材编写会议(一九七七年十一月合肥会议)所制订的“电子技术基础”(电力类)教材编写大纲编写的。在编写过程中,我们力图以马列主义、毛泽东思想为指导,运用辩证唯物主义观点和方法来阐明本学科规律。

“电子技术基础”是电力工程类各专业的一门技术基础课,它是研究各种半导体器件的性能、电路及其应用的学科。从本学科内容大的方面来划分,本书上、中两册属模拟电子技术,下册属数字电子技术;前者主要是讨论线性电路,后者则着重讨论脉冲数字电路。

教材中注意总结我们近年来的教学实践经验,加强了基础理论,如加强了半导体的物理基础和电路的基本分析方法;同时也注意吸取国内外的先进技术,如加强了线性集成电路和数字集成电路(包括中、大规模集成电路)的原理和应用,新增了电子电路的计算机辅助分析等内容。

在内容的安排上,注意贯彻从实际出发,由浅入深、由特殊到一般、从感性上升到理性等原则。通过各种半导体器件及其电路来阐明电子技术中的基本概念、基本原理和基本分析方法。对于基本的和常用的半导体电路(包括脉冲数字电路),除了作定性的分析外,还介绍了工程计算或设计方法。为了加深对课堂知识的理解,列举了若干电路实例,并配有一定数量的例题、思考题和习题。

在使用本教材时,请注意下列几点:

(1) 本课程是在学完普通物理学和电工原理的大部分内容之后开设的,课程之间的相互配合和衔接非常重要。例如,在第一章

目 录

第一章 放大电路基础

1.1 半导体的物理基础	1
1.1.1 导体、半导体和绝缘体	1
1.1.2 半导体的共价键结构与能带	2
1.1.3 本征半导体、空穴及其导电作用	7
1.1.4 杂质半导体	10
1.1.5 半导体中载流子的漂移和扩散	15
1.2 PN 结及其单向导电性	19
1.2.1 PN 结的形成	20
1.2.2 PN 结的单向导电性	24
1.2.3 非平衡载流子的注入	28
1.2.4 PN 结的反向击穿	30
1.3 半导体二极管	32
1.3.1 二极管的结构	32
1.3.2 二极管的伏安特性	33
1.3.3 二极管参数	35
*1.3.4 国产半导体器件的符号和命名方法	37
1.4 二极管的基本电路	38
1.4.1 简单二极管电路及其图解分析	39
1.4.2 二极管电路的微变等效电路分析	41
1.5 半导体三极管	44
1.5.1 三极管结构简介	45
1.5.2 三极管的电流分配与放大原理	47
1.5.3 三极管的特性曲线	54
1.5.4 三极管的主要参数	60
1.6 放大电路的图解分析法	71
1.6.1 静态工作情况分析	75
1.6.2 动态工作情况分析	77
1.7 放大器的微变等效电路分析法	91

1·7·1	半导体三极管的混合参数及其等效电路	91
1·7·2	用 h 参数等效电路分析共射极基本放大电路	103
1·8	放大器的工作点稳定问题	113
1·8·1	温度对工作点的影响	113
1·8·2	射极偏置电路	119
1·8·3	集电极-基极偏置电路	129
1·9	单级放大器的设计	138
1·10	共集电极电路——射极输出器	143
1·11	共基极电路	153
1·12	恒流源电路	158
	本章小结	162
	参考文献	164
	思考题和习题	164

第二章 频率特性与多级放大器

2·1	放大器频率响应的概念	174
2·2	RC 耦合单级放大器的低频特性	178
2·2·1	隔直电容的影响	180
2·2·2	射极旁路电容的影响	183
2·3	单级放大器的高频特性	190
2·3·1	半导体三极管的频率参数	190
2·3·2	半导体三极管的混合 π 型等效电路	193
2·3·3	单级放大器的混合 π 型简化电路	200
2·4	单级放大器的瞬态特性	204
2·4·1	阶跃电压作为放大器的基本信号	205
2·4·2	单级放大器的阶跃响应	206
2·5	RC 耦合多级放大器	212
2·5·1	多级放大器的一般问题	212
2·5·2	RC 耦合多级放大器电路	213
2·5·3	电压放大倍数的计算	214
2·6	多级放大器的频率特性	219
2·6·1	多级放大器的低频特性	219
2·6·2	多级放大器的高频特性	220

*2.7	多级放大器的通频带	225
2.7.1	通频带与级数之间的关系	225
2.7.2	采用组合电路增宽频带	228
*2.8	多级放大器中的干扰和噪声	230
2.8.1	放大器中的噪声	231
2.8.2	放大器中的干扰	234
*2.9	放大器的安装工艺与调试	239
	本章小结	243
	参考文献	245
	思考题和习题	246

第三章 场效应管放大器

3.1	结型场效应管	250
3.1.1	结型场效应管的结构和基本工作原理	251
3.1.2	结型场效应管的特性曲线及参数	254
3.2	绝缘栅场效应管	263
3.2.1	N 沟道增强型绝缘栅场效应管的结构和基本工作原理	264
3.2.2	N 沟道增强型绝缘栅场效应管的特性曲线及参数	267
3.2.3	N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管的工作特点	272
3.2.4	各种场效应管的特性比较	273
3.2.5	场效应管的特点及使用注意事项	276
3.3	场效应管放大器	277
3.3.1	场效应管的直流偏置电路及静态分析	277
3.3.2	场效应管放大器的微变等效电路分析法	283
3.3.3	三种基本放大电路性能比较	293
3.3.4	场效应管放大器实例	293
	本章小结	297
	参考文献	298
	思考题和习题	298

第四章 反馈放大器与正弦波振荡器

4.1	反馈的基本概念与分类	302
4.1.1	反馈的基本概念	302
4.1.2	反馈的分类	303

4.2	负反馈放大器的方框图及放大倍数的一般表示式	309
4.2.1	负反馈放大器的方框图	309
4.2.2	负反馈放大器放大倍数的一般表示式	311
4.3	负反馈对放大器性能的改善	316
4.3.1	增加放大倍数的恒定性	316
4.3.2	扩展频带	318
4.3.3	减少非线性失真	321
4.3.4	抑制干扰和噪声	323
4.3.5	对输入电阻和输出电阻的影响	323
4.4	负反馈放大器放大倍数的近似估算	325
	小结	332
*4.5	负反馈放大器输入电阻及输出电阻的计算	333
4.5.1	输入电阻的计算	334
4.5.2	输出电阻的计算	337
*4.6	负反馈放大器的分析方法	343
4.6.1	电压串联负反馈电路	345
4.6.2	电流串联负反馈电路	350
4.6.3	电压并联负反馈电路	353
4.6.4	电流并联负反馈电路	356
	小结	359
*4.7	负反馈放大器的稳定问题	360
4.7.1	负反馈放大器的自激及稳定工作的条件	360
4.7.2	反馈放大器的补偿方法	366
4.8	正弦波振荡器的一般问题	373
4.9	RC 正弦波振荡器	376
4.9.1	RC 桥式振荡器	376
*4.9.2	RC 移相式振荡器	383
*4.9.3	RC 正弦波振荡器实例	387
4.10	LC 正弦波振荡器	391
4.10.1	LC 并联谐振回路的选频特性	391
4.10.2	变压器反馈式 LC 振荡器	395
4.10.3	其他 LC 振荡器	398

*4·10·4	LC 振荡器元件参数的选择	402
4·10·5	正弦波振荡器的频率稳定问题	404
4·10·6	石英晶体振荡器	406
*4·10·7	LC 振荡器实例	410
本章小结		413
参考文献		416
思考题和习题		416
附录一	反馈放大器划分为基本放大器(A 方框)和反馈网络 (F 方框)的原理和法则	426
附录二	正弦波振荡器的频率稳定性	431

第一章 放大电路基础

本章在复习物理学中的半导体物理基础上，首先介绍晶体的共价键结构和能带图，然后介绍本征半导体以及 N 型、 P 型半导体的导电性能。接着讨论 PN 结的物理特性和单向导电原理，半导体二极管的伏安特性、参数及基本电路分析。在讨论二极管的基础上，研究三极管的工作原理、特性和参数。作为半导体电路分析的基本工具，重点讨论了共射极基本放大电路的图解分析法和等效电路分析法，并介绍了温度稳定电路，随后通过实例说明单级放大电路的工程设计方法。对于放大电路的其他两种基本组态——共集电极电路和共基极电路，也作了分析，并对三种组态的性能作了比较。最后，介绍了在实践中用得较多的恒流源电路。

1.1 半导体的物理基础

半导体器件是近代电子学的重要组成部分，由于半导体器件具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点而得到广泛的应用。特别是集成电路的出现，使电子装置在微型化和可靠性方面向前推进了一大步。

在研究半导体器件的特性与电路之前，我们先对半导体的物理基础作一简要的复习。

1.1.1 导体、半导体和绝缘体

在自然界中，存在着许多不同的物质，有的物质很容易传导电流，称为导体。金属一般都是导体，如铜、铝、银等。也有的物质几乎不传导电流，称为绝缘体，如橡皮、陶瓷、塑料和石英等。此外还有一类物质，它的导电性能介于导体和绝缘体之间，我们称它为

半导体，例如锗、硅、硒、砷化镓，一些硫化物和氧化物等。除了在导电能力方面区分导体、半导体和绝缘体外，半导体还具有许多不同于其他物质的特点：

1. 半导体对价电子的束缚较弱，当半导体受到外界光和热的刺激时，它便释放价电子，从而使导电能力发生显著的变化，这种对外界的敏感性使半导体具有多种用途，如制成各种光敏元件和热敏元件。

2. 在纯净的半导体中加入微量的杂质，则半导体的导电能力就会有急剧的增加，这是半导体最突出的性质。利用这个特性，可制造出各种不同的半导体器件。

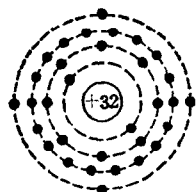
以上提出半导体的特点说明半导体的导电机构必然不同于其它物质，为了理解这些特点，我们必须了解半导体的结构与能带分布情况。

1·1·2 半导体的共价键结构与能带

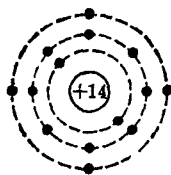
1. 原子结构和共价键

在近代电子学中，用得最多的半导体是锗和硅，它们的原子结构见图 1·1·1(a)。锗和硅的外层电子都是 4 个，所以锗和硅都是四价元素。外层电子受原子核的束缚力最小，称为价电子。物质的化学性质是由最外层的价电子数决定的，半导体的导电性质也与价电子有关，因此价电子是我们研究的对象，一般画图时，只用图 1·1·1(b)所示的简化模型。

现在所用的半导体材料都要制成晶体。就是说这些物质的原子是按一定的规则整齐地排列着，组成某种形式的晶体点阵。例如锗和硅原子就是按四角形系统组成晶体点阵，即每个原子是处于正四面体中心，而有四个其它原子位于四面体的顶点，如图 1·1·2 所示。硅或锗原子组成晶体后，原子之间靠得很近，原来分属于每个原子的价电子就要受到相邻原子的影响而使价电子为两个原子所“共有”了，这样每个价电子个别的轨道

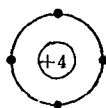


锗(Ge)原子

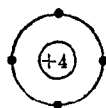


硅(Si)原子

(a)



锗(Ge)原子



硅(Si)原子

(b)

图 1·1·1 锗和硅原子结构模型

(a) 原子结构图 (b) 简化模型

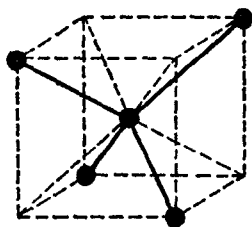


图 1·1·2 硅和锗的晶体结构

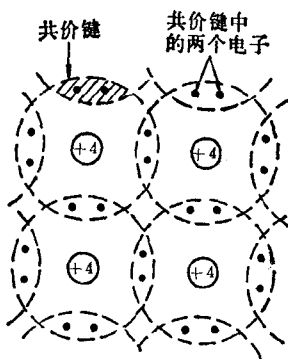


图 1·1·3 硅和锗晶体共价键结构

就变成两个相邻原子之间两个价电子的公共的轨道，形成了晶体中“共价键”结构。图 1·1·3 表示硅或锗晶体构成共价键的示意图，图中用 +4 表示原子核和除价电子外的内层电子所组成的惯性

核心的电荷。由图可见，共价键上的两个电子是由相邻原子各用一个价电子组成的，共价键内的两个电子称为“束缚电子”。因此共价键是表示两个共有价电子所形成的束缚作用。由于共价键有很强的结合力，使各原子在晶体中按一定形式排列，形成点阵。而共价键中的电子，受两个原子核引力的约束，如果没有足够的能量是不易脱离公共轨道的。因此在绝对零度（即 $T^* = 0 \text{ K}$ ）和无外界激发时，硅或锗晶体中没有自由电子存在，只有在激发的情况，例如在常温下（ 300 K ），少数电子获得动能才能打破共价键成为自由电子，这个问题我们在后面还要讨论。

2. 能级和能带

根据原子结构理论，电子在原子的各层轨道上运动，都具有一定的能量，越靠外层的轨道能量越大，显然价电子具有最高的能量。而且，每一层轨道对应一个特定的能量值，称为“能级”，电子是处在不连续的能级上。

当原子组成晶体后，大量的原子紧密地排列着，每一立方厘米体积的晶体有 $10^{22} \sim 10^{23}$ 个原子，即原子浓度很大。根据原子理论中的“不相容”原理，^[2] “同一个能级中，最多只能容纳两个自旋方向相反的电子”，也就是说一块晶体中的电子运动状态不能相同，因此为了容纳原来属于 N 个单个原子的所有价电子，原来分属于 N 个单个原子的相同的价电子的能级必须分裂成属于整个晶体的 N 个能量稍有差别的能级。因为晶体中的原子浓度很大，所以这些数量众多而又互相接近的能级便成为一连续的能级带。通常就把这 N 个互相靠得很近的能级所占据的能量区域称为“能带”。图 1·1·4 表示硅晶体中原子的能级分裂成能带的示意图，图中把硅原子三层轨道上对应的能级分别各用一条水平线表示，最外层

* T 表示热力学温度，即通常所称的“绝对温度”，单位为开尔文或简称开，用符号 K 表示。摄氏温度 $t = T - 273.15 \text{ K}$ ，用符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。但在工程上符号 t 又表示时间，为了避免混淆，摄氏温度也用符号 T 表示，并用符号 $^{\circ}\text{C}$ 加以区别。

对应于价电子能级，当价电子获得能量挣脱原子的束缚成为自由电子时，就应具有更高的能级，这就是图 1·1·4 中价电子能级上

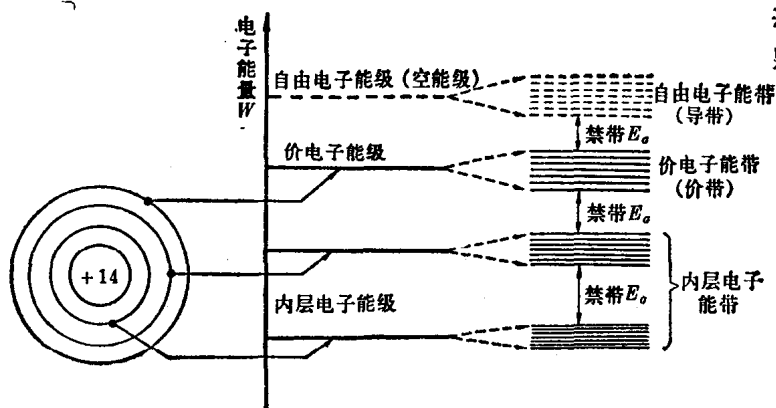


图 1·1·4 硅原子的能级和能带

方用虚线标出的能级，称为“自由电子能级”。在没有自由电子的情况下这个能级是空着的。当原子组成晶体以后，各能级就分裂成为相应的能带，价电子能级分裂出来的价电子能带简称“价带”。当晶体处于绝对零度和无外界激发时，价电子全被共价键束缚住，所以价带是被电子填满的，而且价带电子是不导电的。如果价电子获得足够大的动能，跳到自由电子能带上，就成为自由电子。它们在外电场作用下，就能参加导电，所以自由电子能带又称为“导带”。由于原子的能级是不连续的，因此能带之间还存在一段空隙，称为“禁带”，是电子不能存在的区域。由于内层电子受原子核的束缚很紧，一般不能参加导电，只有价电子才有可能担负导电的任务，因此最有实际意义的还是价电子，故通常只画出价电子以上的能带图。价带与导带之间禁带的宽度是决定物质导电性能的一个重要量度，价带中的价电子如获得足够的能量才能越过禁带而跑到导带中去，这种过程叫做电子受“激发”，也相当于共价键内的束缚

电子冲破了共价键而成为自由电子。可见，禁带宽度 E_g 的含义是表示电子从价带跳到导带所必须获得的最小激发动能。某些物质的禁带很宽，就意味着价带内的电子通常是不可能跳到导带去的，除非给予原子以很大的外加动能。这种物质就是绝缘体。半导体的禁带比绝缘体小得多，所以在室温（一般指 25°C ，又称常温）下，总会有少量电子被激发到达导带，但数量很少，导电率很低。导体则没有禁带，甚至有些导体的价带和导带是重叠的，因此在常温下，自由电子很多。图 1·1·5 表示绝缘体、半导体和导体的能带图。根据不相容原理，价带中的每一条能级至多能容纳两个电子（其自旋方向相反），这样的两个电子相当于共价键内两个束缚电子，因此在图中价带上的能级都画了两个电子，表示这时价带是被填满的（因此价带也常称为“满带”）。

对于上面关于共价键和能带的讨论，我们可以总结两点：

(1) 共价键结构和能带图都是用来说明原子内部规律的，因

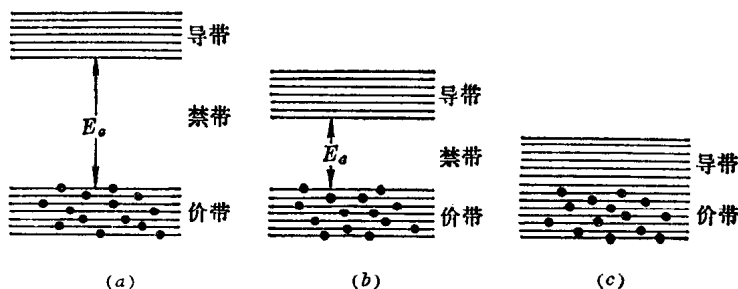


图 1·1·5 绝缘体、半导体、导体的能带

(a) 绝缘体禁带很宽 (b) 半导体禁带较窄 (c) 导体没有禁带

此它们之间是有密切联系的。共价键形象地表明了半导体内部的结构和原子之间的联系，而能带图则是从能量观点来说明电子的运动状态。例如处在价带中的电子相当于共价键内的束缚电子，而处在导带的电子相当于已挣脱了共价键的束缚而跳到键外空间的自由电子。因此价带中的电子是不能导电的，而导带中的电子

则能够导电。

(2) 要使半导体导电，必须使价带中的价电子受到外界的激发，跳到导带中去，也就是使束缚电子跳出共价键，这是我们了解半导体一切导电现象的重要概念。

1.1.3 本征半导体、空穴及其导电作用

本征半导体就是完全纯净的、结构完整的半导体，在 $T=0\text{ K}$ 和没有外界激发时，它的能带图如图 1.1.5(b) 所示。这时半导体的价电子全部填满了价带，而导带中一个电子也没有，和绝缘体完全一样。由于价带中的电子不导电，而导带又没有电子，因此这时的本征半导体是不导电的。为了简明起见，我们把图 1.1.5(b) 画成图 1.1.6 所示的简化图，这里只画出导带底的能量 E_- 和价带顶的能量 E_+ 来分别划分导带和价带，价带中的电子用黑圆点来表示，为分析方便，以后我们都采用这种简化能带图。

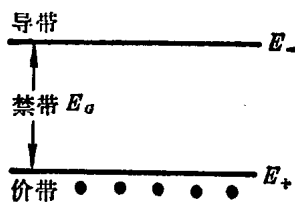


图 1.1.6 本征半导体能带简化图

E_+ 表示价带顶的能量
 E_- 表示导带底的能量

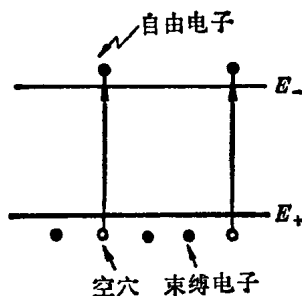


图 1.1.7 价电子受激发

在常温下，本征半导体中价带的一些价电子受到热激发获得

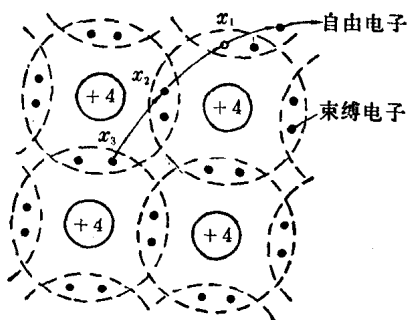


图 1·1·8 电子和空穴的移动

能量，便从价带跳到导带成为自由电子，如图 1·1·7 所示，这样在价电子原来的位置上就留下了一个“空位”（图中用圆圈表示）。这个空位有一个专门的名称，叫做“空穴”。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。由于价带上出现了失掉

电子的空穴，在外加电场或其它能源的作用下，价带中邻近能级上的电子就可填补到这个空位上，而在这个电子原来的位置上又留下新的空位，以后其它电子又可转移到这个新的空位，这样就使价带中出现一定的电荷迁移而形成电流。我们还可以从共价键结构图上具体地看到空穴和电子的移动，在图 1·1·8 中如果在 x_1 处出现一个电子的空位， x_2 处的电子便可以填补到这个空位，从而使空位由 x_1 移到 x_2 。如果接着 x_3 处的电子又填补到 x_2 处的空位，这样空位又由 x_2 移到了 x_3 ，在这个过程中，电子由 $x_3 \rightarrow x_2 \rightarrow x_1$ ，但仍处于束缚状态，而空位由 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$ ，就是说空穴的移动方向和电子移动的方向是相反的，因而可用空穴移动产生的电流来代表束缚电子移动产生的电流。由上可见，价带中空穴或束缚电子移动产生电流的根本原因是由于价带中出现空穴引起的。只有当价带中出现了空穴以后，它才开始导电。而且空穴又是失去电子以后留下的空位，因此在分析时用空穴的运动来代替价带中电子的运动就更加方便。在这里可把空穴看成是一个带正电的粒子，它所带的电量与电子相等，符号相反，在外加电场作用下，可以自由地在晶体中运动，从而和导带中的自由电子一样可以参加导电。因此空穴这种粒子的运动，是人们根据价带中出现空位的特性而虚拟出来的，它实际上是价带中束缚电子由一处位置填补到另一

处空穴位置的移动形成的。当空位越多（即从价带跳到导带的电子越多，价带中电子越少），价带中束缚电子的移动愈方便，形成的电流愈大，因此价带的导电能力并不与价带中电子的多少成正比，恰恰相反，它是与价带中电子空位的多少成正比的。显然，用空穴的移动来表示价带的导电能力就更加确切了。

综上所述，我们可以总结以下三点：

(1) 本征半导体价带中的电子被激发到导带后，同时在价带中出现空穴，导带中的自由电子和价带中的空穴都能在外加电场作用下产生定向运动形成电流，因此半导体中的导带电子和价带空穴都是运载电流的粒子，称为“载流子”。载流子数目的多少，是衡量导电能力的标志。这样，半导体中就有自由电子和空穴两种导电机构。

(2) 空穴始终在价带内运动，而自由电子始终在导带内运动，也就是说，空穴的移动始终是束缚电子在共价键内的移动，它和已挣脱共价键的自由电子是完全不同的。

(3) 在本征半导体内自由电子和空穴总是成对出现的，也就是说，有一个自由电子就必定有一个空穴，因此在任何时候，本征半导体的导带电子和价带空穴数总是相等的。

下面来计算一下载流子的浓度。用 p 表示 1 立方厘米晶体中价带空穴数（称为空穴浓度）， n 表示导带电子浓度时，对本征半导体有：

$$n = p = n_i = p_i \quad (1.1.1)$$

式中 n_i 或 p_i 为半导体的本征载流子（电子或空穴）浓度，它决定于晶体的禁带和温度。在本征半导体锗或硅内，自由电子浓度 n_i 和空穴浓度 p_i 均可用下式表示：

$$n_i(T) = p_i(T) = AT^{3/2}e^{-E_g/2kT} \quad (1.1.2)$$

式中 E_g 是禁带宽度，对锗来说， $E_g = 0.68 \text{ eV}$ （电子伏），对

硅 $E_G = 1.1 \text{ eV}$, T 是温度 (K), A 是系数, k 是波尔兹曼常数 (1.38×10^{-23} 焦耳/K), e 是自然对数的底, 在 $T = 300 \text{ K}$ 时, 硅的 $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10}$ 厘米⁻³, 锗的 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13}$ 厘米⁻³, 硅和锗的浓度不同, 主要是两种晶体禁带宽度不同所致。

式(1.1.2)说明, 本征半导体中载流子浓度决定于禁带宽度 E_G 和温度 T 。当半导体材料已确定时, 则 E_G 是确定的, 它的载流子浓度随温度的增加按指数规律增大。由于导电能力决定于载流子数目, 因此半导体的导电能力将随温度的增加而显著增加, 这是半导体的一个重要特性。在运用温度范围内 (常温附近), 有如下规律: 温度每升高 8°C , 硅的 n_i 增加一倍; 温度每升高 12°C , 锗的 n_i 增加一倍。由此可见, 温度是影响半导体性能的一个很重要的外部因素。

1.1.4 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质, 就会使半导体的导电性能发生显著的改变, 人们正是利用半导体这个特点, 根据不同需要制成各种性能的半导体, 从而开辟了利用半导体的广阔途径。

在杂质半导体中, 因掺入杂质性质的不同, 可分为电子半导体 (N 型半导体) 和空穴半导体 (P 型半导体) 两大类。

1. N 型半导体

在硅 (或锗) 的晶体内掺入少量五价元素杂质, 如磷或锑等, 则晶体点阵中某些位置上的硅原子将被磷原子所代替, 磷原子有五个价电子, 它以四个价电子与相邻的硅原子组成共价键后, 必定还多余一个价电子, 如图 1.1.9 (a) 所示。这个多余的价电子虽不受共价键的束缚, 但仍受磷原子核的正电荷所吸引而只能在磷原子的周围活动, 不过它所受磷原子的吸引力终究要比共价键的束缚作用微弱得多, 只要较小的能量就能挣脱磷原子的吸引而进入导带成为自由电子, 这种杂质半导体的能带图如图 1.1.9 (b) 所示。图中 E_N 表示剩余电子所处的杂质能级, 它很靠近导带, 所以