

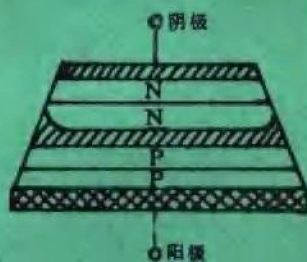


电力电子技术丛书

# 电力半导体器件原理

顾廉楚 主编

机械工业出版社



DIANLI DIANZI JISHU CONGSHU

本书是《电力电子技术丛书》的一个分册。全书共分十章，第一章为基础知识，对电力半导体器件的物理基础作了详细介绍，第二章到第八章对各种常用半导体器件，如整流管、大功率晶体管、普通晶闸管、高频晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管和可关断晶闸管等的结构特点、工作原理、特性参数作了全面分析，最后对散热器和晶闸管门极触发特性进行了重点说明。全书内容对设计电力半导体装置提供了依据，并为读者阅读本丛书其他各分册打下了必要的基础。

本书可供从事电力电子技术和工业自动化技术的人员阅读，也可供大专院校有关专业的师生参考。

电力电子技术丛书  
电力半导体器件原理

顾廉楚 主编

\*

责任编辑：严蕊琪 责任校对：贾立萍

版式设计：胡金英

\*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制第一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 · 印张 11 · 字数 285 千字

1988年 7 月北京第一版·1988年 7 月北京第一次印刷

印数 0.001—3.600 · 定价：4.15元

\*

ISBN 7-111-00590-2/TM·89

## 出版者的话

电力电子技术是以晶闸管为主的电力半导体器件及其应用的技术，也是融合“电力”、“电子”和“控制”于一体的技术。由于电力半导体器件具有效率高、控制性能好、体积小、重量轻、使用可靠等优点，它已广泛地应用于电力、冶金、矿山、化工、交通运输、机械、轻工等部门，成为节能最有成效的技术之一。

为了普及与推广电力电子技术，大力促进我国国民经济各部门的发展，在中国电工技术学会电力电子学会组织下，我们决定出版这套《电力电子技术丛书》。

这套丛书包括《电力半导体器件原理》、《电力半导体电路原理》、《电力电子技术与节能》、《直流电动机晶闸管调速系统》、《交流电动机晶闸管调速系统》、《晶闸管斩波器》、《无功补偿与电力电子技术》、《家用电器与电力电子技术》、《晶闸管交流电力控制器》、《电力半导体直流稳定电源》、《不间断供电系统》、《脉冲电镀和脉冲焊电源》等，将陆续出版。

电力电子学会及本丛书编委会对丛书的选题、组稿、审定稿付出了辛勤劳动，还有不少单位对编审稿工作给予了热忱关怀与帮助，在此表示深切的谢意。

机械工业出版社

## 编委会成员

主任委员 顾庚楚  
副主任委员 张明勋 苏文成 张为佐  
陈守良 严蕊琪

委员 (按姓氏笔划序)

卞敬明 孙流芳 李佑持 沈来仪  
张立 张永生 张铁忠 周胜宗  
秦祖荫 徐传骥

## 前 言

本书是根据丛书的编写指导思想和读者对象，并按照丛书编委扩大会议所通过的编写提纲进行编写的。

电力半导体器件是电力电子学的基础。器件容量的扩大和结构原理的更新常常给电力电子装置的效率、体积、重量、运行质量等方面带来革命性的变化。因此，从事电力电子应用技术的工程技术人员也越来越重视器件方面的发展。此外，应用器件的人员如对器件有较深入的了解，则能更正确地应用器件和更充分地发挥器件的内在潜力。

本书内容包括当前在电力电子装置中应用的主要器件的原理、应用特点、及典型应用实例。一般情况下均不采用繁难的数学推导，但给出了近似的、符合实际的计算公式。

本书由清华大学顾廉楚教授主编。全书共分十章，其中第一、二、三章由沈来仪同志编写；第四章由顾廉楚同志编写；第五章由赵良炳同志编写；第六章和第十章由黄跃先同志编写；第七章由袁维慈同志编写；第八章由张立同志编写；第九章由胡英伦同志编写。

本书原稿由徐传骧、聂代祚二位同志作了详尽的审阅，参加审稿会的其他同志也提出了许多宝贵意见。此外，各单位还有许多同志参加了绘图、抄写等工作，在此一併表示衷心的感谢。

由于电力电子技术发展极为迅速，作者水平又有限，书中缺点和错误在所难免，希望读者提出宝贵的批评和意见。

作 者

# 目 录

<b>第一章 电力半导体器件的物理基础</b> .....	<b>1</b>
<b>第一节 金属、绝缘体与半导体</b> .....	<b>1</b>
一、原子结构及其稳定性 .....	<b>1</b>
二、晶体中电子的共有化运动——能带的形成 .....	<b>3</b>
三、绝缘体、金属和半导体的导电能力 .....	<b>4</b>
<b>第二节 半导体的导电机构</b> .....	<b>6</b>
一、半导体中的载流子——电子和空穴 .....	<b>6</b>
二、本征半导体和掺杂半导体的载流子来源 .....	<b>6</b>
三、费米能级和热平衡载流子浓度 .....	<b>9</b>
四、载流子的漂移运动和迁移率 .....	<b>11</b>
五、电导率或电阻率 .....	<b>14</b>
<b>第三节 非平衡条件下的半导体</b> .....	<b>15</b>
一、大注入和小注入的概念 .....	<b>15</b>
二、载流子的产生和复合 .....	<b>16</b>
三、复合中心的复合 .....	<b>17</b>
四、表征非平衡条件下半导体特性的三个物理量 ——寿命、扩散长度和表面复合速度 .....	<b>18</b>
<b>第四节 PN结原理</b> .....	<b>21</b>
一、平衡PN结.....	<b>21</b>
二、正偏PN结.....	<b>24</b>
三、反偏PN结.....	<b>27</b>
<b>第五节 PN结的几个重要特性</b> .....	<b>32</b>
一、PN结的击穿.....	<b>32</b>
二、PN结表面电特性.....	<b>35</b>
三、PN结耐压的温度特性.....	<b>37</b>
<b>第六节 金属半导体接触</b> .....	<b>38</b>
一、肖特基势垒 .....	<b>38</b>
二、有外加偏压时势垒的变化 .....	<b>40</b>

三、一种载流子运输电荷 .....	41
参考文献 .....	41
第二章 整流管 .....	43
第一节 硅整流管 .....	43
一、大功率硅整流管的结构 .....	43
二、大功率硅整流管的主要电参数 .....	44
三、大功率整流管设计制造和应用的困难 .....	44
第二节 快速整流管 .....	45
一、反向恢复时间 .....	45
二、快速整流管高频应用原理 .....	45
三、快速整流管的电参数 .....	46
第三节 肖特基整流管 .....	47
一、肖特基势垒的伏安特性 .....	47
二、肖特基整流管的结构及其电参数的特色 .....	48
参考文献 .....	51
第三章 大功率晶体管 .....	52
第一节 大功率晶体管概述 .....	52
一、国内外生产水平 .....	52
二、应用领域的扩展 .....	52
三、展望 .....	52
第二节 功率晶体管工作原理 .....	56
一、晶体管内电流传输情形 .....	56
二、晶体管的饱和态与截止态 .....	57
三、大电流条件下发生的效应 .....	58
第三节 功率晶体管的静态参数 .....	60
一、直流参数 .....	60
二、极限参数 .....	64
第四节 晶体管的开关特性 .....	67
一、开关过程简介 .....	67
二、影响开关时间的因素 .....	69
三、实际测量时确定开关时间的标准 .....	74
四、功率晶体管的开关特性参数 .....	74
第五节 二次击穿和安全工作区 .....	75

一、二次击穿特性 .....	75
二、安全工作区 .....	76
三、研究实例 .....	77
第六节 功率晶体管的结构特点 .....	77
第七节 功率晶体管的应用特点 .....	79
一、应用特点 .....	79
二、举例说明 .....	80
参考文献 .....	82
第四章 普通晶闸管 .....	83
第一节 引言 .....	83
第二节 晶闸管的耐压能力 .....	85
一、PNPN结构的反向转折电压 .....	85
二、PNPN结构的正向转折电压 .....	89
三、提高 $V_{BF}$ 的方法 .....	91
第三节 晶闸管的控制特性 .....	92
一、 $I_G \neq 0$ 时的特性曲线方程 .....	92
二、 $I_G$ 对阻断特性曲线段及转折电压的影响 .....	94
三、 $I_G$ 对关断点的影响 .....	97
四、 $I_G$ 对维持电流的影响 .....	98
五、具有短路发射结晶闸管的控制特性 .....	100
第四节 晶闸管的通态特性 .....	104
一、晶闸管通态的特征 .....	104
二、通态伏安特性 .....	105
第五节 晶闸管导通的动态过程 .....	116
一、引言 .....	116
二、晶闸管导通时的电流电压变化 .....	116
三、延迟及上升阶段 .....	117
四、扩展阶段 .....	124
第六节 晶闸管的 $\frac{di}{dt}$ 耐量 .....	126
一、晶闸管承受电流上升率 $\left(\frac{di}{dt}\right)$ 的能力 .....	126
二、强触发电流法 .....	128
三、放大门极法 .....	129



四、横向场阴极 .....	129
五、再生门极结构 .....	130
第七节 电压上升率 $\left(-\frac{dv}{dt}\right)$ 耐量 .....	131
第八节 晶闸管的关断过程 .....	132
一、概述 .....	132
二、晶闸管关断的物理过程 .....	133
第九节 晶闸管的功率损耗 .....	137
一、通态损耗 $P_F$ .....	138
二、正、反向阻断损耗 $P_D$ .....	140
三、开通损耗 $P_{on}$ .....	140
四、关断损耗 $P_{RC}$ .....	142
五、门极损耗 $P_G$ .....	142
第十节 普通晶闸管的主要参数 .....	142
一、普通晶闸管的电压定额 .....	142
二、普通晶闸管的电流定额 .....	143
三、晶闸管的门极定额 .....	144
四、动态参数和结温 .....	145
参考文献 .....	145
<b>第五章 高频晶闸管</b> .....	<b>146</b>
第一节 概述 .....	146
第二节 晶闸管中的损耗与频率的关系 .....	147
第三节 高频晶闸管的特点 .....	150
第四节 高频晶闸管的性能指标 .....	154
第五节 选用高频晶闸管的注意事项 .....	155
第六节 高频晶闸管典型应用线路 .....	164
参考文献 .....	170
<b>第六章 双向晶闸管</b> .....	<b>171</b>
第一节 概述 .....	171
第二节 双向晶闸管触发原理 .....	173
一、 $I_+$ 触发 .....	173
二、 $I_-$ 触发 .....	174
三、 $III_-$ 触发 .....	175
四、 $III_+$ 触发 .....	175

第三节	双向晶闸管的特性及主要参数 .....	176
一、	额定电流 $I_T$ .....	177
二、	浪涌电流 $I_{TSM}$ .....	178
三、	换向特性 .....	178
第四节	双向晶闸管应用的基本工作方式和常用电路 .....	180
一、	静态开关 .....	180
二、	相位控制 (交流调压器) .....	183
三、	零压开关 (调功器) .....	187
四、	固体继电器和固体接触器 .....	190
五、	附录: 双向触发二极管 (DIAC) .....	191
第七章	逆导晶闸管 .....	195
第一节	逆导晶闸管的发展概况及主要类型 .....	195
第二节	逆导晶闸管换流特性分析、结构特点和电气性能特点 .....	201
一、	逆导晶闸管的换流特性分析 .....	201
二、	逆导晶闸管的结构特点 .....	206
三、	逆导晶闸管的电性能特点 .....	210
第三节	主要特性参数及若干动态参数的测试特点 .....	213
一、	主要特性参数的说明 .....	216
二、	若干动态参数的测试特点 .....	217
第四节	逆导晶闸管的典型应用及其使用特点 .....	231
一、	典型应用电路 .....	231
二、	逆导晶闸管的应用特点 .....	235
参考文献	.....	239
第八章	可关断晶闸管 .....	241
第一节	概述 .....	241
第二节	基本原理 .....	243
第三节	基本参数 .....	249
第四节	门极控制 .....	256
第五节	阳极控制 .....	270
第六节	可关断晶闸管的典型应用 .....	283
第九章	散热器 .....	289
第一节	概述 .....	289
第二节	冷却方式的类型、选用和维护知识 .....	290

一、自冷散热器 .....	291
二、风冷散热器 .....	294
三、水冷散热器 .....	296
四、油冷散热器 .....	298
五、沸腾冷却散热器 .....	299
第三节 散热器的选配计算 .....	303
一、热阻 .....	303
二、耗散功率(平均值) .....	306
三、瞬态热阻抗的计算关系和应用实例 .....	308
第四节 散热器安装工艺要求 .....	319
一、压合接触表面的要求 .....	319
二、螺栓式器件与散热器组装的注意事项 .....	319
三、平板器件与散热器组装的注意事项 .....	320
四、组合器件中的组装注意事项 .....	322
五、附录——露点温度的确定 .....	322
参考文献 .....	325
第十章 晶闸管门极触发特性 .....	327
第一节 概述 .....	327
第二节 门极电流对晶闸管 $V-I$ 特性的影响 .....	327
第三节 晶闸管门极-阴极间的 $V-I$ 特性 .....	328
第四节 各种因素对晶闸管触发特性的影响 .....	330
一、温度 .....	330
二、门极-阴极间外接电阻 .....	331
三、门极-阴极间外接电容 .....	331
四、门极-阴极间接电感 .....	331
五、门极正偏压 .....	331
六、门极负偏压 .....	332
第五节 门极直流触发和脉冲触发特性 .....	332
第六节 基本的触发器件和电路 .....	333

# 第一章 电力半导体器件的物理基础

半导体之所以能够做成具有整流功能的二极管和晶闸管、具有放大功能的三极管、具有开关功能的开关管等不同电特性的半导体器件，这是由于人们掌握了半导体的物理性质，知道通过适当的工艺处理，可以改变半导体的成分和结构，使之适于做成各种要求的器件。例如，我们熟知的P型、N型半导体，就是分别掺三价元素、五价元素后的半导体材料。

电力半导体器件主要是硅器件。本章着重介绍硅的导电机构及其区别于绝缘体、金属的特点。考虑到半导体器件处于工作状态时，其内部参与导电的电子的热平衡状态被打乱，并且它们恢复平衡的快慢对器件的工作特性起决定性作用，故对非平衡条件下半导体内参与导电的电子的行为也作扼要介绍。最后，介绍PN结的形成及其电特性，为以后各章描述器件工作原理、电特性等提供最基础的知识。

## 第一节 金属、绝缘体与半导体

固体，按导电能力通常可分为金属、绝缘体与半导体。金属是良导体，而绝缘体是不良导体。金属的电阻率一般都在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间，而典型的绝缘体的电阻率则大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 。某些电阻率在 $10^{10} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间的固体则被归类为半导体。

下面分析硅的微观结构，以便解释半导体的电阻率介于金属与绝缘体之间的内在原因。

### 一、原子结构及其稳定性

原子由带正电荷的核和带负电荷的核外电子组成。在通常情况下，正负电荷量相等，所以原子是电中性的。

核外电子是按 $2n^2$ 的规律分层排列的。若将原子核比作球心，

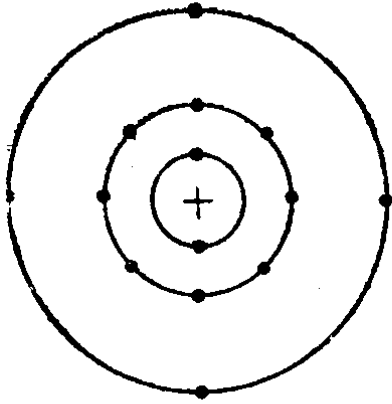


图1-1 硅原子中电子的排列

核外的电子层就是一个个同心球壳。图1-1表示硅原子中电子的排列情形。14个电子，第一层（即 $n=1$ ）排2个，第二层（即 $n=2$ ）排8个，第三层（即 $n=3$ ）本来可以排18个，但是只剩下4个，故第三层排4个。第一层的能级最低，壳层离核越远，能级越高。电子总是首先填充低能级，故14个电子首先排满第一层和第二层，剩下的

4个电子排在第三层，它们被称为价电子。价电子是最外层电子，离核最远，受核的束缚（即静电引力）最小。那么，它们可否从一个原子转移到另一个原子呢？这取决于最外层电子的数目。在门捷列夫周期表中，元素按化合价分为八大族。第八族元素不能和其他族元素化合，结构非常稳定，称为惰性气体。它们的结构特点是最外层电子数目都是8（氦例外）。一至七族元素，当它们的最外层电子不满8个时，可以和某些异族元素化合，发生电子在原子间的转移，这种转移总是倾向于使各自的最外电子层具有8个电子。例如，钠原子与氯原子相化合时，钠原子失去一个价电子后，就使次外电子层成为具有8个电子的最外电子层，而氯原子获得一个电子后，就使最外电子层的电子数目满8个，所以它们相化合时，电子可以从钠原子转移到氯原子。完成这种转移后，由于钠和氯的最外电子层的电子数目都已满8个，就形成稳定的氯化钠结构。二氧化硅（ $\text{SiO}_2$ ）也是如此，在形成过程中，每个氧原子失去两个电子，每个硅原子接受四个电子，结果形成稳定的 $\text{SiO}_2$ 结构。由于稳定结构的化合物中，其电子不能在原子间转移，故 $\text{SiO}_2$ 几乎不导电，半导体工艺中常采用它作为绝缘层。

上述情况说明，电子能够在原子间进行转移的条件是原子的最外层电子数目不满8个。

硅晶体是由硅原子组成的。硅原子的最外层电子数目是4，

硅晶体中的电子似乎可以在原子间进行转移，其实不行，因为硅原子结合成硅晶体是以共价键的方式结合的，如图 1-2 所示。价电子虽然为相邻原子所共有，然而对每个硅原子而言，价电子层上都已满 8 个电子。所以结合成硅晶体后，结构非常稳定，电子要摆脱价键束缚是很困难的。

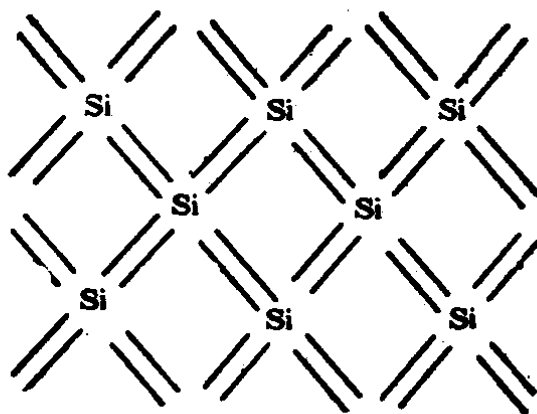


图 1-2 硅晶体共价键结合示意图

金属，虽然也是由其原子组成的，但情形则不同。因为金属原子的最外层电子数目不满 8 个，所以金属中的电子可以在原子间转移，通常称它们为自由电子。热电子发射实验表明，自由电子不仅可以在金属内部自由运动，而且很容易脱离金属。

## 二、晶体中电子的共有化运动——能带的形成

### (一) 晶体中电子的共有化运动

晶体是原子有规则而紧密地排列的固体，如图 1-3 所示。由于原子是密集排列的，所以相邻原子的内外各层轨道都有不同程度的交迭，如图 1-4 所示。可以想像，最外层轨道交迭最显著。

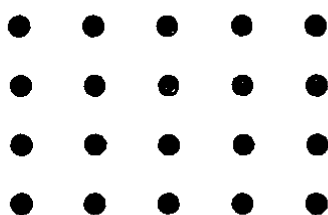


图 1-3 晶体中原子点阵排列平面图

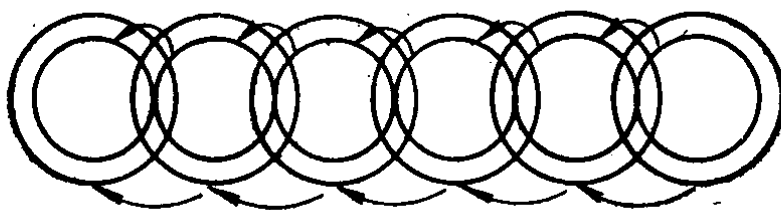


图 1-4 轨道交迭平面示意图

前面指出，硅晶体中的电子不能在原子间转移，这是粗浅分析的结论。考虑轨道交迭，将为解释硅晶体中的电子可以在原子间转移提供依据。但是，并不能因此称晶体中电子为自由电子，它一旦脱离原来原子核的束缚，紧接着又受新的原子核的束缚，也就是说，晶体中的电子摆脱不了原子核的束缚。具有这种特征的运动称为晶体中电子的共有化运动。

## (二) 能带与孤立原子能级

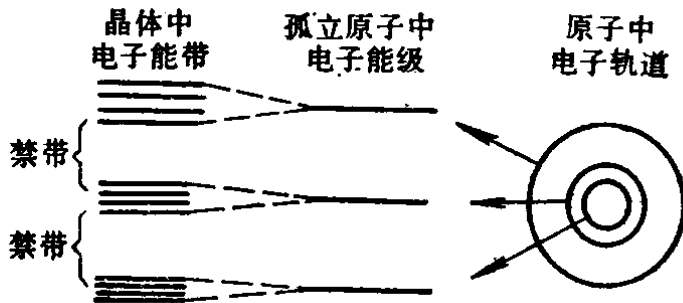


图1-5 能带与孤立原子能级

硅晶体是由数目很大的原子有规则地紧密排列而成的，每立方厘米中有 $5.22 \times 10^{22}$ 个硅原子。图1-1表示的电子能级是孤立硅原子中电子的能级，未考虑原子

间轨道的交迭对电子能级的影响。如果计及这种影响，则晶体中电子的能级与孤立原子中电子的相应能级略有偏离，形成带状，称为能带，如图1-5所示。

如上所述，共有化运动是轨道交迭的结果，图中给出与外层能级相应的能带较宽，可知能带的宽窄直接反映着共有化运动的强弱。图中每两个能带间的区域称为禁带，通常所说的禁带系指价带（与价电子能级相应的能带）和导带（与价带上方相邻的能带）之间的禁带，其宽度用 $E_g$ 表示。

## 三、绝缘体、金属和半导体的导电能力

用能带图讨论固体的导电强弱，只需涉及价带、导带和禁带。能带图如图1-6所示。下面从价带被电子填充的情况和禁带宽度的宽窄说明绝缘体、金属和半导体导电能力有显著差异的原因。

### (一) 绝缘体

绝缘体几乎不导电的原因有两点：1) 绝缘体的价带是满带，满带的每一个能级上都填充了电子。当价带是满带时，导带的能

级则没有被电子占据，完全空着。这就是绝缘体不导电的内在因素。我们知道，导电就是电子在电场的作用下能够作定向运动，从而形成电流。如果每个能级都被电子填充了，即使有外加电场存在，电子也无法形成定向运动，因为周围无空的能级可供电子转移；2)绝缘体的禁带很宽，在通常的自然条件下，如室温(300K)和日光下，给价带电子提供的能量不足以使之发生由价带到导带的跃迁，也就是说，在通常的自然条件下，绝缘体的价带是满带的状况不会发生改变。

### (二) 金属

金属导体的导电能力很强，它的能带情形与绝缘体的不同：1)价带不是满带；2)不存在禁带，价带电子进入导带非常容易。实际上良导体的导带、价带已发生重叠，每个价电子周围的空能级都很多。在外电场作用下它们都可作定向运动，这就是金属导电能力很强的内在因素。

### (三) 半导体

半导体既不像绝缘体那样几乎不导电，也不像金属那样导电能力很强，而是介于两者之间。其原因也有两点：1)半导体的禁带宽度与绝缘体的相比是很窄的；2)半导体在室温下就可产生热激发<sup>⊖</sup>，因此，价带并未被填满，导带也不是完全空着的。于是半导体具有一定的导电能力。但是，在室温下热激发的电子的百分比是很小的，平均每一万亿个价电子中只有一个从价带跃迁到导带。因此，半导体的导电能力与金属导体相比是很微弱的。

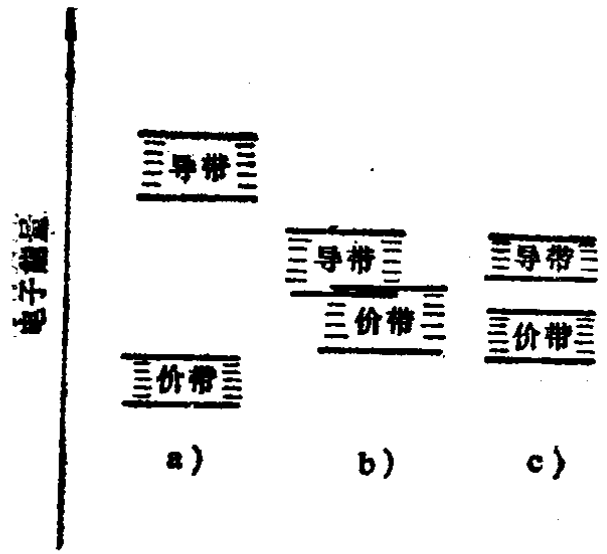


图1-6 绝缘体、金属和半导体的能带图  
a)绝缘体 b)金属 c)半导体

⊖ 由于热运动的结果使极少数电子获得较大的附加能量，足以使其从价带跃迁到导带，这种跃迁称为热激发。



## 第二节 半导体的导电机构

### 一、半导体中的载流子——电子和空穴

所谓载流子，就是在外电场作用下作定向运动而参与导电的带电粒子。金属导电是价电子定向运动的结果，每个价电子都是导电电子。也就是说，每个价电子都是载流子。半导体导电，是导带电子和价带空穴分别做定向运动的结果。所谓空穴就是带正电荷的导电粒子，价带空穴数目的多少与价带空能级数目的多少有关。每个导带电子都是载流子，每个价带空穴也都是载流子。因此可知，半导体导电是两种载流子导电。

### 二、本征半导体和掺杂半导体的载流子来源

#### (一) 本征半导体

本征半导体是完全没有杂质和缺陷的半导体，其能带如图1-7所示。图中 $E_-$ 表示导带底的能级， $E_+$ 表示价带顶的能级。

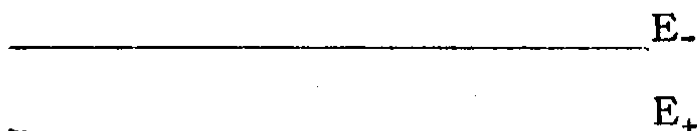


图1-7 本征半导体能带图

本征半导体的载流子主要是靠热激发而成对产生的电子和空穴。图1-8给出了锗、硅和砷化镓的本征载流子浓度 $n_i$ 与绝对温度 $T$ 的关系。该图是根据下述公式作出的：

$$n_i = (N_+ N_-)^{1/2} e^{-\frac{E_g}{2KT}} \quad (1-1)$$

式中  $N_+$  和  $N_-$  —— 与  $T^{3/2}$  有关的量；

$K$  —— 玻耳兹曼常数，其值为  $8.63 \times 10^{-5} eV/K$ 。

本征载流子浓度 $n_i$ 是描述半导体器件特性常用的物理量。由图1-8可知，在相同的温度下，硅的 $n_i$ 比锗的小，其原因是硅的禁带宽度比锗的大。根据式(1-1)可以容易地理解这种关系。

本征半导体的导电能力是很弱的。300K时，硅的 $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ，相应的电阻率约为金属的兆亿倍（即 $10^{12}$ 倍）。显然，