



全国高等职业教育规划教材

半导体器件物理

主 编 徐振邦
副主编 陆建恩



电子教案下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育规划教材

半导体器件物理

主 编 徐振邦
副主编 陆建恩
参 编 席彩红 袁琦睦
主 审 孙 萍



机械工业出版社

本书综合了半导体物理和晶体管原理两部分的内容,第1至3章介绍了半导体特性、PN结、半导体的表面特性,第4至第5章系统阐述了双极型晶体管及其特性、MOS型场效应晶体管的结构和工作原理,第6章简要介绍了其他几种半导体器件。全书根据高等职业教育的特点来编写,在内容上侧重于物理概念与物理过程的描述,并注意与生产实践相结合,适当配置了工艺和版图方面的知识,同时在前5章编写了实验,方便选用。

本书可作为高职高专微电子技术及相关专业的教材,也可供半导体行业工程技术人员参考。

本书配套授课电子教案,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载,联系编辑索取(QQ: 1239258369, 电话: 010 - 88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件物理/徐振邦主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 11
全国高等职业教育规划教材
ISBN 978-7-111-40073-8

I. ①半… II. ①徐… III. ①半导体器件-半导体物理-高等职业教育-教材 IV. ①TN303 ②047

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第243678号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王颖

责任印制:李妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2013年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·12.5印张·303千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40073-8

定价:28.60元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

全国高等职业教育规划教材 电子类专业编委会成员名单

主 任 曹建林

副 主 任 张中洲 张福强 董维佳 俞 宁 杨元挺 任德齐
华永平 吴元凯 蒋蒙安 祖 炬 梁永生

委 员 (按姓氏笔画排序)

于宝明	尹立贤	王用伦	王树忠	王新新	任艳君
刘 松	刘 勇	华天京	吉雪峰	孙学耕	孙津平
孙 萍	朱咏梅	朱晓红	齐 虹	张静之	李菊芳
杨打生	杨国华	汪赵强	陈子聪	陈必群	陈晓文
季顺宁	罗厚军	胡克满	姚建永	钮文良	聂开俊
夏西泉	袁启昌	郭 勇	郭 兵	郭雄艺	高 健
曹 毅	章大钧	黄永定	曾晓宏	谭克清	戴红霞

秘 书 长 胡毓坚

副秘书长 蔡建军

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国近60所高等职业院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补,并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师,针对相关专业的课程设置,融合教学中的实践经验,同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的,具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价,并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中,除了保持原有特色外,针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中,核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时,根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来,本系列教材具有以下特点:

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度,强调专业技术应用能力的训练,适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述要容易理解、清晰简洁,多用图表来表达信息;增加相关技术在生产中的应用实例,引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新,及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念,并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合,提高教学服务水平,为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快,加之我们的水平和经验有限,因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息,以利于我们今后不断提高教材的出版质量,为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

近几年,我国集成电路产业已经形成了集成电路设计、制造、封测及支撑配套业共同发展的、较为完善的产业链格局,成为全球半导体产业关注的焦点。集成电路产业对高技能应用型人才的需求十分紧迫。目前,不少高职院校设置了微电子专业,但适合高职高专学生的教材较少。以“半导体器件物理”这门课为例,现有成熟的教材主要是本科教材,对于高职学生来说,其基础知识起点较高,数学推导繁杂,内容覆盖太广,不适合选用。

本书根据高等职业教育的特点来编写,在内容叙述上力求重点突出、条理分明、深入浅出、图文并茂,简化和删除了数学推导,侧重于物理概念与物理过程的描述。同时在前5章编写了实验,方便选用。

本书首先介绍了必要的半导体材料和半导体物理方面的基础知识,然后依次阐述了PN结、半导体的表面特性、双极型晶体管及其特性、MOS型场效应晶体管和一些常用的其他半导体器件的基本原理及其物理特性。这些内容的学习将为后续课程(如“半导体制造工艺”、“集成电路版图设计”等课程)奠定必要的基础。本书的参考学时为96学时。

本书在编写过程中参考了一些优秀的教材,汲取了其中一些有益的内容,比如刘树林、张华曹、柴常春编写的《半导体器件物理》、刘恩科、朱秉升、罗晋生等编写的《半导体物理学》等。在此一并表示诚挚的谢意。

本书第1、2、4章和第6.4、6.5节由徐振邦编写,第3、5章由陆建恩编写,第6.1、6.2、6.3节由席彩红编写。本书所有实验内容由袁琦睦编写,并绘制了部分插图。全书由江苏信息职业技术学院孙萍审稿。

由于编者水平有限,书中难免存在错漏之处,恳请专家和读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 半导体特性	1
1.1 半导体的晶体结构	1
1.1.1 晶体的结构	1
1.1.2 晶向与晶面	2
1.2 半导体中的电子状态	3
1.2.1 能级与能带	3
1.2.2 本征半导体的导电机制	5
1.3 杂质与缺陷	6
1.3.1 杂质与杂质能级	6
1.3.2 缺陷与缺陷能级	9
1.4 热平衡载流子	11
1.4.1 费米能级与载流子浓度	11
1.4.2 本征半导体的载流子浓度	14
1.4.3 杂质半导体的载流子浓度	15
1.5 非平衡载流子	16
1.5.1 非平衡载流子的注入	16
1.5.2 非平衡载流子的复合	17
1.5.3 复合机制	17
1.6 载流子的运动	19
1.6.1 载流子的漂移运动与迁移率	19
1.6.2 载流子的扩散运动与爱因斯坦关系	22
实验一 晶体缺陷的观测	24
实验二 少数载流子寿命的测量	25
思考与习题	28
第 2 章 PN 结	30
2.1 平衡 PN 结	30
2.1.1 PN 结的形成与杂质分布	30
2.1.2 PN 结的能带图	32
2.1.3 PN 结的接触电势差与载流子分布	33
2.2 PN 结的直流特性	34
2.2.1 PN 结的正向特性	34
2.2.2 PN 结的反向特性	37
2.2.3 影响 PN 结伏安特性的因素	39
2.3 PN 结电容	40
2.3.1 PN 结电容的成因及影响	40

2.3.2 突变结的势垒电容	41
2.3.3 扩散电容	43
2.4 PN 结的击穿特性	44
2.4.1 击穿机理	44
2.4.2 雪崩击穿电压	46
2.4.3 影响雪崩击穿电压的因素	47
2.5 PN 结的开关特性	49
2.5.1 PN 结的开关作用	49
2.5.2 PN 结的反向恢复时间	50
实验三 PN 结伏安特性与温度特性的测量	51
实验四 PN 结势垒电容的测量	53
思考与习题	54
第3章 半导体的表面特性	56
3.1 半导体表面与 Si-SiO ₂ 系统	56
3.1.1 理想的半导体表面	57
3.1.2 Si-SiO ₂ 系统及其特性	58
3.1.3 半导体制造工艺中对表面的处理——清洗与钝化	60
3.2 表面空间电荷区与表面势	61
3.2.1 表面空间电荷区	61
3.2.2 表面势 φ_s	65
3.3 MOS 结构的阈值电压	66
3.3.1 理想 MOS 结构的阈值电压	66
3.3.2 实际 MOS 结构的阈值电压	68
3.3.3 MOS 结构的应用——电荷耦合器件	72
3.4 MOS 结构的 $C-U$ 特性	75
3.4.1 MOS 电容	75
3.4.2 理想 MOS 电容的 $C-U$ 特性	76
3.4.3 实际 MOS 电容的 $C-U$ 特性	79
3.4.4 MOS 电容在集成电路中的应用	80
3.5 金属与半导体接触	81
3.5.1 金属-半导体接触	81
3.5.2 肖特基势垒与整流接触	82
3.5.3 欧姆接触	84
3.5.4 金属-半导体接触的应用——肖特基势垒二极管	85
实验五 MOS 电容的测量	86
实验六 肖特基势垒二极管伏安特性的测量	87
思考与习题	88
第4章 双极型晶体管及其特性	90
4.1 晶体管结构与工作原理	90
4.1.1 晶体管的基本结构与杂质分布	90

4.1.2	晶体管的电流传输	92
4.1.3	晶体管的直流电流放大系数	94
4.2	晶体管的直流特性	98
4.2.1	晶体管的伏安特性曲线	98
4.2.2	晶体管的反向电流	100
4.2.3	晶体管的击穿电压	101
4.2.4	晶体管的穿通电压	102
4.3	晶体管的频率特性	102
4.3.1	晶体管的频率特性和高频等效电路	102
4.3.2	高频时晶体管电流放大系数下降的原因	104
4.3.3	晶体管的电流放大系数	106
4.3.4	晶体管的极限频率参数	108
4.4	晶体管的功率特性	110
4.4.1	大电流工作时产生的 3 个效应	110
4.4.2	晶体管的最大耗散功率和热阻	114
4.4.3	功率晶体管的安全工作区	115
4.5	晶体管的开关特性	117
4.5.1	晶体管的开关作用	117
4.5.2	开关晶体管的工作状态	118
4.5.3	晶体管的开关过程	119
4.5.4	提高晶体管开关速度的途径	123
4.6	晶体管的版图与工艺流程	123
4.6.1	晶体管的图形结构	123
4.6.2	双极型晶体管的工艺流程	125
实验七	用图示仪测试晶体管的特性曲线	127
实验八	晶体管直流参数的测量	128
思考与习题		130
第 5 章	MOS 型场效应晶体管	131
5.1	MOS 型晶体管的结构与分类	131
5.1.1	MOS 型晶体管的结构与工作原理	131
5.1.2	MOS 型晶体管的分类	134
5.1.3	MOS 型晶体管的基本特征	135
5.1.4	集成 MOS 型晶体管与分立器件 MOS 型晶体管的异同	136
5.2	MOS 型晶体管的阈值电压	137
5.2.1	MOS 型晶体管阈值电压的定义	137
5.2.2	理想情况下 MOS 型晶体管阈值电压的表达式	138
5.2.3	影响 MOS 型晶体管阈值电压的各种因素	138
5.3	MOS 型晶体管的输出伏安特性与直流参数	141
5.3.1	MOS 型晶体管的输出伏安特性	141
5.3.2	MOS 型晶体管的输出伏安特性方程	144

5.3.3 影响 MOS 型晶体管输出伏安特性的一些因素	147
5.3.4 MOS 型晶体管的直流参数	148
5.3.5 MOS 型晶体管的温度特性与栅保护	149
5.4 MOS 型晶体管频率特性与交流小信号参数	150
5.4.1 MOS 型晶体管的交流小信号等效电路	150
5.4.2 MOS 型晶体管的交流小信号参数	152
5.4.3 MOS 型晶体管的最高工作频率 f_m	153
5.4.4 MOS 型晶体管开关	154
5.5 MOS 型晶体管版图及其结构特征	154
5.5.1 小尺寸集成 MOS 型晶体管的版图 (横向结构)	155
5.5.2 小尺寸集成 MOS 型晶体管的剖面 (纵向结构)	157
5.5.3 按比例缩小的设计规则	158
5.6 小尺寸集成 MOS 型晶体管的几个效应	160
5.6.1 短沟道效应	161
5.6.2 窄沟道效应	161
5.6.3 热电子效应	162
实验九 MOS 型晶体管阈值电压 U_T 的测量	163
实验十 MOS 型晶体管输出伏安特性曲线的测量	164
思考与习题	166
第 6 章 其他常用半导体器件	167
6.1 达林顿晶体管	167
6.2 功率 MOS 型晶体管	169
6.2.1 功率 MOS 型晶体管的种类	169
6.2.2 功率 MOS 型晶体管的版图结构与制造工艺	170
6.3 绝缘栅双极晶体管	172
6.3.1 IGBT 的结构与伏安特性	172
6.3.2 IGBT 的工作原理	174
6.4 发光二极管	176
6.4.1 LED 的发光原理	176
6.4.2 LED 的结构与种类	177
6.4.3 LED 的量子效率	179
6.5 太阳电池	179
6.5.1 PN 结的光生伏特效应	179
6.5.2 太阳电池的 $I-U$ 特性与效率	180
6.5.3 非晶硅太阳电池	181
思考与习题	182
附录 XJ4810 型半导体管特性图示仪面板的功能	183
参考文献	187

第1章 半导体特性

本章要点

- 半导体的晶体结构与能带理论
- 半导体中的杂质与缺陷
- 平衡载流子与非平衡载流子
- 载流子的漂移运动与扩散运动

按导电能力的强弱，自然界中的物质可分为导体（电阻率小于 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ）、绝缘体（电阻率大于 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ ）和半导体（电阻率介于导体与绝缘体之间）。制造晶体管和集成电路最常用的材料，如硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）等都属于半导体。

半导体材料在电性能上具有一些重要性质，主要包括如下几个方面。

1) 热敏特性。温度升高使半导体导电能力增强，电阻率下降。例如，室温附近的纯硅（Si），温度每增加 8°C ，电阻率降低50%左右。

2) 掺杂特性。微量的杂质含量可以显著改变半导体的导电能力。例如，在纯硅中掺入百万分之一的杂质（如磷），此时硅的纯度仍然很高，但电阻率在室温下却由 $2.14 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 降至 $0.2 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下。

3) 光敏特性。适当波长的光可以改变半导体的导电能力。例如，硫化镉（CdS）薄膜的暗电阻为几十兆欧，在受光照后电阻值可以下降为几十千欧。

4) 此外，半导体的导电能力还受电场、磁场等作用而改变。正是由于半导体的这些特性，才使其获得了广泛的应用。

1.1 半导体的晶体结构

1.1.1 晶体的结构

固体可分为晶体和非晶体。晶体具有一定的外形、固定的熔点，其原子在空间按一定规律周期性排列。晶体又分为单晶和多晶：单晶指整个晶体由原子（或离子）的一种规则排列方式所贯穿，本身就是一个完整的大晶粒；有的晶体是由许许多多的小晶粒组成的，晶粒之间的排列没有规则，这种晶体称为多晶。

晶胞是晶体结构中最小的周期性重复的单元。晶胞的边长称为晶格常数，通常用 a 表示。图1-1所示是几种常见的晶格结构。

在器件和集成电路制造中使用的一些重要的半导体具有属于四面体的金刚石或闪锌矿结构，即每个原子被位于正四面体顶角的4个等价紧邻原子包围，如图1-1d和图1-1e所示。两个紧邻原子之间由自旋相反的两个价电子构成共价键。可认为金刚石和闪锌矿晶格是两个

面心立方晶格沿空间对角线错开 1/4 空间对角线长度相互嵌套而成的。对于金刚石晶格（如硅和锗），所有原子都是相同的；对于闪锌矿晶格（如砷化镓），两个嵌套的面心立方晶格由不同的原子组成，每个原子都被 4 个异族原子所包围。

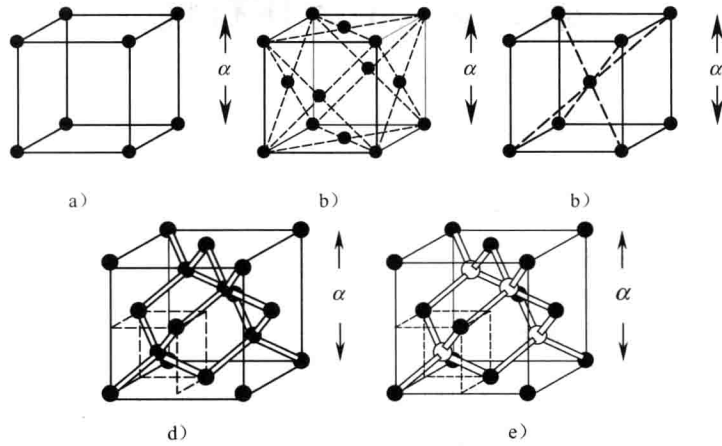


图 1-1 几种常见的晶格结构

a) 简单立方 b) 面心立方 c) 体心立方 d) 金刚石结构 e) 闪锌矿结构

1.1.2 晶向与晶面

晶体是由晶胞周期性重复排列而成的，整个晶体就像是网格，称为晶格。组成晶体的原子或离子的中心位置称为格点，格点的总体称为点阵。对硅这样的立方晶系，按其晶胞的三维结构建立坐标轴，这样的坐标轴称为晶轴。立方晶系的晶轴如图 1-2 所示。一般以晶格常数 a 作为晶轴的长度单位，图中 OA 、 OB 、 OC 称为晶格的 3 个基矢，分别用 a 、 b 、 c 表示。

通过晶格中任意两个格点可以作一条直线，而且通过其他格点还可以作出很多条与它彼此平行的直线，而晶格中的所有格点全部位于这一系列相互平行的直线上，这些直线系称为晶列。晶列的取向称为晶向。为表示晶向，从一个格点 O 沿某个晶向到另一格点 P 作位移矢量 R ，如图 1-3 所示，则

$$R = l_1 a + l_2 b + l_3 c$$

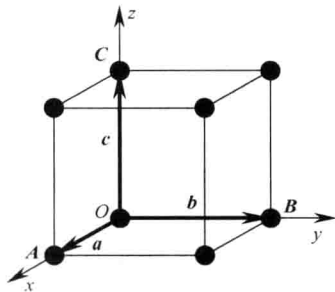


图 1-2 立方晶系的晶轴

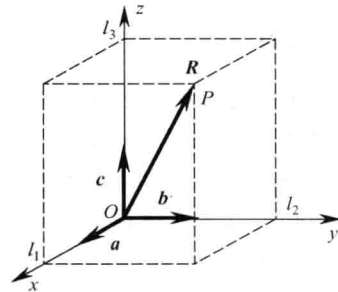


图 1-3 晶向的表示

若 $l_1:l_2:l_3$ 不是互质的，则要通过 $l_1:l_2:l_3 = m:n:p$ 化为互质整数， mnp 就称为晶列指数，写为 $[mnp]$ ，用来表示某个晶向。

晶格中的所有格点也可看成全部位于一系列相互平行等距的平面系上，这样的平面系称为晶面族，通常用晶面指数（也称为密勒指数）来表示晶面的不同取向。密勒指数是这样得到的：首先确定该晶面在晶轴上的3个截距，并以晶格常数为单位表示截距值；然后取截距的倒数，并将其化简成最简单的整数比；最后将此结果用“(hkl)”表示，即为此平面的密勒指数。图1-4所示是立方晶系中的3种重要晶向与晶面。从图上可以看出，立方晶格中晶列指数与晶面指数相同的晶列和晶向是相互垂直的，如 $[100]$ 晶向与 (100) 晶面垂直。

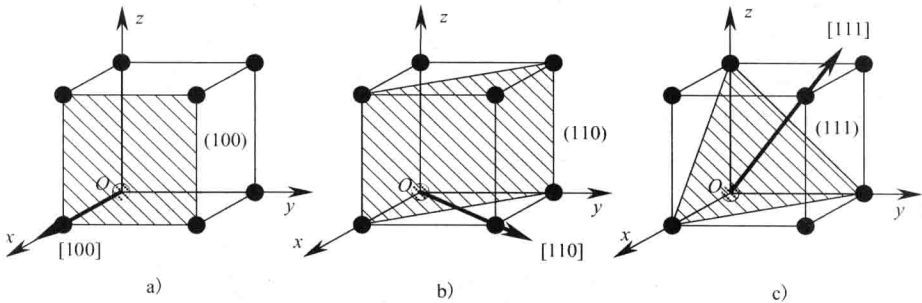


图1-4 立方晶系中的3种重要晶向和晶面

通过观察可以发现，沿晶格的不同方向，原子排列的周期性和疏密程度不尽相同，由此导致晶体在不同方向的物理特性也不同，这就是晶体的各向异性。晶体的各向异性具体表现在晶体不同方向上的硬度、热膨胀系数、导热性、电阻率、电位移矢量和折射率等都是不同的。各向异性作为晶体的一个重要特性对于半导体器件的制造有一定影响。

1.2 半导体中的电子状态

1.2.1 能级与能带

1. 电子的共有化运动

原子由带正电的原子核和带负电的电子组成，在原子核的引力作用下，电子在围绕原子核的轨道上运动。根据量子理论，电子能量只能取一系列不连续的可能值，这种量子化的能量值称为能级，从低到高通常称为 $1s, 2s, 2p, 3s, 3p, \dots$ 电子在轨道上的运动状态称为量子态。在一定条件下，如果得到晶格振动能量或吸收光的能量，电子就可以从一条轨道跳到另一条轨道上，此时电子状态发生改变，这种现象称为量子跃迁。

制造晶体管或集成电路所用的半导体材料大多是单晶体。单晶体是由大量靠得很近的原子周期性重复排列而成的。单晶体中每个原子都要受到多个原子核和电子的作用。这样，半导体中的电子状态与孤立原子中的电子状态必然不同。

在原子与原子相距较远时，电子分布在原子核周围的轨道上，它们分属于不同的原子。当原子结合成晶体时，原子与原子就靠得非常近。例如， 1 cm^3 的硅单晶中大约有 5×10^{22} 个原子，因此排在 1 cm 长度上的硅原子数大约有 $(5 \times 10^{22})^{1/3} \approx 3.7 \times 10^7$ 个，也就是相邻两硅原子中 $1s$ 的距离差不多只有 $2.7\text{ \AA}$ ($1\text{ \AA} = 0.1\text{ nm} = 10^{-10}\text{ m}$)。由于晶体中各原子靠得如此之近，所以引起各原子外层价电子的运动区域相互重叠起来，使价电子的运动区域在晶格中连

成一片。

在此情况下，电子在这一瞬间可以在甲原子周围运动，而下一个瞬间又可通过交叠的运动区域转到乙原子周围运动，并以同样的方式继续转移，不断地从一个原子跑到另一个原子，从而能够在整个晶体中运动。所以，当原子组成晶体时，其外层价电子的运动就从原来束缚于某一个原子的情形变为可以在整个晶体中运动。这些电子不再属于某一个原子所有，而成为整个晶体所共有，这就是电子的共有化运动。

当原子结合成晶体时，不但价电子的轨道连成一片，形成共有化运动，而且其内层电子轨道也可能有一定的交叠。不过，与价电子比较，内层电子的交叠程度较少，并且越是内层，轨道交叠就越少，电子的共有化程度就越弱。所以，在考虑晶体中电子的共有化运动时，主要考虑价电子的共有化运动。

电子的共有化运动示意图如图 1-5 所示。

注意：电子在原子之间的转移不是任意的，电子只能在能量相同的能级之间发生转移。

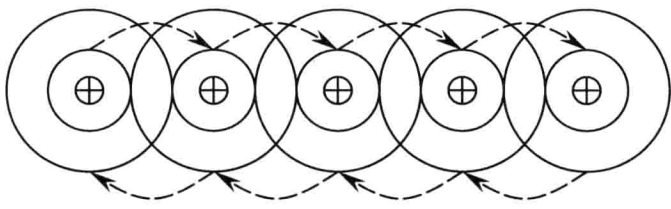


图 1-5 电子的共有化运动示意图

2. 能带的形成

随着晶体中价电子共有化运动的形成，表征这些电子运动情况的能量状态也必然要发生变化。在原来原子间距较大时，价电子分别处在各个原子的能级中。当 N 个原子排列起来结合成晶体时，情况就不同了。由于价电子的共有化运动，整个晶格成了一个统一的整体，电子可以在整个晶体中运动，因此分别束缚于各个原子的分立能级不存在了，代之而形成一些属于整个晶体的能级。由于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能级必须分裂成属于整个晶体的 N 个稍有差别的能级，这些能级互相靠得很近，分布在一定的能量区域，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。原子能级分裂为能带的示意图如图 1-6 所示。

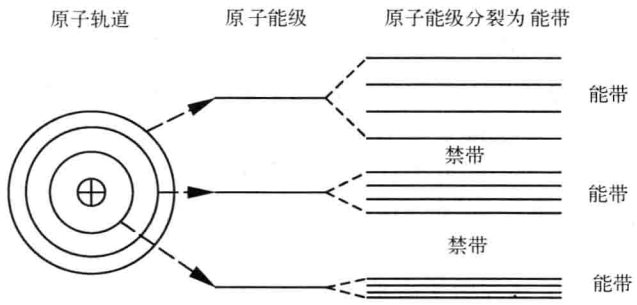


图 1-6 原子能级分裂为能带的示意图

由于同一能带中相邻能级之间的能量差很小，因此可以把能带中各能级的能量看做是连续变化的。在原子结合成晶体、价电子能级分裂成价电子能带的同时，如果内层电子的轨道也有交叠，那么内层电子的能级也要发生分裂，不过，一般内层电子轨道交叠较少，其共有化运动也必然较弱，因而内层电子的能带也就较窄。根据同样的道理，能量比价电子能级更高的激发态能级也要分裂，形成激发态能带。在两个能带之间的区域中，不存在电子的能级，因此在这个能量区域中也不可能有电子，称在两个能带之间的区域为禁带。

相关理论指出，每个能带和禁带的宽度决定于各种晶体的原子结构和晶体结构。而晶体中的电子只能由低而高地依次填满各个能级和能带，且每一个能级只能容纳两个电子。如果能带全部被电子填满则称为满带；如果能带中一个电子也没有则称为空带。显然，内层电子轨道对应的能带为满带，而价电子填充的能带则可能是全部填满的或部分填满的。一般称价电子所处的能带为价带。被电子填满的内层能带，在外界电场或磁场的作用下，电子的状态不会发生变化，这样的能带对以后讨论的半导体在外场作用下的各种特征是不起作用的。因此，不再画出内层完全填满的能带，而只画出最外层价电子的能带，即价带以及价带上面的一条空带，称为导带。

在硅、锗、金刚石等共价键结合的晶体中，从其最内层的电子直到最外边的价电子都正好填满相应的能带。图 1-7 表示具有金刚石结构的晶体的价电子填充能带的情况，图中的价带是满带。价带顶 E_v 和导带底 E_c 之间的间隙称为禁带。价带顶和导带底之间的能量间隙称为禁带宽度，用符号 E_g 表示。为了方便，以后在用能带图分析半导体特性时，常用图 1-8 所示的简化能带图。

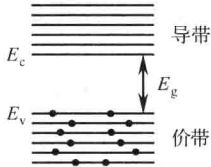


图 1-7 金刚石结构的晶体的价电子填充能带的示意图 ($T=0\text{ K}$)

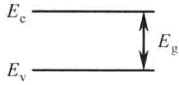


图 1-8 简化能带图

1.2.2 本征半导体的导电机制

所谓本征半导体就是完全纯净的、结构完整的半导体。目前主要的半导体材料大部分是共价键晶体。硅、锗等 V 族元素半导体就是最典型的共价键晶体。以硅为例，在硅的晶体中，每个硅原子近邻有 4 个硅原子，每两个相邻原子之间有一对电子，它们与两个原子核都有吸引作用，称为共价键。正是靠共价键的作用，使键原子紧紧结合在一起，构成了晶体。如果共价键中的电子获得足够的能量，它就可以摆脱共价键的束缚，成为可以自由运动的电子，这时在原来的共价键上就留下了一个空位。因为邻键上的电子随时可以跳过来填补这个空位，从而使空位转移到邻键上去，所以空位也是可以移动的。这种可以自由移动的空位被称为空穴，我们把它看成是带正电荷的“准粒子”。半导体就是靠着电子和空穴的移动来导电的。因此，电子和空穴被统称为载流子。载流子—自由电子与空穴如图 1-9 所示。

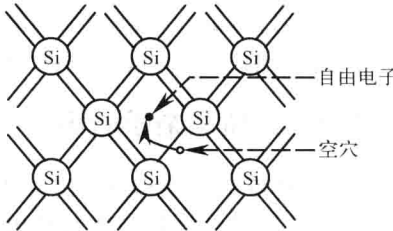


图 1-9 载流子—自由电子与空穴

当温度接近绝对零度且无外场作用时，半导体的能带可参照图 1-7 所示。即使半导体加上外加电场，价带中的电子也不能起导电作用，因为价带上所有的能级都已被电子填满。在外电场作用下，由于受泡利不相容原理限制，当一个电子由原来能级向能带中任一能级转移的时候，必然有另一个电子向相反方向转移，产生的电流相互抵消，因此满带中的电子不导电。

只要把半导体置于通常的室温之下，情况就会发生变化。我们知道，除了在绝对零度之外，晶体中的原子都要作热运动，这种热运动表现为各晶格原子在它们的平衡位置附近来回地振动。由于晶格热运动的存在，特别是由于在一定温度下总有一些晶格原子的热运动能量远远超过平均能量数值，当晶体中的价电子通过与晶格原子的相互作用而交换能量的时候，就有可能出现一些电子从热运动能量特别大的原子身上吸收足够的能量，从而使它们得以从价带激发到导带。电子从晶格热运动吸收能量，从价带激发到导带的过程称为本征激发。图 1-10 所示为本征激发示意图，表示了当 $T > 0\text{K}$ 时电子填充能带的情况。可以看出，导带中出现了少量电子，价带中则出现了一些空穴。在外电场作用下，导带上的电子可以进入导带中未被电子填满的较高能级，形成电流，起导电作用。同时，空穴在外电场作用下也能起导电作用。所以，在半导体中，导带的电子和价带的空穴均参与导电。

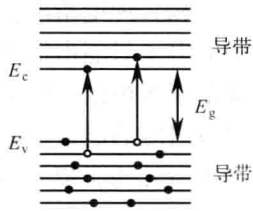


图 1-10 本征激发示意图 ($T > 0\text{K}$)

在图 1-10 中，电子从价带跃迁到导带所需的最低能量就是 $E_c - E_v$ ，称为禁带宽度 E_g 。相比于绝缘体，半导体的禁带宽度比较小，在常温常压下，硅的 E_g 值约为 1.12eV ，锗的 E_g 值为 0.67eV ，而砷化镓的 E_g 为 1.42eV 。在常温下，半导体中已有不少电子吸收晶格的振动能量，被激发到导带中去，所以具有一定的导电能力。

本征半导体的载流子是由本征激发产生的，本征激发的特点是每当有一个电子激发到导带，同时在满带中出现一个空穴，因此，本征激发的电子和空穴是成对产生的，导带电子和满带的空穴数目总是相等的。如果用 n 表示导带电子浓度，以 p 表示价带空穴浓度，那么对本征半导体有

$$n = p = n_i$$

式中， n_i 为半导体的本征载流子浓度。

1.3 杂质与缺陷

理想的半导体晶体应是十分纯净，不含任何杂质，且晶格中的原子严格按周期型排列的。但实际并非如此，半导体材料并不是纯净的，不可避免地存在杂质，这些杂质很多时候还是人为掺入的；实际的半导体晶格结构也并不是完美无缺的，而存在着各种形式的缺陷。这些杂质和缺陷能够对半导体材料的物理化学性质起到显著的甚至是决定性的作用。

1.3.1 杂质与杂质能级

1. 替位式杂质与间隙式杂质

除了半导体原材料本身纯度不够高和半导体器件制备过程中的沾污之外，半导体材料中的杂质往往是为了改变其性质而人为掺入的。

以硅为例，如图 1-1d 所示，其晶体结构属于金刚石结构，一个晶胞内含有 8 个原子。如果近似地把原子看成刚性小球，而且最邻近的原子紧密接触，那么通过简单的计算可以知道，这 8 个原子只占晶胞总体积的 34%，还有 66% 是空隙。所以，杂质进入半导体后可以存在格点上，这种杂质称为替位式杂质。图 1-11 所示是间隙式杂质和替位式杂质的示意图。图中 A 是间隙式杂质，B 是替位式杂质。间隙式杂质的原子半径一般比较小，如锂离子，进入硅、锗、砷化镓晶体后以间隙式杂质的形式存在。替位式杂质原子的半径和价电子壳层结构与被取代的晶格原子比较相近，如 III、V 族元素原子，它们在硅、锗晶体中都是替位式杂质。

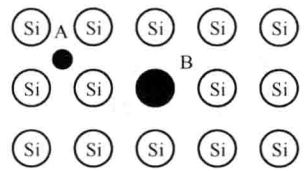


图 1-11 间隙式杂质和替位式杂质的示意图

2. 杂质能级

在半导体分立器件和集成电路的生产中，最常用的杂质是 III、V 族元素，它们在硅、锗晶体中以替位式杂质的形式存在。

此处以硅中掺入磷（P）为例，研究 V 族元素杂质的作用。硅中的施主杂质如图 1-12 所示，一个磷原子占据了硅原子的位置。磷原子有 5 个价电子，其中 4 个价电子与周围的 4 个硅原子形成共价键，还剩余一个价电子。磷原子对这个电子的吸引远弱于共价键的束缚，多余的电子只需要很小的能量 ΔE_D ，就很容易挣脱束缚（称为电离）成为能导电的导带电子。 ΔE_D 的大小和半导体材料和杂质种类有关，但远小于硅、锗的禁带宽度。剩余的带正电的磷离子被晶格所束缚，不能运动。所以，一个 V 族杂质原子可以向半导体硅提供一个自由电子而本身成为一个带正电的离子，通常把这种杂质称为施主杂质， ΔE_D 称为施主杂质电离能。当硅中掺有施主杂质时，主要靠施主提供的电子导电，我们把主要依靠电子导电的半导体称为 N 型半导体。N 型半导体中的电子称为多数载流子，简称为多子；而空穴称为少数载流子，简称为少子。

此处以硅中掺入硼（B）为例，研究 III 族元素杂质的作用。硅中的受主杂质如图 1-13 所示，一个硼原子占据了硅原子的位置。硼原子有 3 个价电子，当它和周围的 4 个硅原子形成共价键时，还缺少一个电子，必须从别处的硅原子中夺取一个价电子；于是在硅晶体的共价键中产生了一个空穴。硼原子接受一个电子后，成为带负电的硼离子。它也被晶格所束缚，不能运动。硼离子对空穴有引力作用，但是束缚很弱。这个空穴只需要获得很小的能量 ΔE_A ，就很容易挣脱束缚成为导电的价带空穴。不同半导体和不同受主杂质其 ΔE_A 也不相同，但通常远小于硅、锗的禁带宽度。所以，一个 III 族杂质原子可以向半导体硅提供一个空穴，而本身接受一个电子成为带负电的离子，通常把这种杂质称为受主杂质， ΔE_A 称为受主杂质电离能。当硅中掺有受主杂质时，主要靠受主提供的空穴导电，我们把主要依靠空穴导电的半导体称为 P 型半导体。P 型半导体中的空穴是多子，电子是少子。