



中等职业学校电类专业基础课系列教材
根据教育部最新教学指导方案编写

电子技术基础

DIANZI JISHU JICHU

主 编 邓新武 王琪贤



电子科技大学出版社

中等职业学校电类专业基础课系列教材

电子技术基础

主 编 邓新武 王琪贤

电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书是为了适应中等职业教育的培养目标和教育特点,遵循“以必须、够用为度”和“强化应用、培养技能”的原则,突出中职教育特色而编写的。

本书共分 12 章,内容包括半导体基础知识、晶体管的基本应用、反馈放大器、耦合放大电路与差分放大电路、功率放大电路、直流稳压电源、正弦波的特点和产生方式、数字电路基础、逻辑门电路、典型的组合逻辑电路、时序逻辑电路、数字电路的典型波形。

本书可作为中等职业学校电子技术基础课教材,也适合于期望掌握电子技术基本概念、了解电路基本知识的其他学生作为参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础 / 邓新武, 王琪贤主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2007.7

ISBN 978-7-81114-546-5

I. 电… II. ①邓…②王… III. 电子技术—专业学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 111310 号

电子技术基础

主编 邓新武 王琪贤

出版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

责任编辑: 徐守铭 陈建军

发行: 新华书店经销

印刷: 四川墨池印务有限公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 15.75 字数 393 千字

版次: 2007 年 7 月第一版

印次: 2007 年 7 月第一次印刷

书号: ISBN 978-7-81114-546-5

定价: 22.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83256027

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

◆ 课件下载在我社主页 www.uestcp.com.cn “下载专区” 电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

前 言

21 世纪的社会是一个信息化不断深入和发展的社会。作为一个发展中国家,在未来一段时间内,我国各行各业都需要大批各层次的专业人才。而担负培养这些人才任务的学校主要是中等职业学校。实际现状是,中等职业教育已经为社会输送了大批的应用型专业人才,为我国的经济建设和社会发展做出了很大的贡献。因此,充分开展和加强中等职业教育的教学工作,尤其是建设一批与之相适应的教材,是一项极为重要的工作。

本书是根据教育部颁布的中等职业学校《电子技术基础》教学大纲编写的,可作为中等职业学校信息类及相关专业的教材。

电子技术基础是理论联系实际的技术基础课,电子技术在迅速发展,学科内容在急剧增加,以电子器件为标志,从简单的电子管、晶体管、小规模集成电路发展到了超大规模集成电路时代。本书在编写的时候注意理论和实践相结合,做到保证基础,难易适中,先进性和通俗性相结合。

本书从总体上可以分为模拟部分和数字部分两大类,主要内容如下:

1. 模拟部分主要讲述了半导体的基础知识,它是电子技术的基础,没有半导体就没有信息技术的发展。在半导体基础上,进一步介绍了晶体管工作原理、场效应管工作原理。晶体管构成的运算放大电路的工作原理和使用方式,功率放大电路的特点和用途,反馈电路的概念和使用方式,信号产生方式,直流电源的获得方式。

2. 数字部分主要介绍了数字信号的特点。数字信号是计算机的基础,逻辑代数是其中非常重要的部分,数字电路介绍了门电路的工作原理和方式,组合逻辑电路的工作原理和用途,时序逻辑电路的特点和使用方式,脉冲波形的产生变换。

虽然本书将模拟电路和数字电路分开论述,但在实际使用时中,往往既使用了模拟电路,也使用了数字电路,两者相辅相成,尤其在现代电子技术的迅速发展,两者同时使用的机会是相当多的。因此,在实际运用时,应全面考虑,合理使用,达到最佳效果。

为了方便教师教学,我们免费为使用本套教材的师生提供电子教学参考资料包:

- ◆ PowerPoint 多媒体课件
- ◆ 习题参考答案
- ◆ 教材中的程序源代码
- ◆ 教材中涉及的实例制作的各类素材

有需要的教师可以登录教学支持网站免费下载。在教材使用中有什么意见或建议也可以直接和我们联系,电子邮件地址: scqewh@163.com。

在编写本书过程中得到了各方面的帮助,尽管自己也尽力而为,但书中难免会出现错误和不妥之处,真诚地希望各位老师和读者给予批评和指正。

编 者

目 录

第 1 章 半导体器件原理与基础	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 本征半导体	2
1.1.3 本征半导体的导电特性	3
1.1.4 杂质半导体	4
1.1.5 PN 结的形成和特性	6
1.1.6 PN 结的伏安特性	10
1.1.7 PN 结的击穿	11
1.1.8 PN 结的电容	12
1.2 半导体二极管	13
1.2.1 二极管的结构	13
1.2.2 二极管的伏安特性	14
1.2.3 二极管的主要参数	15
1.3 特殊二极管	17
1.3.1 稳压二极管	17
1.3.2 光电二极管	18
1.3.3 发光二极管	19
1.3.4 变容二极管	19
1.4 半导体三极管	19
1.4.1 三极管的结构与分类	19
1.4.2 三极管的电流分配与放大原理	21
1.4.3 三极管的特性曲线	22
1.4.4 三极管的主要参数	24
1.5 场效应管	26
1.5.1 结型场效应管	26
1.5.2 绝缘栅型场效应管	27
【习题】	29
第 2 章 基本放大电路	31
2.1 放大电路基本知识	31

2.1.1	放大电路的基本概念	31
2.1.2	放大电路的性能指标	32
2.2	共发射极放大电路	34
2.2.1	共发射极放大电路的基本组成	34
2.2.2	放大电路中的直流通路和交流通路	35
2.2.3	放大电路的等效电路分析法	42
2.3	共集电极放大电路和共基极电路	46
2.3.1	共集电极电路	47
2.3.2	共基放大电路	48
2.3.3	三种放大电路的比较	50
2.4	分压式放大电路和组合放大单元电路	50
2.4.1	分压式稳定工作点偏置电路	50
2.4.2	共集-共射放大电路	51
2.4.3	共集-共集电路	52
2.4.4	共射-共基电路	53
2.5	场效应管放大电路	53
2.5.1	场效应管的直流偏置电路和静态分析	53
2.5.2	场效应管放大器的微变等效电路分析法	55
	【习题】	57
第3章	反馈放大器	60
3.1	反馈性质和分类	60
3.1.1	反馈及极性	60
3.1.2	反馈极性的判断	61
3.1.3	直流反馈和交流反馈	61
3.1.4	电压反馈和电流反馈	62
3.1.5	串联反馈和并联反馈	62
3.2	负反馈对放大器性能的影响	65
3.2.1	负反馈放大倍数和反馈深度	65
3.2.2	负反馈对放大电路性能的影响	66
	【习题】	68
第4章	线性集成电路基础	71
4.1	直接耦合放大电路	71
4.1.1	直接耦合放大电路	71
4.1.2	直接耦合放大电路的组成	71
4.1.3	零点漂移	72

4.2 差分放大电路	73
4.2.1 基本差分放大电路	73
4.2.2 恒流源差分放大电路	75
4.2.3 差分电路的输入输出方式	76
4.2.4 恒流源电路	77
4.3 集成运算放大电路	78
4.3.1 集成电路	78
4.3.2 典型的集成运放	79
4.4 集成运放的应用	82
4.4.1 集成运放理想特性和基本电路	82
4.4.2 运算电路	85
4.4.3 集成运放的使用	92
【习题】	92
第5章 功率放大电路	96
5.1 功率放大电路的特点和要求	96
5.1.1 功率放大电路的特点	96
5.1.2 功率放大电路的分类	97
5.2 低频功率放大电路	99
5.2.1 乙类互补对称功率放大电路 (OCL 电路)	99
5.2.2 单电源互补对称功率放大电路 (OTL 电路)	103
5.2.3 甲乙类互补对称功率放大电路	104
5.2.4 集成功率放大器	107
【习题】	110
第6章 直流稳压电源	112
6.1 直流稳压电源的应用	112
6.2 整流滤波电路	113
6.2.1 半波整流电路	113
6.2.2 全波整流电路	114
6.3 滤波电路	117
6.3.1 电容滤波电路	117
6.3.2 电感滤波电路	119
6.4 稳压电路	119
6.4.1 稳压二极管稳压电路	119
6.4.2 串联型稳压电路	120
6.4.3 集成稳压电路	122

6.4.4 开关稳压电源	124
【习题】	125
第7章 正弦波振荡器	127
7.1 正弦波振荡电路的概述	127
7.1.1 产生正弦波振荡的条件	127
7.1.2 正弦波振荡电路的组成	128
7.1.3 正弦波振荡电路的分析	128
7.2 RC 正弦波振荡器	129
7.2.1 RC 串并联电路的频率特性	129
7.2.2 文氏桥振荡器	130
7.3 LC 正弦波振荡电路	132
7.3.1 LC 并联电路的频率特性	132
7.3.2 电感三点式振荡电路	134
7.3.3 电容三点式振荡电路	135
7.3.4 集成运放组成的 LC 振荡器	136
7.4 石英晶体振荡器	137
7.4.1 石英晶体的基本特性和等效电路	137
7.4.2 石英晶体振荡电路	138
【习题】	139
第8章 数字电路基础	142
8.1 数字信号的基础知识	142
8.1.1 脉冲的波形	142
8.1.2 脉冲的基本知识	143
8.2 几种波形变换电路	144
8.2.1 RC 微分电路和积分电路	144
8.2.2 脉冲分压器	146
8.3 晶体管的开关特性	147
8.3.1 晶体二极管的开关特性及其应用	148
8.3.2 晶体三极管的开关特性及其应用	149
8.4 数制和码制	151
8.4.1 数制	151
8.4.2 码制	153
8.5 逻辑代数	153
8.5.1 基本逻辑	153
8.5.2 复合逻辑	156

8.5.3 逻辑函数基本公式和常用公式	159
8.5.4 逻辑函数及其表示方法	160
8.6 逻辑函数化简	161
8.6.1 公式化简法	162
8.6.2 卡诺图化简法	163
【习题】	167
第9章 逻辑门电路	170
9.1 简单的门电路	170
9.1.1 二极管与门	170
9.1.2 二极管或门	171
9.1.3 非门	171
9.1.4 组合逻辑门	172
9.2 集成 TTL 门电路	173
9.2.1 集成 TTL 与非门	173
9.2.2 其他类型的 TTL 门电路	174
9.2.3 TTL 门电路的使用规则	176
9.3 CMOS 门电路	177
9.3.1 CMOS 门电路	177
9.3.2 CMOS 门电路和 TTL 门电路之间的接口技术	179
【习题】	180
第10章 组合逻辑电路	182
10.1 组合逻辑电路基本概念	182
10.1.1 组合逻辑电路特点	182
10.1.2 分析组合逻辑电路	182
10.2 常见组合逻辑电路	184
10.2.1 编码器	184
10.2.2 译码器	187
10.2.3 数据选择器和分配器	194
10.2.4 数值比较器	196
【习题】	198
第11章 时序逻辑电路	200
11.1 集成触发器	200
11.1.1 触发器基本知识	200
11.1.2 RS 触发器	201
11.1.3 同步触发器	204

11.1.4	边沿触发器	206
11.1.5	主从触发器	208
11.1.6	T 和 T' 触发器	209
11.2	时序逻辑电路	211
11.2.1	时序逻辑电路基本知识	211
11.2.2	寄存器	211
11.2.3	计数器	214
11.2.4	计数器应用	217
【习题】		219
第 12 章	脉冲波形的产生与变换	220
12.1	用集成门电路构成的脉冲单元电路	220
12.1.1	施密特触发器	220
12.1.2	集成施密特触发器	223
12.1.3	施密特触发器的应用	223
12.1.4	单稳态触发器	225
12.2	多谐振荡器和锯齿波发生器	230
12.2.1	多谐振荡器	230
12.2.2	锯齿波发生器	232
12.2.3	米勒积分电路	234
12.3	555 定时器及其应用	235
12.3.1	555 定时器	235
12.3.2	555 定时器的应用	237
【习题】		240

第 1 章 半导体器件原理与基础

○→ 本章提要

半导体材料是一种特殊的材料，因而具有很多特殊的性质，半导体器件和集成电路就是由此发展而来的，半导体材料的导电性质和其中载流子的关系，二极管是一种最简单的半导体器件，三极管是具有两个结的半导体器件，二极管和三极管是半导体产业中最重要的基础器件，它们的主要参数和伏安特性是非常重要的基础知识。

○→ 关键词

半导体；载流子；杂质；PN 结；二极管；三极管；场效应管。

○→ 知识要点

1. 掌握半导体性质。
2. 掌握半导体导电原因。
3. 掌握 PN 结的形成、结构和伏安特性。
4. 了解二极管的分类。
5. 掌握三极管结构和分类。
6. 掌握三极管的工作特性曲线。
7. 掌握场效应管的工作特性。

半导体器件是组成电子线路的关键元件，电子线路的性能与其所用的半导体器件有着密切的关系。二极管和三极管是半导体器件中最基本、最常用的两种器件。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

物质按导电能力可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。导电能力良好的物质叫做导体，其电阻率一般在 $10^{-8} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内，如银、铜、铝、金等金属，因为金属中的自由电子特别多，因此其导电能力也非常强，电阻率很低。几乎没有导电能力的物质叫做绝缘体，其电阻率一般在 $10^{10} \sim 10^{20} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内，比如陶瓷、塑料、普通玻璃、大多数有机物等。这些

物质中的电子基本被束缚在原子周围,无法自由运动,自然无法导电了。而导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫做半导体,其电阻率一般在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内,这样的物质有硅、锗、砷化镓、氮化镓、碳化硅、硫化锌、氧化锌等。

半导体材料之所以受到人们的重视并得到广泛使用,并非是因为其导电能力处于一个中间值,而是由于其导电能力会随着环境的变化有以下一些特点:

1. 在纯净半导体材料中掺入微量杂质,导电能力就会急剧增强。例如,单晶硅中掺入百万分之一的硼或者磷,电阻率几乎可以下降一万倍。因此在半导体中掺入不同的杂质,可以制作成各种半导体器件,如二极管、三极管、场效应管和集成器件等。

2. 半导体的电阻率会随着温度的升高而迅速降低,即其具有负温度系数。例如单晶硅,温度每升高 10°C 时,电阻率下降 50%,导电能力增加一倍,而铜的电阻率只有 5% 左右的变化。利用半导体的导电能力和温度的关系,可以制作出高灵敏的热敏电阻。

3. 半导体材料对光照有很大的影响,利用光照可以改变半导体的导电能力,因而可以做成光敏电阻,如用硫化镉制作的光敏电阻,光照前后的电阻值变化可达上千倍。此外,磁等也能以一定的方式影响半导体的性质。

1.1.2 本征半导体

在现代电子器件中,用得最多的半导体材料就是硅和锗。它们的原子结构如图 1-1 所示。其共同特点就是最外层都是四个电子,通常称为价电子,价电子在原子的最外层,受原子核的束缚力最小,其数目决定着物质的许多物理和化学性质。原子内层的电子受原子核的束缚力较大,离开运动轨道的可能性较小,对物质的物理、化学性质影响不大。

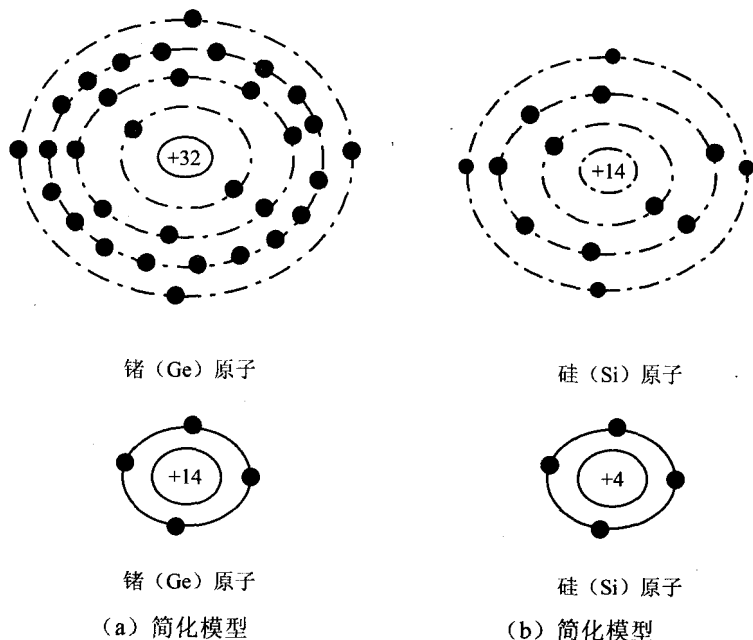


图 1-1 锗和硅的原子结构示意图

在实际使用中,硅、锗半导体材料都要制作成晶体形式,即这些物质的原子按一定的规

则整齐地排列着，从而组成某种形式的晶体点阵，不同物质的晶体点阵不完全相同，具体对于硅、锗来说，这两种物质的原子是按四角形系统组成的晶体点阵，即每个原子处于正四面体的中心，而四个其他原子位于四面体的顶点，如图 1-2 所示，硅和锗原子组成晶体之后，原子之间是靠得很近的，大约只有 $2.35 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ ，此时原来分属不同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，不但受到自身原子核引力的束缚，而且还受到邻近的四个原子核引力的束缚，这样，每个价电子个别的轨道就变成两个相邻原子之间两个价电子的公共轨道，形成了晶体中的共价键结构，如图 1-2 所示。处于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。而处于共价键中的电子受两个原子核引力的约束，如果没有足够外部环境的影响，是不会脱离原有的公共轨道的。因此在绝对零度（即摄氏零下 -273°C ）下和无外界激发时，硅和锗的晶体中是没有自由电子存在的，此时半导体不能导电，相当于绝缘体。在外界的影响下（如高温、光照等），一定数量的束缚电子由于获得动能而挣脱了原有轨道的约束成为自由电子。自由电子的存在使半导体具有了一定的导电性，导电性的大小和自由电子的多少直接相关。

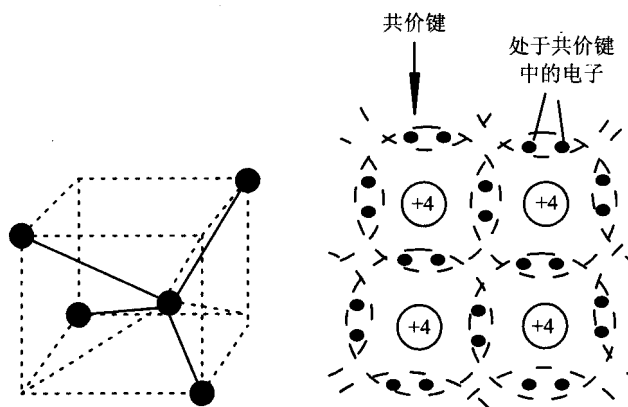


图 1-2 硅和锗的原子结构和共价键结构

1.1.3 本征半导体的导电特性

完全纯净的、结构完整的半导体称为本征半导体，它的导电能力取决于内部运载电荷的粒子——载流子的数量和运动速度。

在一定温度下，本征半导体内，由于原子的热运动，总有一些价电子能够获得足够的能量而摆脱共价键的束缚，成为自由电子，同时在原来所处的共价键上留下了一个空位，这个空位叫空穴，如图 1-3 所示。空穴的出现是半导体区别于其他导体的一个重要特点。同时我们可以看到，这种方式产生的自由电子和

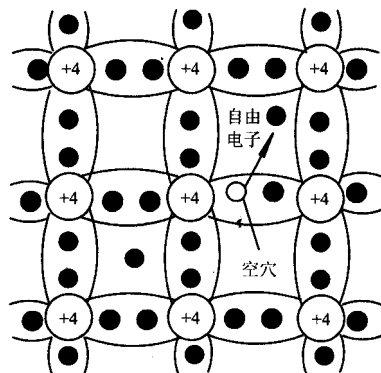


图 1-3 电子空穴的形成

空穴在数量上总是相等的,这种在一定温度下,本征半导体中自由电子和空穴成对产生的现象叫做本征激发。本征激发是半导体导电的一个重要特征。

本征半导体中,产生一个电子空穴对后,在外加电场或其他能量的作用下,邻近的价电子就可以填补到整个空位上,而在这个电子的原来位置上留下一个新的空位,以后其他位置的价电子又可转移到这个新的空位,如此下去,在共价键中就好像出现一种电荷迁移的现象。

由上可见,共价键中产生电荷移动而形成电流的根本原因是共价键中出现空穴。只有当共价键中出现了空穴,才会有电荷的移动,而且空穴又是失去电子以后留下的空位,由于该位置上失去了一个价电子,破坏了局部的电中性,而在空位处形成正电性。因此在分析半导体导电情况时,直接用空穴的运动来代替共价键中电子的运动。此时可以把空穴看成一个带正电的粒子,它所带的电量与电子相等,符号相反,在外加电场的作用下,可以自由地在晶体中运动,从而和自由电子一样可以参加导电。因此空穴也是一种载流子,空位越多,半导体中的载流子数目就越多,形成的电流也就越大。

本征半导体的导电能力主要决定于内部载流子的数量,在一定温度下,本征半导体中不断产生电子—空穴对;同时,自由电子在运动中一旦遇到空穴,便会填充空穴而消失,这一过程称为复合。复合是本征激发的相反过程,当激发与复合达到热平衡时,本征半导体中载流子的浓度就维持定值,这也是所在温度下的热平衡值。

因此,在一定温度下的载流子的浓度是一定的,一般把 1cm^3 晶体中的空穴数或者电子数叫做载流子浓度。用 p_i 表示空穴浓度, n_i 表示自由电子浓度,对于本征半导体有

$$n_i = p_i \quad (1.1)$$

载流子浓度和温度有如下的关系:

$$n_i = p_i = AT^{2/3} E_G^{-E_y/2kT} \quad (1.2)$$

式中 E_G 表明挣脱共价键所需要的能量,也叫电离能,即禁带宽度,单位为 eV (电子伏特)。对硅来说, $E_G = 1.1\text{eV}$, 而对于锗, $E_G = 0.68\text{eV}$ 。 T 是绝对温度,单位为 K, A 是系数,其值为 4.82×10^{15} , k 是玻耳兹曼常熟 ($1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$), e 是自然对数的底。在 $T = 300\text{K}$ 时 (即摄氏 27°C), 硅的 $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$, 锗的 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, 相同温度下锗和硅的载流子浓度不同,主要原因在于晶体禁带宽度不同。与之相比较,金属中自由电子的浓度则高达 $10^{22} \sim 10^{23}\text{cm}^{-3}$, 因此,在室温下,本征半导体的导电能力是很差的。

由式 (1.2), 本征半导体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升高按指数规律增大。由于导电能力决定于载流子的数目, 因此半导体的导电能力随温度的增加而显著增大。这是半导体的一个重要特性。在室温附近有一个简单的规律, 温度每升高 8°C , 硅的载流子浓度则增加一倍; 温度每升高 12°C , 锗的载流子浓度增加一倍。

1.1.4 杂质半导体

在本征半导体中以某种方式加了微量的杂质, 就会使得半导体的导电性能发生显著的改变, 这种半导体又叫杂质半导体。按掺入杂质所能提供的载流子不同, 杂质半导体可分为电子型半导体 (也叫 N 型半导体) 和空穴型半导体 (也叫 P 型半导体) 两大类。

1. N型半导体

在本征半导体硅或者锗的晶体内，掺入五价元素杂质如磷、砷、锑等，晶体点阵中某些位置上的硅原子将被这些杂质原子所替代，由于磷原子有五个价电子，在与邻近的四个硅原子形成共价键后，必定还多余一个价电子，如图 1-4 所示。和其他价电子不一样的是，这个价电子由于没有形成共价键，它只受到自身原子核的束缚，因此只需少得多的能量就能挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。在室温下，几乎所有磷原子所余下的价电子都能热激发成为自由电子，从而使掺磷的半导体硅晶体中电子载流子的浓度大大增大，成为导电的主要载流子，这就形成了 N 型半导体硅。

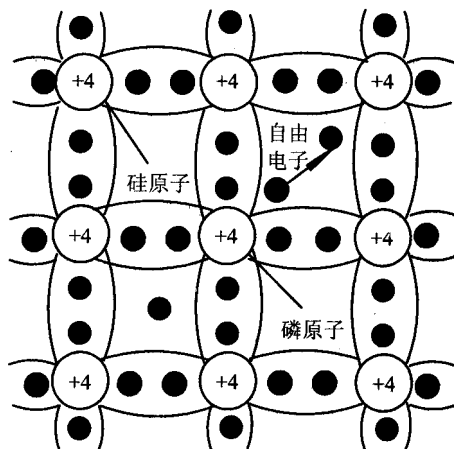


图 1-4 N 型半导体晶体点阵的结构

由于磷原子在硅晶体中能给出一个多余的电子，所以称它为施主杂质，或者 N 型杂质。当磷原子给出多余的价电子之后，磷原子本身即因失去电子而成为正离子，正离子不同于空穴，它由原子核和内层电子组成，共价键上没有空位，不能自由移动，所以不能算做载流子。这说明 N 型半导体中杂质电离，只能产生电子载流子。需要注意的是，和本征半导体中的自由电子不一样，杂质半导体在产生自由电子的同时，并不产生新的空穴。

在 N 型杂质半导体中，本征激发仍然是存在的，即存在有大量的电子空穴对，但在室温下，杂质几乎全部电离，产生大量的自由电子，这使得本征激发所产生的空穴和电子复合机会加大，空穴的浓度大为减少，因此在这类半导体中，自由电子的浓度远大于空穴的浓度，我们把 N 型半导体中的高浓度的自由电子称为多数载流子，简称多子。低浓度的空穴称为少数载流子，简称少子。尽管自由电子的浓度大于空穴的浓度，但是空穴浓度和正离子浓度之和还是等于自由电子浓度，因此，整个 N 型杂质半导体仍然保持电中性的。

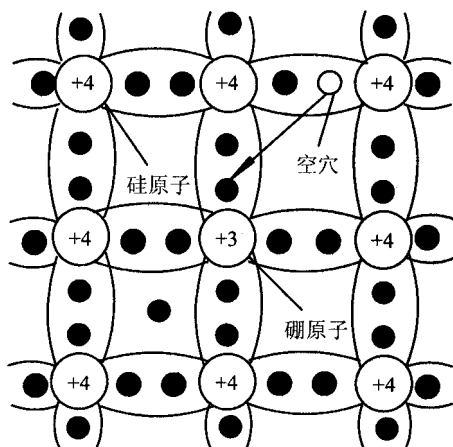


图 1-5 P 型半导体中硅晶体点阵结构

2. P 型半导体

在本征半导体硅或者锗的晶体中，掺入三价元素杂质如硼、铟等，晶体点阵中某些位置上的硅原子将被这些杂质原子所替代，由于硼原子只有三个价电子，而邻近却有四个硅原子，在与邻近的四个硅原子形成共价键后，必定会因为少一个价电子而出现一个空位，如图 1-5 所示，这个空位不带电荷，不同于本征激发所产生的空穴，但是只要邻近硅原子的共价键上的价电子获得足够高的能量，就能摆脱共价键的束缚来填充这个空位，使硼原子接受一个电子，成为一个不能移动的负离子，而在硅原子的共价键上形成一个空穴，这个过程称为受主电离。受主电离只能产生

空穴载流子。在室温下，几乎所有的硼原子都能电离成为负离子，同时产生相同数目的空穴，因为硼能接受一个电子成为负离子并产生了一个空穴，所以称之为受主杂质，或者 P 型杂质。

在 P 型杂质半导体中，杂质在产生空穴的同时并不产生新的自由电子，空穴的多少和杂质含量有关，控制掺入杂质的多少，便可控制多余的空穴数目。同样，原来硅晶体的本征激发仍然是存在的，即仍然会产生一定数量的电子空穴对，只是由于复合的原因，空穴的数目会远远大于自由电子数。因此在 P 型杂质半导体中，空穴是多数载流子，简称多子，而自由电子是少数载流子，简称为少子。同样的道理，尽管空穴是多数载流子，但是整个 P 型半导体仍然是电中性的。

由上可见，在掺入杂质后，载流子数目会有一定程度的增加。一般每个施主杂质至少都能产生一个自由电子，每个受主杂质至少能产生一个空穴，因此，尽管掺入的杂质质量很少，但是对于半导体的导电能力影响却相当大，实践证明，在半导体中掺入百万分之一的杂质，载流子的浓度将增加一百万倍。因此，利用控制杂质掺入量来调整半导体导电能力是半导体技术最常见的手段。

另外需要注意的是，在半导体中的两种不同性质的杂质有互相补偿作用。例如，在 N 型半导体中掺入浓度较高的受主杂质，所产生的空穴抵消一部分自由电子后，空穴仍占多数，此时，半导体就由 N 型转换为 P 型。如果再掺入浓度更高的施主杂质，则自由电子会重新占据多数，此时，半导体又由 P 型转换为 N 型。这种现象称为杂质的补偿作用。是半导体器件制造工艺的重要理论基础之一。

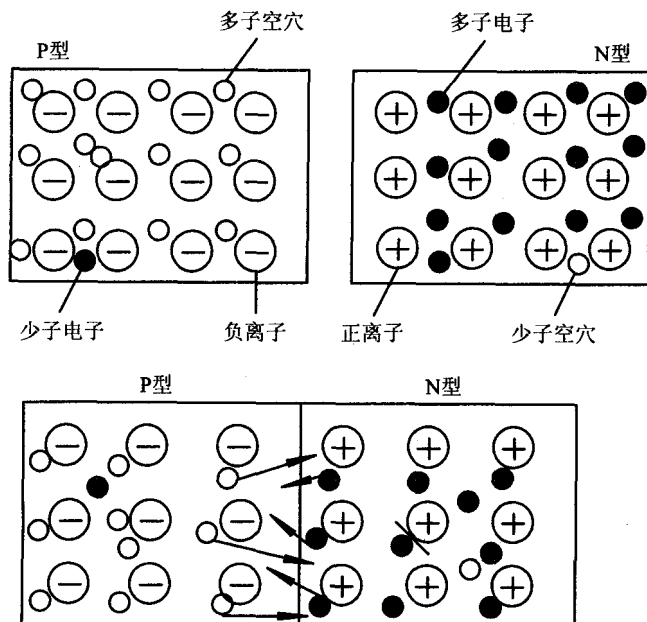


图 1-6 P 型和 N 型半导体结合前后

1.1.5 PN 结的形成和特性

如果把 P 型半导体和 N 型半导体紧密地结合在一起，在其交界面附近就会形成一个具有

特殊物理性质的结层，这就是PN结。PN结是构成各种半导体器件的基础。

1. PN结的形成

在P型半导体中，空穴是多子，自由电子是少子，还有不能移动的受主杂质负离子。而在N型半导体中，自由电子是多子，空穴是少子，以及不能自由移动的施主杂质正离子，P型半导体和N型半导体都是呈电中性的。

把P型半导体和N型半导体结合在一起，它们的交界处就出现了电子和空穴浓度差别，在N型半导体这边，电子很多，而空穴很少，而P型半导体这边则正好相反，空穴很多，而电子很少。这样，电子和空穴都要从浓度高的地方往浓度低的地方扩散，即N型半导体中的电子往P型半导体中扩散，会与P型半导体中的多子空穴复合。P型半导体中的空穴则往N型半导体中扩散，在扩散中与N型半导体中的电子复合。如图1-6所示。我们知道，电子和空穴都是带电的，它们扩散的结果是原来半导体区域的电中性条件破坏了。P型区域一边失去了空穴，留下了带负电的杂质离子。N型区一边则失去了电子，留下了带正电的杂质离子。半导体中的这些离子，虽然也是带电粒子，但是由于晶体点阵结构的关系，在通常条件下，它们是不能随意移动的。因此并不参与导电。这些不能任意移动的带电粒子我们称之为空间电荷。它们集中在P区和N区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区域，简称空间电荷区。这个区也就是我们所说的PN结。在该区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗殆尽。因此常常又把该区域称为耗尽层。耗尽层由于电子和空穴都很少，电阻率非常高。电子和空穴扩散越强，空间电荷区则越大。

在出现了空间电荷区以后，由于正负电荷之间的相互作用，在空间电荷区中就形成了一个电场，电场方向是从带正电的N型半导体区指向带负电的P型半导体区。如图1-7所示，该电场是由杂质半导体中载流子的扩散运动形成，而不是外加电场形成的，因此又称为内电场。显然，电场方向是和载流子的扩散运动方向相反的，因此，在扩散开始的时候，扩散加快，电场加强，电场力又阻止载流子的进一步扩散，直到双方达到一个平衡状态。因此又把该空间电荷区叫做阻挡层，对多数载流子的扩散有阻挡作用。

除了多子之外，N型和P型半导体中还有少子。在阻挡层区域，由于电场力的作用，少子也会运动。即N型半导体区的少数载流子空穴往P区漂移，P型半导体区的少数载流子电子向N区漂移，漂移的方向正好与扩散的方向相反。这样，从N区漂移到P区的空穴补充了原来P区失去的空穴，而从P区漂移到N区的电子补充了原来交界面上P区失去的电子，结果减少了空间电荷。因此，漂移的结果是使空间电荷区变窄，其作用正好与扩散的效果相反。

在空间电荷区的形成过程中，多子的扩散运动和少子的漂移运动既相互联系又互相矛盾，扩散运动能使空间电荷区加宽，内电场增强，对多子扩散的阻力增大，但使少子的漂移增强；而漂移运动能使空间电荷区变窄，内电场减弱，又使扩散易于进行。当扩散与漂移相等时，载流子的运动达到动态平衡，扩散过去多少电子或空穴，便有同样数量的电子或空穴漂移回来，于是空间电荷区维持不变，内电场 $\mathcal{E}_i$ 维持恒定。

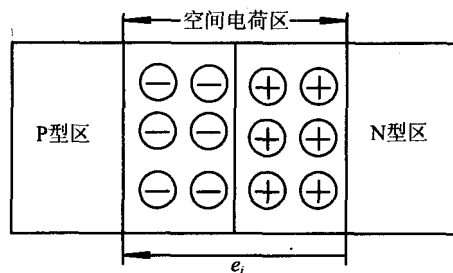


图 1-7 形成的空间电荷区