21世纪高职高专系列教材

# 半 导 体 器 件 物 理

主编　顾晓清
参编　赵　锋　阮伟华
主审　王广发



机 械 工 业 出 版 社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

本书融合了半导体物理和晶体管原理两部分的内容。考虑到对高职学生的教育要求，本书在编写时尽量减少理论推导，用通俗易懂的语言来阐述半导体物理的基本知识和晶体管的基本原理。全书共分 员园章，第 员章介绍半导体物理的基础知识，第 圆章阐述 孕醒结的特性，第 猿到 远章讲述晶体管的直流特性、交流特性、开关特性和高频大功率晶体管的设计，第 苑到第 员园章 讲述 酝韵杂器件的相关内容。每章均有与教学内容相结合的适量习题。

本书可作为高职高专院校微电子技术专业的教材，又可作为微电子技术人员的参考书。


图书在版编目（悦阴）数据

半导体器件物理 辑颖晓清主编 援—北京：机械工业出版社，圆耘耘圆员

（圆员世纪高职高专系列教材）

陈宇晕苑原员责员原员 耘圆缘员原园

Ⅰ圆半… Ⅱ圆顾… Ⅲ圆半导体器件 原半导体物理 原高等学校：技术学校 原教材 Ⅳ圆耘圆员 耘圆

中国版本图书馆 悦阴数据核字（圆耘耘 第 员缘耘圆原号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 圆圆号 邮政编码 员园耘圆苑

策划编辑：胡毓坚 责任编辑：王 颖 版式设计：霍永明

责任校对：吴美英 封面设计：雷明顿 责任印制：洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

圆耘耘年 圆月第 员版·第 员次印刷

苑苑 宫伊 员园 圆宫 宫 员 辅 员园 圆 缘 印张 · 圆 怨千字

园园 员—缘园 耘册

定价：员 耘圆 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

本社购书热线电话（园园 远 苑 圆 缘 原

封面无防伪标均为盗版

# 21世纪高职高专电子技术专业系列教材
# 编委会成员名单

主　　任　曹建林

副 主 任　张中洲　张福强　祖　炬　董维佳
　　俞　宁　蒋蒙安　吕何新　伍湘彬
　　任德齐　华永平　吴元凯

委　　员　(按姓氏笔画排序)
　　马　彪　邓　红　王树忠　王新新　尹立贤
　　白直灿　包中婷　冯满顺　华天京　吉雪峰
　　刘美玲　刘　涛　孙吉云　孙津平　朱晓红
　　李菊芳　邢树忠　陈子聪　杨元挺　张立群
　　张锡平　苟爱梅　姚建永　曹　毅　崔金辉
　　黄永定　章大钧　彭文敏　曾日波　谭克清

秘 书 长　胡毓坚

副秘书长　戴红霞

# 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 [illegible] 余所院校的骨干教师对在 [illegible] 年出版的“面向 [illegible] 世纪高职高专系列教材”进行了修订。

在几年的教学实践中，本系列教材获得了较高的评价。因此，在修订过程中，各编委会保持了第 [illegible] 版教材“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。同时，针对教育部提出的高等职业教育的学制将由三年逐步过渡为两年，以及强调以能力培养为主的精神，制定出了本次教材修订的原则：跟上我国信息产业飞速发展的节拍，适应信息行业相关岗位群对第一线技术应用型操作人员能力的要求，针对两年制兼顾三年制，理论以“必须、够用”为原则，增加实训的比重，并且制作了内容丰富而且实用的电子教案，实现了教材的立体化。

针对课程的不同性质，修订过程中采取了不同的处理办法。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。此外，在修订过程中，还进行了将几门课程整合在一起的尝试。所有这些都充分地体现了修订版教材求真务实、循序渐进和勇于创新的精神。在修订现有教材的同时，为了顺应高职高专教学改革的不断深入，以及新技术新工艺的不断涌现和发展，机械工业出版社及教材编委会在对高职高专院校的专业设置和课程设置进行了深入的研究后，还准备出版一批适应社会发展的急需教材。

信息技术以前所未有的速度飞快地向前发展，信息技术已经成为经济发展的关键手段，作为与之相关的教材要抓住发展的机遇，找准自身的定位，形成鲜明的特色，夯实人才培养的基础。为此，担任本系列教材修订任务的教师，将努力把最新的教学实践经验融于教材的编写之中，并以可贵的探索精神推进本系列教材的更新。由于高职高专教育正在不断的发展中，加之我们的水平和经验有限，在教材的编审中难免出现问题和错误，恳请使用这套教材的师生提出宝贵的意见和建议，以利我们今后不断改进，为我国的高职高专教育事业作出积极的贡献。

机械工业出版社

# 前　言

自从 员怨缘愿年第一块集成电路问世以来，它正以惊人的速度改变着我们的社会和生活，广泛应用于计算机领域、通信、网络、消费类电子工业、自动控制及国防科技领域。在汽车、电视、录放影机、摄影机、移动电话、加热和冷却系统，甚至是玩具等的控制电路中，集成电路芯片的应用正在不断地增长。

近年来，我国的集成电路产业的发展也十分迅猛，这方面的专业人才十分紧俏，包括专业设计人才、管理人才、专业操作人才等等。

微电子技术是一个高科技的学科，在高职学校作为一个专业来培养人才的时间还不长，适合高职教育的教材也不多。本教材是根据高等职业教育的特点来编写的，融合了半导体物理和晶体管原理两部分的内容，可以作为微电子技术专业基础课的教材使用。考虑到高职学生的教育特点，书中尽量减少理论推导，用通俗易懂的语言来阐述半导体物理的基本知识和晶体管的基本原理，为学生学习微电子技术和半导体器件原理打下一个良好的基础。本教材的参考教学时数为 员缘园学时。

本教材由顾晓清编写第 员~远章，赵锋编写第 苑 愿章，阮伟华编写第 怨 员园章。最后由江苏职业技术学院王广发审阅。在编写过程中，得到了上海电子信息职业技术学院冯满顺和林明祥老师的大力支持和帮助，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，请读者批评指正！

为了配合本书的教学，机械工业出版社为读者提供了电子教案，读者可在 [illegible] 上下载。

编　者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 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 晶体的各向异性 …… 3

1.2 半导体的电性能 …… 3

1.2.1 温度和半导体 …… 4

1.2.2 杂质和半导体 …… 4

1.2.3 光照和半导体 …… 4

1.2.4 其他因素和半导体 …… 4

1.3 半导体中的电子状态和能带 …… 4

1.3.1 电子的共有化运动 …… 4

1.3.2 电子状态和能带 …… 6

1.4 半导体中的杂质和缺陷 …… 8

1.4.1 半导体中的杂质和杂质能级 …… 8

1.4.2 半导体中的缺陷和缺陷能级 …… 10

1.5 载流子的运动 …… 11

1.5.1 载流子浓度与费米能级位置的关系 …… 11

1.5.2 本征半导体的载流子浓度 …… 13

1.5.3 杂质半导体的载流子浓度 …… 13

1.5.4 载流子的漂移运动 …… 15

1.5.5 载流子的扩散运动 …… 16

1.6 非平衡载流子 …… 17

1.6.1 非平衡载流子的产生和复合 …… 17

1.6.2 非平衡载流子的寿命 …… 18

1.6.3 复合理论 …… 18

1.7 习题 …… 19

第 2章　pn结 …… 21

2.1 pn结及其能带图 …… 21

2.1.1 pn结的形成和杂质分布 …… 21

2.1.2 pn结的能带图 …… 22

2.1.3 pn结的载流子分布 …… 22

2.2 平衡 pn结 …… 23

2.2.1 空间电荷区和接触电势差 …… 23

2.2.2 空间电荷区的电场和电位分布 …… 23

2.3 pn结直流特性 …… 25

2.3.1 非平衡状态的 pn结 …… 25

2.3.2 pn结伏安特性 …… 26

2.3.3 影响 pn结电流电压特性偏离理想方程的各种因素 …… 28

2.4 pn结电容 …… 29

2.4.1 pn结电容的形成 …… 29

2.4.2 突变结的势垒电容 …… 30

2.4.3 线性缓变结的势垒电容 …… 31

2.4.4 扩散电容 …… 31

2.5 pn结击穿 …… 32

2.5.1 雪崩击穿 …… 32

2.5.2 隧道击穿 …… 32

2.5.3 热电击穿 …… 32

2.5.4 雪崩击穿电压 $V_B$的计算 …… 32

2.5.5 影响雪崩击穿电压的因素 …… 33

2.6 习题 …… 34

第 3章　晶体管的直流特性 …… 36

3.1 概述 …… 36

3.1.1 晶体管的基本结构及杂质分布 …… 36

3.1.2 晶体管中载流子浓度分布及传输 …… 37

3.1.3 晶体管的直流电流放大系数 …… 37

3.1.4 晶体管的特性曲线 …… 38

3.2 平面晶体管的电流放大系数及影响电流放大系数的因素 …… 38

3.2.1 平面晶体管的自建电场 …… 38

3.2.2 平面晶体管电流放大系数 …… 39

3.3 晶体管的反向电流 …… 40

3.3.1 隔离($I_{CBO}$) …… 40

3.3.2 隔离($I_{CEO}$) …… 40

3.3.3 隔离($I_{CES}$) …… 40

3.4 晶体管的击穿电压 …… 40

3.4.1 $BV_{CEO}$和 $BV_{CES}$ …… 40

3.4.2 $BV_{CBO}$ …… 41

3.5 晶体管的基极电阻 …… 41

猿猿猿 梳状晶体管的基极电阻 …… 苑园
猿猿猿圆 圆形晶体管的基极电阻 …… 苑圆
猿猿匝 习题 …… 苑圆
第 源章 晶体管的频率特性与功率特性 …… 苑源
源猿 晶体管的频率特性 …… 苑源
源猿猿 晶体管的截止频率、特征频率和最高振荡频率 …… 苑源
源猿猿圆 共基极短路电流放大系数与频率的关系 …… 苑缘
源猿猿猿 共发射极短路电流放大系数及其截止频率 …… 苑愿
源猿猿源 晶体管的特征频率 [illegible] …… 苑怨
源猿猿缘 提高特征频率的途径 …… 愿园
源圆 高频等效电路 …… 愿园
源猿 高频功率增益和最高振荡频率 …… 愿圆
源猿猿 高频功率增益 …… 愿圆
源猿猿圆 最佳功率增益 [illegible] …… 愿猿
源猿猿猿 最高振荡频率和高频优值 …… 愿源
源猿猿源 功率增益随工作点的变化及提高功率增益的途径 …… 愿缘
源源 晶体管的大电流特性 …… 愿远
源源猿 集电极最大电流 …… 愿远
源源圆 大电流工作时产生的 猿个效应 …… 愿远
源猿 晶体管的最大耗散功率 [illegible] 和热阻 [illegible] …… 怨猿
源匝 功率晶体管的二次击穿和安全工作区 …… 怨源
源匝猿 晶体管的二次击穿 …… 怨源
源匝圆 晶体管的安全工作区 [illegible] …… 怨缘
源匝 高频大功率晶体管的图形结构 …… 怨缘
源愿 习题 …… 怨苑
第 缘章 晶体管的开关特性 …… 怨愿
缘猿 二极管的开关作用和反向恢复时间 …… 怨愿
缘猿猿 二极管的开关作用 …… 怨愿
缘猿猿圆 二极管的反向恢复时间 …… 怨怨
缘圆 开关晶体管的静态特性 …… 晃园
缘圆猿 晶体管的开关作用 …… 晃园
缘圆圆 开关晶体管的工作状态 …… 晃园
缘猿 晶体管开关的动态特性 …… 晃猿
缘猿猿 晶体管的工作区与开关原理 …… 晃猿
缘猿猿圆 晶体管开关过程的动态分析 …… 晃源
缘源 习题 …… 晃远
第 远章 双极型晶体管的设计 …… 晃苑
远猿 概述 …… 晃苑
远圆 高频大功率晶体管的设计 …… 晃愿
远圆猿 根据使用要求确定主要参数及其指标 …… 晃愿
远圆圆 纵向结构参数的确定 …… 晃怨
远圆猿 横向结构参数的确定 …… 晃员
远圆源 主要电学参数的验算 …… 晃猿
远猿 习题 …… 晃源
第 苑章 半导体表面特性及 [illegible] 电容 …… 晃缘
苑猿 半导体表面和界面结构 …… 晃缘
苑猿猿 清洁表面和真实表面 …… 晃缘
苑猿猿圆 硅 [illegible] 氧化硅界面的结构 …… 晃远
苑圆 表面势 …… 晃愿
苑圆猿 空间电荷区和表面势 …… 晃愿
苑圆圆 表面的积累、耗尽和反型 …… 晃园
苑猿 [illegible] 结构的电容 [illegible] 电压特性 …… 晃圆
苑猿猿 理想 [illegible] 的 [illegible] 特性 …… 晃圆
苑猿猿圆 实际 [illegible] 的 [illegible] 特性曲线 …… 晃猿
苑源 [illegible] 结构的阈值电压 …… 晃缘
苑源猿 理想 [illegible] 结构的阈值电压 …… 晃缘
苑源圆 实际 [illegible] 结构的阈值电压 …… 晃远
苑缘 习题 …… 晃苑
第 愿章 [illegible] 场效应晶体管的基本特性 …… 晃愿
愿猿 [illegible] 的结构和分类 …… 晃怨
愿猿猿 [illegible] 的结构 …… 晃怨
愿猿猿圆 [illegible] 的 [illegible] 种类型 …… 晃怨
愿猿猿猿 [illegible] 的特征 …… 晃猿
愿圆 [illegible] 的特性曲线 …… 晃圆
愿圆猿 [illegible] 的输出特性曲线 …… 晃圆
愿圆圆 [illegible] 的转移特性曲线 …… 晃源
愿猿 [illegible] 的阈值电压 …… 晃缘
愿猿猿 晕沟道 [illegible] 的阈值电压 …… 晃缘
愿猿猿圆 孕沟道 [illegible] 的阈值电压 …… 晃远
愿源 [illegible] 的伏安特性 …… 晃远
愿源猿 线性工作区的伏安特性 …… 晃苑
愿源圆 饱和工作区的伏安特性 …… 晃苑

[illegible] 击穿区 …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]的频率特性 …… [illegible]
[illegible] 跨导 [illegible] …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]最高振荡频率 [illegible] …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]的开关特性 …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]倒相器的定性描述 …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]的开关特性 …… [illegible]
[illegible] 阈值电压 [illegible]的控制和调整 …… [illegible]
[illegible] 习题 …… [illegible]
第 [illegible]章 酷[illegible]功率场效应晶体管 …… [illegible]
[illegible] 用作功率放大和开关的 酷[illegible]功率场效应晶体管 …… [illegible]
[illegible] 用作功率放大的 酷[illegible]功率场效应晶体管 …… [illegible]
[illegible] 用作开关的 酷[illegible]功率场效应晶体管 …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]功率场效应晶体管的结构 …… [illegible]
[illegible] 二维横向结构 …… [illegible]
[illegible] 三维结构 …… [illegible]
[illegible] 阈[illegible]晶体管的击穿电压 …… [illegible]
[illegible] 雪崩击穿 …… [illegible]
[illegible] 穿通电压 …… [illegible]
[illegible] 阈[illegible]晶体管的二次击穿 …… [illegible]
[illegible] 温度对 酷[illegible]晶体管特性的影响 …… [illegible]
[illegible] 温度对载流子迁移率的影响 …… [illegible]
[illegible] 温度对阈值电压的影响 …… [illegible]
[illegible] 温度对漏[illegible]电流、跨导及导通电阻的影响 …… [illegible]
[illegible] 习题 …… [illegible]
第 [illegible]章 小尺寸 酷[illegible]器件的特点 …… [illegible]
[illegible] 非均匀掺杂对阈值电压的影响 …… [illegible]
[illegible] 阶梯函数分布近似 …… [illegible]
[illegible] 高斯分布情况 …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]的小尺寸效应 …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]的短沟道效应 …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]的窄沟道效应 …… [illegible]
[illegible] 酷[illegible]按比例缩小规则 …… [illegible]
[illegible] 热电子效应 …… [illegible]
[illegible] 习题 …… [illegible]
附录 …… [illegible]
附录 粤 扩散结电容和势垒宽度的计算曲线 …… [illegible]
附录 月 硅扩散层表面杂质浓度与扩散层平均电导率的关系曲线 …… [illegible]
参考文献 …… [illegible]

# 第 员章　半导体特性

## 本章要点

- 半导体材料的晶格结构
- 电子和空穴的概念
- 半导体的电性能和导电机理
- 载流子的漂移运动和扩散运动
- 非平衡载流子的产生和复合

半导体器件在日常生活生产中被广泛应用，然而，半导体器件的发明是建立在对半导体材料特性研究的基础上的，其中包括对半导体材料的晶格结构、导电机理、施主（受主）杂质的研究，也包括对载流子漂移（扩散）运动和非平衡载流子产生和复合的研究。因此，在阐述半导体器件工作原理之前，我们必须了解半导体材料的相关特性。

半导体的许多独特的物理性质与半导体中电子的状态及其运动特点密切相关。半导体晶体材料由大量原子组成，每个原子又包含原子核和许多电子，所以研究半导体中电子的状态是一个非常复杂的问题。本章中，我们假设每个电子是在周期性排列且固定不动的原子核势场及其他电子的平均势场中运动的，即用单电子近似法来研究晶体中的电子状态，这种理论称为能带论。本章将介绍几种重要半导体材料的能带结构。

## 员 员 半导体的晶体结构

按其结构形式不同，自然界中存在的固体材料可以分为晶体（如石英、金刚石、硫酸铜等）和非晶体（如玻璃、松香、沥青等）；按其导电能力的强弱，可分为导体（电阻率小于 员 员 ·皂 、绝缘体（电阻率大于 员 员 ·皂 和半导体（电阻率介于导体和绝缘体之间）。制造晶体管和集成电路最常用的材料，如硅（杂 、锗（员 、砷化镓（员 等都属于半导体晶体。

### 员 员 晶体的结构

晶体的原子按一定规律在空间周期性排列，形成一个个格点，称为晶格。不同的晶体通常具有不同的晶格结构，以下介绍 缘种常见的立方结构。

员 简单立方结构：图 员 中立方晶格的每个顶点有一个原子，每个原子同时被相邻的愿个晶胞所共有。长度 称为晶格常数。元素周期表中只有钋（马 一种元素具有这种晶格结构。

圆 体心立方结构：图 员 中除了立方晶格每个顶点上有一个原子外，在立方晶格的中心还有一个原子，如钠（晕 、钼（酝 、钨（宰 等具有这种晶格结构。

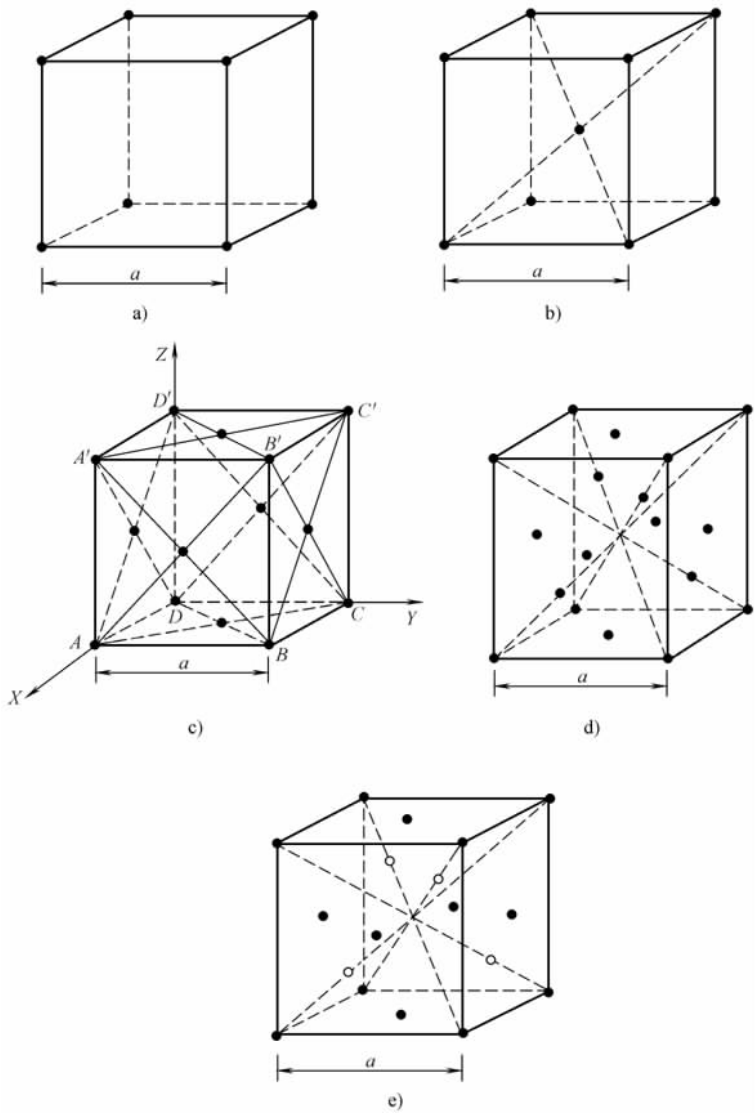


图 [illegible] 晶体的结构

葬 简单立方　遭 体心立方　糟 面心立方　凿 金刚石结构　藻 闪锌矿结构

猿 面心立方结构：图 [illegible] 的立方体 愿个顶角各有一个原子，远个面的中心也有一个原子，如铝（粤造、铜（忧恋、金（粤恋、银（粤早 等都具有这种晶格结构。

【例 [illegible]　假使体心立方结构的原子是刚性的小球，且中心原子与立方体 愿个角落的原子紧密接触，试算出这些原子占此体心立方单胞的空间比率。

解　在体心立方单胞中，每个角落的原子与邻近的 愿个单胞共用，因此每个单胞各有 愿个 [illegible] 角落原子和 [illegible] 个中心原子。可得

每个单胞中的原子数 灶越（[illegible] 伊愿（角落）垣[illegible]越圆；

相邻两原子距离（沿体对角线方向）越葬/猿圆；

圆

每个原子半径 则越葬/猿源。

每个原子体积 宋原子 越原 辕圆 伊(葬/猿源)猿越 (葬/猿源)猿越圆员远

单胞中所能填的最大空间比率 越原子数 伊每个原子体积 辕每个单胞总体积$\left(\frac{灶伊宋_{原子}}{宋_{单胞}}\right)$ 越圆 葬/猿源)猿伊 越 √猿员远

因此整个体心立方单胞有 远愿被原子所占据，猿愿的体积是空的。

源 金刚石结构和共价键：图 员圆员由两个面心立方结构沿空间对角线错开 员辕源的空间对角线长度相互嵌套而成，如硅和锗都具有这种晶格结构。它们在化学元素周期表中都属于第Ⅳ族元素，原子的最外层具有 源个价电子。大量的硅（杂质）、锗（员藻原子靠共价键结合组合成晶体，每个原子周围都有 源个最邻近的原子，组成正四面体结构，见图 员圆员 这 源个原子分别处在正四面体的 源个顶角上，任一顶角上的原子各贡献一个价电子和中心原子的 源个价电子分别组成电子对，作为两个原子所共有的价电子对。共有的电子对在两个原子之间形成较大的电子云密度，通过它们对原子实（原子核与内层电子组成的系统）的引力把两个原子结合在一起，这就是共价键。这样，每个原子和周围 源个最邻近的原子组成 源个共价键。上述四面体 源个顶角上的原子又可以通过共价键和邻近的 源个原子组成 源个正四面体，以此类推，将这样的许多正四面体堆积起来，就得到了金刚石结构，见图 员圆员 原子在晶胞中的排列情况是：愿个原子分别位于立方体的 愿个顶角上，远个原子位于 远个面的中心上，另外，晶胞内部有 源个原子。由于顶角上的原子被相邻的 愿个原胞所共有（员辕愿），而 远个面中心的原子分别被相邻两个面所共有（员辕圆），所以每个原胞中有 愿个原子。实验测得，硅和锗的晶格常数分别为 缘援源源猿源伊员园原员源米和 缘援远远缘苑伊员园原员源米，从而求得每立方厘米体积内硅和锗分别有 缘援园园园园伊员园圆圆个和 源援圆圆园园伊员园圆圆个原子，两原子间的最短距离分别为 圆援猿缘伊员园原愿米和 圆援源源伊员园原愿米。

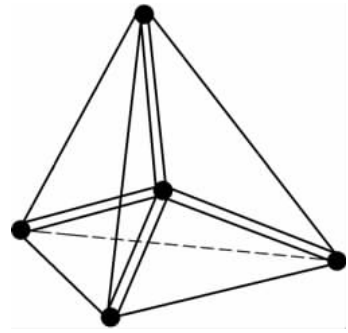

图 员圆员 正四面体结构

【例 员圆圆】 硅（杂质）在 猿园园运时的晶格常数为 缘援源源猿源伊员园原员源米，请计算出每立方厘米体积中硅原子数及常温下的硅原子密度。（硅的摩尔质量为 圆愿援园愿 克/摩尔）

解 每个单胞中有 愿个原子。因此每立方厘米体积中的硅原子数为

愿/葬猿越[愿/(缘援源源猿源伊员园原员源)猿] 猿(个原子/立方厘米) 越缘伊员园圆圆(个原子/立方厘米)

密度 越每立方厘米中的原子数 伊每摩尔原子质量/阿伏伽德罗常数

越[缘伊员园圆圆伊圆愿援园愿/(缘援源源猿源伊员园原愿)猿]/远援员源伊员园猿猿

越圆援猿猿伊员园猿 克/立方厘米

缘 闪锌矿结构和混合键：由化学元素周期表中的Ⅲ族元素［如铝（员猿造）、镓（员源葬）、铟（员员辛）］和Ⅴ族元素［如磷（猿园）、砷（猿缘藻）、锑（猿远悼）］合成的Ⅲ原Ⅴ族化合物都是半导体材料，它们绝大多数具有闪锌矿结构。这种结构与金刚石结构类似，区别在于金刚石结构由一种原子组成，而闪锌矿结构由两种不同的原子组成。它是由两种原子各自组成的面心立方晶格沿空间对角线位移 员/源空间对角线长度嵌套而成的，如图 员圆圆所示。每个原子都被 源个异族原子所包围（Ⅲ族原子被Ⅴ族原子包围，Ⅴ族原子被Ⅲ族原子包围）。如果顶点和面心的原子是Ⅲ族原子，则晶胞内部 源个原子是Ⅴ族原子，反之亦然。与金刚石结构类似，每个原

需要全本请访问 www.ertongbook.com

胞有 愿个原子组成，其中 源个Ⅲ族原子 源个Ⅴ族原子。它们之间的化学键既有共价键成分，又有一定的离子键成分，我们称之为混合键。在这种共价性化合物晶体中，结合的性质具有不同程度的离子性，所以，通常称这类半导体为极性半导体，这是Ⅲ鄄Ⅴ族化合物半导体和Ⅳ族元素半导体的一个重要区别。例如，重要的Ⅲ鄄Ⅴ族化合物半导体材料砷化镓（[illegible]）相邻砷原子和镓原子所共有的价电子实际上并不是对等地分布在砷和镓的附近，由于砷具有较强的电负性（贡献了 缘个价电子），成键的电子更集中地分布在砷原子附近，因而，在共价化合物中，电负性强的原子平均来说带有负电，电负性弱的原子平均来说相当于带有正电，Ⅲ族和Ⅴ族原子形成电偶极子，正负电荷之间的库仑力作用使该化合物呈一定极性，对结合能也有一定贡献。其他具有闪锌矿结构的化合物还有磷化镓（[illegible]）、硫化锌（[illegible]）、硫化镉（[illegible]）等。

## [illegible] 晶体的各向异性

以面心立方为例，见图 [illegible] 在 [illegible]平面内有 远个原子，在 [illegible]平面内有 缘个原子，且这两个平面内原子的间距不同。这表明，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弹性膜量、硬度、热膨胀系数、导热性、电阻率、电位移矢量、电极化强度、磁化率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具有相当重要的研究价值。常用密勒指数来标志晶体的不同取向。密勒指数是这样得到的：

[illegible] 确定某平面在直角坐标系 猿个轴上的截点，并以晶格常数为单位测得相应的截距。

[illegible] 取截距的倒数，然后约简为 猿个没有公约数的整数，即将其化简成最简单的整数比。

猿 将此结果以“（[illegible]”表示，即为此平面的密勒指数。

见图 [illegible] 晶面 [illegible]在坐标轴上的截距为 [illegible] 肄，其倒数为 [illegible] 此平面用密勒指数表示为（[illegible]，此晶面的晶向即为 [illegible]；晶面 [illegible]用密勒指数表示为（[illegible]；晶面 [illegible]用密勒指数表示为（[illegible]。

某一确定的晶面常用密勒指数表示为（[illegible]，（[illegible] 则代表在 [illegible]轴上截距为负的平面，[illegible] 则代表一晶体的方向，如 [illegible] 方向定义为垂直于（[illegible] 平面的方向。

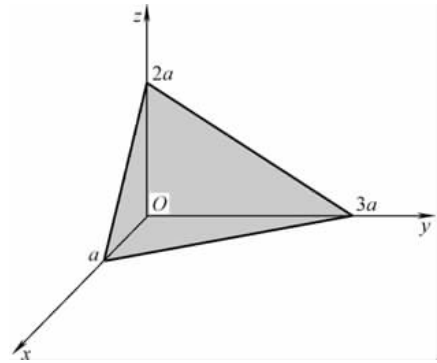

图 [illegible] 一个（[illegible] 晶面

【例 [illegible] 如图 [illegible]所示，平面在沿着 猿个坐标轴的方向有 猿个截距 [illegible] 取这些截距的倒数可得 [illegible] 这 猿个数的最简单整数比为 [illegible]（每个分数乘 [illegible]所得）。因此这个平面可以表示为（[illegible] 平面。

## [illegible] 半导体的电性能

由于半导体材料特殊的晶格结构，使半导体材料在电性能上具有许多独特的性质。

源

### 温度和半导体

半导体的电导率随温度升高而迅速增加。金属电阻率的温度系数是正的（即电阻率随温度升高而增加，且增加得很慢），然而半导体材料电阻率的温度系数都是负的（即温度升高电阻率减小，电导率增加，且增加得很快）。因此，利用半导体材料制成的电阻器，对温度和热量的反应极其灵敏，称之为热敏电阻。由于热敏电阻对温度敏感，体积又小，热惯性也小，寿命又长，因此在无线电技术、远距离控制与测量、自动化等许多方面都有广泛的应用价值。

### 杂质和半导体

杂质对半导体材料导电能力的影响非常大。例如，纯净硅在室温下的电阻率为 [illegible]，若掺入 [illegible] 的杂质（如磷原子），其电阻率就会降至 [illegible]，虽然此时硅的纯度仍旧很高，但电阻率却降至原来的 [illegible] 左右，绝大多数半导体器件都利用了半导体的这一特性。

### 光照和半导体

光照对半导体材料的导电能力也有很大的影响。例如，硫化镉（[illegible]）薄膜的暗电阻为几十兆欧，然而受光照后，电阻降为几十千欧，阻值在受光照以后改变了几百倍。所以，半导体可制成各种光敏电阻，是自动控制中的重要元件之一。

### 其他因素和半导体

除温度、杂质、光照外，电场、磁场及其他外界因素（如外应力）的作用也会影响半导体材料的导电能力。

在 [illegible] 世纪 [illegible] 年代初期，锗曾经是最主要的半导体材料，但自 [illegible] 世纪 [illegible] 年代初期以来，硅已取而代之成为半导体制造的主要材料。使用硅的主要原因，是因为硅器件工艺的突破，硅平面工艺中，二氧化硅的运用在其中起着决定性的作用，经济上的考虑也是原因之一，可用于制造器件等级的硅材料，远比其他半导体材料价格低廉，在二氧化硅及硅酸盐中硅的含量占地球的 [illegible]，仅次于氧。到目前为止，硅可以说是元素周期表中被研究最多且技术最成熟的半导体元素。

## 半导体中的电子状态和能带

### 电子的共有化运动

通常我们认为原子由带正电的原子核和带负电的电子组成。由于原子核对电子有静电引力，使电子只能在围绕原子核的轨道上运动。按量子力学的观念，虽然在空间的所有范围内都有电子出现的几率，但对单个原子中的电子而言，其几率的最大值则局限在离原子核中心很小的范围内（玻尔半径数量级）。为了描述电子云在空间分布几率的最大值，引入了轨道这一概念，即轨道上，电子出现的几率最大。

[illegible]

原子中的电子受到原子核和其他电子的共同作用。制造半导体器件所用的材料大多是单晶体。单晶体是由原子按一定周期重复排列而成，且排列相当紧密，相邻原子间距只有零点几个纳米的数量级。此时，半导体中的电子状态肯定和单个原子中的不同，特别是外层电子会有显著变化。因为当原子间距很小时，原子间的电子轨道将相遇而交叠，晶体中每个原子的电子同时受到多个原子核和电子 （包括这个原子的电子和其他原子的电子）作用。电子不仅可以围绕自身原子核旋转，而且可以转到另一个原子周围，即同一个电子可以被多个原子共有，电子不再完全局限在某一个原子上，可以由一个原子转到相邻原子，将可以在整个晶体中运动。这种由于晶体中原子的周期性排列而使电子不再为单个原子所有的现象，称为电子共有化。在晶体中，不但外层价电子的轨道有交叠，内层电子的轨道也可能有交叠，它们都会形成共有化运动，但内层电子的轨道交叠较少，共有化程度弱些，外层电子轨道交叠较多，共有化程度强些。

## 员.圆.圆 电子状态和能带

半导体中的电子与孤立原子中的电子不同，与自由电子也不同。孤立原子中的电子在该原子核和其他电子的势场中运动，而半导体中的电子是在周期性排列且固定不动的大量原子核的势场和其他大量电子的平均势场中运动。这个平均势场也是周期性变化的，且周期与晶格周期相同。根据量子理论，原子系统的能量呈现不连续的状态，即量子化的，也就是电子的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。以两个原子为例，当它们互相靠近时，每个原子中的电子同时受到本身原子 （包括原子核和电子）的势场和另一个原子势场的共同作用，导致每一个能级都分裂成为两个彼此相距很近的能级，而且原子相距越近，能级分裂得越厉害。当考虑 晕个原子组成的晶体时，晕个原子互相靠近结合成晶体，每个原子都受到周围原子势场的作用使原先每个原子中具有相同能量的电子能级分裂成晕个与原来能级很接近的能级，形成一个能带。由于晶体每立方厘米体积内约有 员园圆圆~ 员园圆猿个原子，所以 晕有很大的数值，即分裂成的能级数非常多，且相距很近，可以认为这个能带是“准连续”的,称之为允带。允带之间因没有能级而称为禁带。图 员.圆.源示意地画出了原子能级分裂为能带的情况。原子内层电子共有化运动较弱，其能级分裂较小，能带较窄，而外层电子共有化运动较强，其能级分裂较大，能带较宽，特别是价电子的共有化运动很显著，如同自由运动的电子，价电子常称为“准自由电子”，其能级分裂得很厉害，能带很宽。

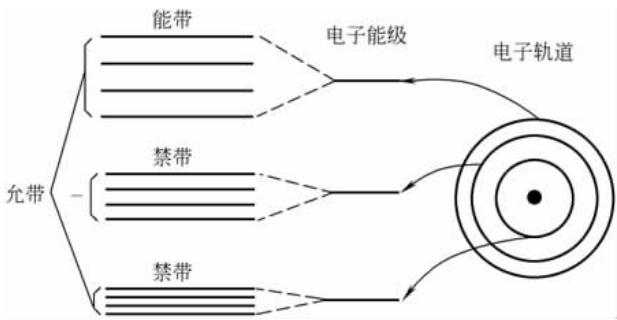

图 员.圆.源 原子能级分裂为能带的示意图

例如，具有金刚石结构的硅和锗，它们的原子都有 源个价电子，组成晶体后，由于能级分裂和轨道杂化的结果，其价电子形成如图 员.圆.缘所示的能带，上下两个允带，中间隔以禁带。根据电子先填充低能级的原理，下面一个能带填满电子，称为满带，上面一个能带是空的，没有电子，称为空带。当晶体上外加电场时，满带中的电子不能起导电作用。因为所有能级都已被电子填满，在外电场作用下，满带中的电子在不同能级间运动并不能改变电子在

能带中的分布。因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，必有另外一个电子沿相反方向转移，产生的电流相互抵消，不产生定向电流，因此满带中的电子不起导电作用。如果能带的能级没有全部被电子填满，在外电场的作用下，电子可以进入能带中未被填充的较高能级，形成电流，起导电作用，这样的能带称为导带。

金属中，由于金属原子中的价电子占据的能带是部分占满的，并且与较高的能带重叠，如图 [illegible] 所示，所以金属有良好的导电性。绝缘体和半导体的能带类似，如图 [illegible] 所示。从能带结构来看，当温度接近热力学温度零度时，半导体和绝缘体都具有充满电子的满带（价带）和空的导带，中间是隔离价带和导带的禁带。当外界条件发生变化时，例如温度升高或光照时，半导体满带中少量电子可被激发到上面的空带中去，使导带底部附近有了一些电子。因而在外电场作用下，这些电子参与导电；同时，价带中由于少了一些电子，在价带顶部附近出现了一些空的量子状态，价带即成了部分占满的能带（相当于半满带），在外电场作用下，仍留在价带中的电子也能起导电作用。价带电子的这种导电作用相当于把这些空的量子状态看作带正电荷的“准粒子”的导电作用，常把这些满带中因失去了电子而留下的空位称为空穴。所以，在半导体中，导带的电子和价带的空穴均参与导电，这与金属导体导电有很大的区别。

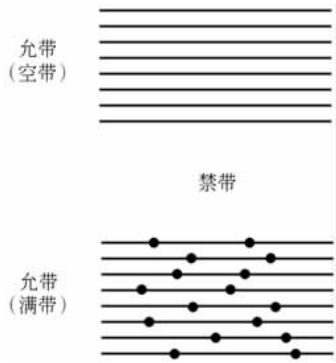


图 [illegible] 金刚石结构价电子能带图（绝对零度）

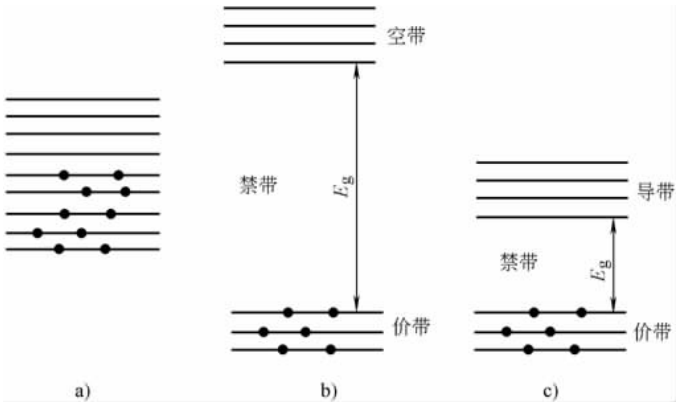


图 [illegible] 导体、绝缘体、半导体的能带示意图

[illegible] 导体 [illegible] 绝缘体 [illegible] 半导体

绝缘体的禁带很宽（[illegible] 约 [illegible]），电子需要吸收很大的能量才能被激发到导带上，在通常温度下，能激发到导带去的电子很少，微不足道，所以导电性很差；半导体的禁带宽度比较小（在室温及正常气压下，硅的 [illegible] 值约为 [illegible]，锗为 [illegible]，而砷化镓为 [illegible]），在通常温度下，已有不少电子被激发到导带中去，所以具有一定的导电能力。图 [illegible] 是一定温度下半导体的能带图。图中“●”表示价带内的电子，[illegible] 是价带电子的最高能量，称为价带顶。在一定温度下，价带的电子依靠热激发有可能获得能量脱离共价键的束缚，成为准自由电子，跃迁到导带上。脱离共价键所需的最低能量就是禁带宽度 [illegible]，[illegible] 是导带电子的最低能量，称为导带底，则 [illegible] 越 [illegible] 原 [illegible]

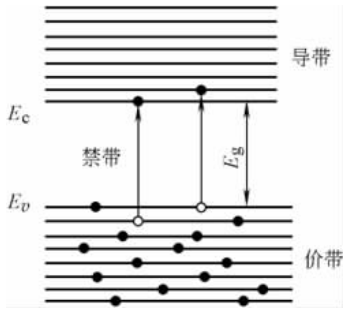


图 [illegible] 一定温度下半导体的能带示意图

[illegible]

价键上的电子激发成为准自由电子，亦即价带电子激发成为导带电子的过程，称为本征激发。

## 第二章 半导体中的杂质和缺陷

理想的半导体晶体是十分纯净，不含任何杂质，且晶格中的原子严格按周期排列的，但实际应用中的半导体材料总是存在着偏离理想情况的各种复杂现象。首先，原子并不是静止在具有严格周期性的晶格的格点位置上，而是在其平衡位置附近振动；其次，半导体材料并不是纯净的，而是含有若干杂质，即在半导体晶格中存在着与组成半导体的元素不同的其他化学元素的原子；第三，实际的半导体晶格结构并不是完整无缺的，而存在着各种形式的缺陷。实践表明，极其微量的杂质和缺陷，能够对半导体材料的物理性质和化学性质产生决定性的影响。当然，也会严重地影响半导体器件的质量。例如，在硅晶体中，若以 第二章个硅原子中掺入一个杂质原子的比例掺入硼（月）原子，则硅晶体的导电率在室温下将增加 第二章倍。又如，用于生产一般硅平面器件的硅单晶，位错密度要求控制在 第二章个/厘米²以下，若位错密度过高，则不可能生产出性能良好的器件。根据理论分析认为，半导体中的杂质和缺陷之所以能起这么重要的作用，是由于杂质和缺陷的存在，会使严格按周期排列的原子所产生的周期性势场受到破坏，有可能在禁带中引入允许电子存在的能量状态（即能级），从而对半导体的性质产生决定性的影响。

### 第二章.第一节 半导体中的杂质和杂质能级

#### 第二章.第一节.一、替位式杂质、间隙式杂质

半导体中的杂质主要来源有 猿个，一是由于制备半导体的原材料纯度不够高，二是半导体单晶制备过程中及器件制造过程中的沾污，三是为了改变半导体的性质而人为地掺入某种化学元素的原子。硅是化学元素周期表中的第Ⅳ族元素，每一个硅原子具有 源个价电子，硅原子间以共价键的方式结合成晶体。其晶体的结构属于金刚石结构，其晶胞是一个立方体，如图 第二章.第一节所示。如果近似地把原子看成是半径为 则的刚性圆球，每个晶胞中有 愿个原子，它们所占晶胞总体积的百分比为$\left(\text{愿}\cdot\frac{\text{源}}{\text{猿}}\pi\right)$伊第二章.第一节.一.一.一

元素与Ⅲ、Ⅴ族元素比较相近，所以Ⅲ、Ⅴ族元素在硅、锗晶体中都是替位式杂质。通常用单位体积中的杂质原子数来表征半导体晶体中杂质含量的多少，称为杂质浓度。

**施主杂质、施主能级**

Ⅲ、Ⅴ族元素在硅、锗晶体中以替位式杂质的形式存在。以硅中掺入磷（P）为例，研究Ⅴ族元素杂质的作用。当一个磷原子占据了硅原子的位置，如图所示，磷原子有个价电子，其中个价电子与周围的个硅原子形成共价键，还剩余一个价电子。此时磷原子成为一个带有一个正电荷的磷离子（$P^+$），称这个正电荷为正电中心磷离子。所以当磷原子替代硅原子后，其效果相当于形成了一个正电中心和一个多余的电子。多余的电子束缚在正电中心周围，但这种束缚作用比共价键的束缚作用弱得多，只要很小的能量就可以使多余电子挣脱束缚，成为自由电子在晶格中运动，起到导电的作用。这时磷原子就成了一个少了一个价电子的磷离子，它是一个不能移动的正电中心。多余电子脱离杂质原子成为导电电子的过程称为杂质电离。使这个多余电子挣脱束缚成为导电电子所需要的能量称为杂质电离能，用$\Delta E_D$表示。实验测得，Ⅴ族元素原子在硅、锗中的电离能很小（即多余电子很容易挣脱原子的束缚成为导电电子），在硅中电离能约为，在锗中电离能约为，比硅、锗的禁带宽度小得多。由于Ⅴ族元素杂质在硅、锗中电离时，能够施放电子而产生导电电子并形成正电中心，通常被称为施主杂质或型杂质。施放电子的过程称为施主电离。施主杂质在未电离时是中性的，称为束缚态或中性态，电离后成为正电中心，称为离化态。

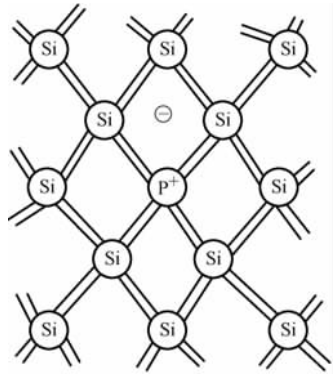

图 硅中的施主杂质

施主杂质的电离过程可以用能带图来表示，如图所示，当电子得到能量$\Delta E_D$后，就从施主的束缚态跃迁到导带成为导电电子，可见，被施主杂质束缚时的电子的能量比导带底低$\Delta E_D$，将被施主杂质束缚的电子的能量状态称为施主能级，用$E_D$表示。由于$\Delta E_D$远小于禁带宽度$E_g$，所以施主能级位于离导带底很近的禁带中。由于施主杂质相对较少，杂质原子间的相互作用可以忽略，所以施主能级可以看作是一些具有相同能量的孤立能级，图中用离导带底为$\Delta E_D$处的短线段表示，每一个短线段对应一个施主杂质原子，施主能级上的小黑点表示被施主杂质束缚的电子，此时为束缚态。图中的箭头表示被束缚的电子得到电离能后从施主能级跃迁到导带成为导电电子的电离过程。导带中的小黑点表示进入导带中的电子，施主能级处画⊕表示施主杂质电离后带正电。在纯净半导体材料中掺入施主杂质，杂质电离后，导带中的导电电子增多（电子密度大于空穴密度），增强了半导体的导电能力。通常把主要依靠导带电子导电的半导体称为电子型或型半导体。

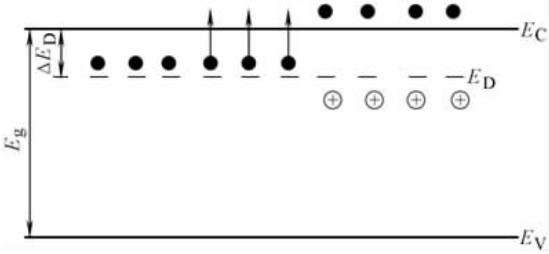

图 施主能级和施主电离示意图

**受主杂质、受主能级**

以硅中掺入硼（B）为例，研究Ⅲ族元素杂质的作用。如图所示，一个硼原子占据

需要全本请访问 www.ertongbook.com