

GAODENGXUEXIAO  
HANSHOUSHIYONGJIAOCAI

高等学校函授试用教材

# 电子线路基础

杨兴宽 刘振福 主编

上册



河南大学出版社

高等学校函授试用教材

**电子线路基础**

上册

主 编 杨兴宽  
刘振福

责任编辑 姜伟林

---

河南大学出版社出版

(开封市明伦街85号)

河南省新华书店发行

中国科学院开封印刷厂印刷

---

开本：850×1168毫米 1/32 印张：15 插页：4 字数：376千字

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数1—7,000 定价：3.30元

---

ISBN7-81018-127-0/O·9

## 内 容 提 要

本书系根据 1984 年原教育部颁发试行的《中学教师进修高等师范本科物理专业教学大纲》编写的，适用于面授 80 学时（不包括打\*号的内容）的教学计划。

本书分上、下两册，本册为上册，包括半导体二极管和三极管、基本放大电路、负反馈放大器、功率放大器、直流放大器和集成运算放大器、直流稳压电源、调谐放大器。为便于自学，每章有内容提要、小结、思考题和习题。下册书末附有各章习题答案和理论与实际密切联系的附录。

本书可作为高等师范院校物理专业函授和中学物理教师进修的教材，也可作为夜大学等其他形式的成人教育和自学用书，还可供全日制高等师范院校物理专业讲授该课时参考使用。

## 前 言

随着函授等成人教育事业的蓬勃发展，特别需要能保证教育质量、体现函授等成人教育特点、适合于自学的教材。华中师范大学、华南师范大学、陕西师范大学、广西师范大学、湖南师范大学、湖北大学、河南大学、河南师范大学、陕西教育学院和湖北教育学院十所高等学校，根据原教育部颁发试行的《中学教师进修高等师范本科物理专业教学大纲》，结合各校多年来举办函授和中学教师进修的实践，合编了物理专业函授教材十七门。本书是该系列教材之一。

本书在编写过程中，注意精选内容，力求突出重点，突破难点；注意能力的培养；注意吸收先进科技成果；尤其是为了使教材体现函授等成人教育的特点，适合于自学，除每章有内容提要、小结、思考题、习题和书末附有答案外，选择的例题较典型而全面，公式的推导较详细；书末还有理论密切联系实际附录；注意了适当联系中学物理教学实际；注意了兼顾全日制高等师范院校物理专业在讲授时对本教材的参考使用。总之，我们力图使教材符合培养规格，保证教学质量，达到全日制高师本科物理专业的科学水平。

本书由河南大学杨兴宽和陕西师范大学刘振福主编。参加编写的有：陕西师大李成章（第一章）、刘振福（第二章）、广西师大冯昌昆（第三、四章）、湖南师大宁英福（第五、八章）、杨兴宽（第六章）、陕西教育学院曹廷葵（第七、九章）、湖北大学李纪武（第十章）、河南大学张学章（第十一章）。

河南大学地理系袁业茜等同志绘制了本书的全部插图，在此表示衷心感谢。

由于我们编写函授教材的经验不足，水平有限，加之时间仓促，书中难免有不少缺点和错误，诚恳希望使用本书的教师和读者批评指正。

十校物理专业函授教材编写组

一九八七年六月

## 本书常用符号表

### 一、基本符号

#### 1. 电流和电压

|                    |                                  |
|--------------------|----------------------------------|
| $i, u$             | 电流、电压瞬时值                         |
| $I, U$             | 直流电流、电压值, 正弦电流、电压有效值, 直流电流、电压增量值 |
| $\dot{I}, \dot{U}$ | 正弦电流、电压复数量                       |
| $I_m, U_m$         | 正弦电流、电压幅值, 脉冲电流、电压幅值             |
| $i_b, i_c$         | 基极、集电极电流瞬时值                      |
| $i_B, i_C$         | 基极、集电极电流总瞬时值(包含直流分量)             |
| $I_B, I_C$         | 基极、集电极电流静态值                      |
| $\dot{I}_b$        | 正弦基极电流复数量                        |
| $I_{bm}$           | 正弦基极电流幅值                         |
| $I_s, U_s$         | 信号源电流、电压有效值                      |
| $I_i, U_i$         | 正弦输入电流、电压有效值                     |
| $I_o, U_o$         | 正弦输出电流、电压有效值                     |
| $V_T$              | 门限电压                             |
| $E$                | 直流电源电压                           |
| $E_c$              | 集电极电源电压                          |
| $E_b$              | 基极电源电压                           |
| $E_d$              | 漏极电源电压                           |
| $E_g$              | 栅极电源电压                           |

#### 2. 频率

|          |            |
|----------|------------|
| $f$      | 频率         |
| $\omega$ | 角频率        |
| $F$      | 非正弦信号的重复频率 |
| $f_l$    | 放大器的下限频率   |
| $f_h$    | 放大器的上限频率   |
| $f_{bw}$ | 放大器的通频带    |

$f_0$  回路的固有谐振频率  
 $f_\alpha$  晶体管共基极截止频率  
 $f_\beta$  晶体管共射极截止频率  
 $f_T$  特征频率

### 3. 电阻、电容、电感

$R$  电阻  
 $R_i$  输入电阻  
 $R_o$  输出电阻  
 $r$  器件的微变电阻  
 $R_L$  负载电阻  
 $R_c, R_b, R_e$  晶体管的集电极、基极、发射极电阻  
 $R_s$  信号源电阻  
 $R_{ss}$  场效应管源极电阻  
 $C$  电容  
 $C_B, C_D$  势垒电容, 扩散电容  
 $C_e$  射极旁路电容  
 $C_i$  输入电容  
 $C_o$  输出电容  
 $C_L$  负载电容  
 $L$  电感

### 4. 放大倍数

$A$  放大倍数  
 $A_u$  电压放大倍数  
 $A_{us}$  源电压放大倍数  
 $A_f$  反馈放大器的放大倍数  
 $A_{ul}$  低频电压放大倍数  
 $A_{uh}$  高频电压放大倍数  
 $A_{um}$  中频电压放大倍数

### 二、其他符号

CMRR 共模抑制比

$D$  二极管

|           |                     |
|-----------|---------------------|
| $\dot{F}$ | 反馈系数                |
| $G$       | 电导, 逻辑门             |
| $n$       | 取样比, 电子浓度,          |
| $N$       | 绕组匝数                |
| $p$       | 空穴浓度                |
| $P$       | 功率                  |
| $Q$       | 静态工作点, 触发器输出端, 品质因数 |
| $t$       | 时间                  |
| $T$       | 周期, 晶体管, 场效应管       |
| $\tau$    | 时间常数                |
| $T_r$     | 变压器                 |
| $X$       | 电抗                  |
| $Z$       | 阻抗                  |
| $\eta$    | 效率                  |
| $e$       | 电场强度                |
| $N_o$     | 扇出系数                |
| $\alpha$  | 晶体管共基接法的电流放大系数      |
| $\beta$   | 晶体管共射接法的电流放大系数      |
| $\gamma$  | 稳压系数                |
| $\varphi$ | 相角差                 |

### 三. 单位

|                    |              |
|--------------------|--------------|
| A                  | 安培(安)        |
| $^{\circ}\text{C}$ | 摄氏度          |
| dB                 | 分贝           |
| F                  | 法拉(法)        |
| H                  | 亨利(亨)        |
| $\text{Hz}$        | 赫芝(赫)        |
| K                  | 绝对温度(开尔文)    |
| S                  | 西门子(西等于 1/欧) |
| $\Omega$           | 欧姆(欧)        |

s 秒  
V 伏特(伏)  
W 瓦特(瓦)

#### 四. 词冠

m 毫(毫) $10^{-3}$   
 $\mu$  微(微) $10^{-6}$   
n 纳诺(纳) $10^{-9}$   
p 皮可(皮) $10^{-12}$   
k 千(千) $10^3$   
M 兆(兆) $10^6$

## 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一章 半导体二极管和三极管 .....          | 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 半导体的晶体结 构 .....         | 2  |
| 1.1-3 本征半导体的 导电特性 .....       | 4  |
| 1.1-4 杂质半 导 体 .....           | 6  |
| 1.1-5 $PN$ 结的形成及其 特 性 .....   | 9  |
| § 1.2 半导体二极 管 .....           | 18 |
| 1.2-1 半 导 体二极管的 结 构 .....     | 18 |
| 1.2-2 二极管的伏 安 特性 .....        | 20 |
| 1.2-3 二极管的主 要 参数 .....        | 22 |
| 1.2-4 稳压二 极 管 .....           | 24 |
| § 1.3 半导体三极管 .....            | 26 |
| 1.3-1 三极管的结构及其内部物理 过 程 .....  | 26 |
| 1.3-2 三极管的电流分配关系和放 大 作用 ..... | 29 |
| 1.3-3 三极管的特 性 曲线 .....        | 33 |
| 1.3-4 三极管的 主 要 参数 .....       | 38 |
| 1.3-5 温度对三极管 参 数的影响 .....     | 43 |
| 附录 半导体器件的命名方法 .....           | 44 |
| 小结 .....                      | 44 |
| 思考题 .....                     | 46 |
| 习题 .....                      | 46 |
| 第二章 基本放大电路 .....              | 49 |
| § 2.1 基本放大电路的组成及工作原理 .....    | 49 |
| 2.1-1 放大电路的三种 接 法 .....       | 50 |
| 2.1-2 共射极放大电路的组 成 .....       | 52 |
| 2.1-3 共射极放大电路的工 作 原理 .....    | 54 |
| 2.1-4 静态工作点的 设 置 .....        | 56 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 2.1-5 主要性能指标 .....           | 58  |
| § 2.2 放大电路的基本分析方法 .....      | 62  |
| 2.2-1 直流通路和交流通路 .....        | 62  |
| 2.2-2 图解分析法 .....            | 64  |
| 2.2-3 微变等效电路分析法 .....        | 75  |
| § 2.3 稳定偏置放大电路 .....         | 90  |
| 2.3-1 温度对静态工作点的影响 .....      | 90  |
| 2.3-2 分压式电流负反馈偏置电路 .....     | 92  |
| 2.3-3 其他偏置电路举例 .....         | 97  |
| § 2.4 放大器的频率特性 .....         | 100 |
| 2.4-1 频率特性和失真的概念 .....       | 100 |
| 2.4-2 单级阻容耦合放大器频率特性的分析 ..... | 106 |
| § 2.5 多级放大器 .....            | 121 |
| 2.5-1 级间耦合方式 .....           | 122 |
| 2.5-2 多级放大器电压放大倍数的计算 .....   | 124 |
| 2.5-3 频率特性 .....             | 126 |
| * § 2.6 场效应管原理与特性 .....      | 12  |
| 2.6-1 结型场效应管 .....           | 130 |
| 2.6-2 绝缘栅场效应管 .....          | 136 |
| 2.6-3 参数及使用注意事项 .....        | 142 |
| 2.6-4 场效应管放大电路 .....         | 148 |
| 小结 .....                     | 156 |
| 思考题 .....                    | 158 |
| 习题 .....                     | 162 |
| 第三章 负反馈放大器 .....             | 171 |
| § 3.1 反馈的基本概念 .....          | 171 |
| 3.1-1 什么是反馈 .....            | 171 |
| 3.1-2 负反馈放大器的基本类型 .....      | 173 |
| 3.1-3 负反馈放大器的基本关系 .....      | 180 |
| § 3.2 负反馈对放大器性能的影响 .....     | 184 |
| 3.2-1 提高增益的稳定性 .....         | 185 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 3.2-2 减小非线性失真 .....             | 186 |
| 3.2-3 扩展通频带 .....               | 188 |
| 3.2-4 改变放大器的输入电阻和输出电阻 .....     | 191 |
| § 3.3 负反馈放大器的分析方法 .....         | 197 |
| 3.3-1 深负反馈放大器增益的估算方法 .....      | 198 |
| 3.3-2 负反馈放大器的方框图分析法 .....       | 202 |
| § 3.4 射极输出器 .....               | 215 |
| § 3.5 负反馈放大器的选择 .....           | 220 |
| § 3.6 负反馈放大器的稳定性 .....          | 223 |
| 3.6-1 负反馈放大器的自激 .....           | 226 |
| 3.6-2 负反馈放大器稳定工作的条件 .....       | 226 |
| 3.6-3 相位校正措施 .....              | 229 |
| 3.6-4 放大器的低频自激及去耦电路 .....       | 231 |
| 小结 .....                        | 235 |
| 思考题 .....                       | 237 |
| 习题 .....                        | 239 |
| 第四章 功率放大器 .....                 | 247 |
| § 4.1 概述 .....                  | 248 |
| § 4.2 单管甲类功率放大器 .....           | 251 |
| § 4.3 变压器耦合乙类推挽功率放大器 .....      | 256 |
| 4.3-1 变压器耦合乙类推挽功率放大器工作原理 .....  | 257 |
| 4.3-2 乙类推挽功率放大器的图解分析 .....      | 259 |
| *4.3-3 变压器耦合乙类推挽功率放大器设计举例 ..... | 267 |
| § 4.4 无变压器耦合的功率放大器 .....        | 272 |
| 4.4-1 概述 .....                  | 272 |
| 4.4-2 互补对称式 OTL 电路 .....        | 275 |
| 4.4-3 准互补对称式 OTL 电路 .....       | 280 |
| 4.4-4 准互补对称式 OCL 电路 .....       | 283 |
| § 4.5 晶体管扩音机整机电路分析 .....        | 285 |
| 附: 扩音机与喇叭的配接 .....              | 294 |
| 小结 .....                        | 301 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 思考题 .....                      | 302 |
| 习题 .....                       | 303 |
| 第五章 直流放大器和集成运算放大器 .....        | 307 |
| § 5.1 直流放大器的特点 .....           | 307 |
| 5.1-1 级间耦合与电平配置 .....          | 308 |
| 5.1-2 零点漂移 .....               | 314 |
| § 5.2 差动放大器 .....              | 312 |
| 5.2-1 简单的差动放大器 .....           | 313 |
| 5.2-2 射极耦合差动放大器 .....          | 315 |
| § 5.3 差动放大器的改进 .....           | 329 |
| 5.3-1 采用恒流源的差动放大器 .....        | 329 |
| 5.3-2 具有共模负反馈的差动放大器 .....      | 333 |
| § 5.4 集成运放的基本单元电路和典型电路分析 ..... | 334 |
| 5.4-1 集成电路工艺简介 .....           | 334 |
| 5.4-2 集成运放的基本单元电路 .....        | 338 |
| 5.4-3 集成运放的典型电路和主要参数 .....     | 355 |
| § 5.5 集成运放的应用 .....            | 364 |
| 5.5-1 集成运放在放大方面的应用 .....       | 364 |
| 5.5-2 集成运放在信号运算方面的应用 .....     | 369 |
| 小结 .....                       | 374 |
| 思考题 .....                      | 376 |
| 习题 .....                       | 377 |
| 第六章 直流稳压电源 .....               | 384 |
| § 6.1 整流电路 .....               | 384 |
| 6.1-1 半波整流电路 .....             | 385 |
| 6.1-2 全波整流电路 .....             | 388 |
| 6.1-3 桥式整流电路 .....             | 391 |
| 6.1-4 倍压整流电路 .....             | 393 |
| § 6.2 滤波电路 .....               | 395 |
| 6.2-1 电容滤波电路 .....             | 395 |
| 6.2-2 电感滤波电路 .....             | 398 |

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 6.2-3 | LC 滤波电路            | 400 |
| 6.2-4 | $\pi$ 型滤波电路        | 400 |
| § 6.3 | 稳压电源               | 401 |
| 6.3-1 | 稳压管稳压电路            | 403 |
| 6.3-2 | 串联型晶体管稳压电路         | 409 |
| 6.3-3 | 集成化稳压电源            | 419 |
| 6.3-4 | 开关型稳压电路简介          | 424 |
| 小结    |                    | 427 |
| 思考题   |                    | 428 |
| 习题    |                    | 429 |
| 第七章   | 调谐放大器              | 434 |
| § 7.1 | 并联谐振回路             | 434 |
| 7.1-1 | 并联谐振回路的特性          | 434 |
| 7.1-2 | 信号源内阻和负载对并联谐振回路的影响 | 441 |
| § 7.2 | 晶体管简化 $Y$ 参数等效电路   | 444 |
| 7.2-1 | 混合 $\pi$ 型等效电路     | 445 |
| 7.2-2 | $Y$ 参数等效电路         | 446 |
| § 7.3 | 单调谐放大器             | 449 |
| § 7.4 | 调谐放大器的稳定性          | 456 |
| § 7.5 | 其它形式的调谐放大器         | 459 |
| 小结    |                    | 462 |
| 思考题   |                    | 463 |
| 习题    |                    | 464 |

# 第一章 半导体二极管和三极管

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特性有着密切的关系。半导体二极管和三极管是两种最基本、最常用的半导体器件，学习电子线路必须首先对其工作原理、特性予以了解和掌握。

本章在简介半导体的导电性质后，说明  $PN$  结的形成和单向导电性。在此基础上，介绍半导体二极管和三极管的结构、工作原理、特性及其主要参数。

## § 1.1 半导体基础知识

半导体是制造半导体二极管、三极管、场效应管、集成组件等半导体器件的材料，下面首先介绍半导体的基础知识。

### 1.1-1 导体、绝缘体和半导体

自然界的物质，按导电能力大体上分为导体、绝缘体和半导体三大类。导电能力良好的物质叫做导体，其电阻率在  $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot m$  范围内，如银、铜、铝、铁等金属；几乎没有导电能力的物质叫做绝缘体，其电阻率在  $10^{10} \sim 10^{20} \Omega \cdot m$  范围内，如塑料、陶瓷、橡皮、玻璃、云母等；导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫做半导体，其电阻率在  $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot m$  范围内，如硅、锗、硒、砷化镓及一些硫化物和氧化物等。

半导体之所以受到人们的重视，并不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间，而是由于导电能力具有随着温度、光照、或

掺入微量杂质而发生显著变化的特殊性质。

半导体的导电能力随温度变化比金属显著得多，例如纯硅，每当温度升高 $10^{\circ}\text{C}$ 时，电阻率下降 50% 左右，导电能力增大一倍，而铜的电阻率却仅增大 5% 左右，导电能力减小得很少。这表明半导体导电能力对温度是敏感的，利用这一特性可制作热敏电阻。半导体的导电能力对光照也是敏感的，用它可制作光敏电阻。如用半导体硫化镉制成的光敏电阻，无光照射和有光照射相比，电阻值变化可达上千倍。在纯净的半导体中掺入微量的杂质元素，不但导电能力会成百万倍增大，而且导电类型还随掺杂元素的种类不同而改变。如纯净的硅，在室温 ( $T = 300\text{ K} = 27^{\circ}\text{C}$ ) 下，电阻率是  $2.14 \times 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ ，掺入百万分之一的五族元素磷，电阻率就变到  $2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  左右，几乎下降了一百万倍。它的导电是电子型的。若把杂质换为三族的硼元素，则导电类型就成为空穴型。人们利用这一可贵的特性能够制成各种半导体器件。如半导体二极管、三极管、场效应管、集成组件等。

半导体为什么具有以上的导电性质呢？这就需要从它的内部结构来说明。

### 1.1-2 半导体的晶体结构

物质都是由原子组成的。物质的导电性质是由物质内部原子本身的结构和原子之间的结合方式决定的。硅 (Si) 和锗 (Ge) 是常用的半导体，它们的原子结构模型如图 1.1-1 所示。其共同的特点是最外层都有四个电子，通常称为价电子。价电子在原子最外层，受原子核的束缚力最小，其数目决定着物质的许多物理性质和化学性质。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很小，对于物质的物理、化学性质影响不大。为了讨论问题方便，常把原子核和内层电子看成一个整体，称为惯性核，于是硅和锗的原子结构模型就可简化为图 1.1-1 (c) 所

示的简化模型。

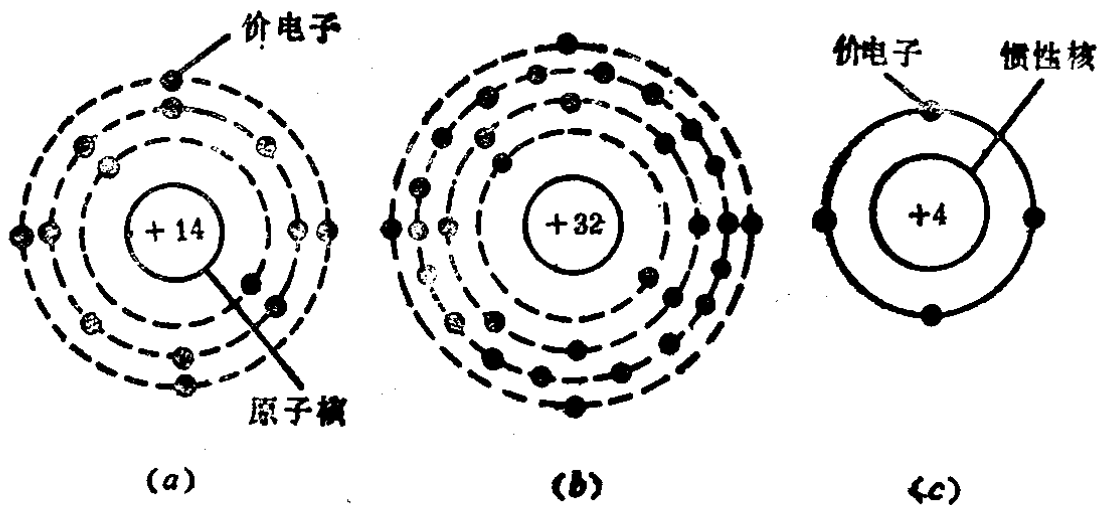


图 1.1-1 硅和锗的原子结构模型

(a) 硅原子模型 (b) 锗原子模型 (c) 硅、锗原子简化模型

把硅或锗制成单晶体以后,原子按四角形系统组成晶体点阵,每个原子都位于四面体中心,而四个其它原子处于四面体的顶点,如图 1.1-2 所示。

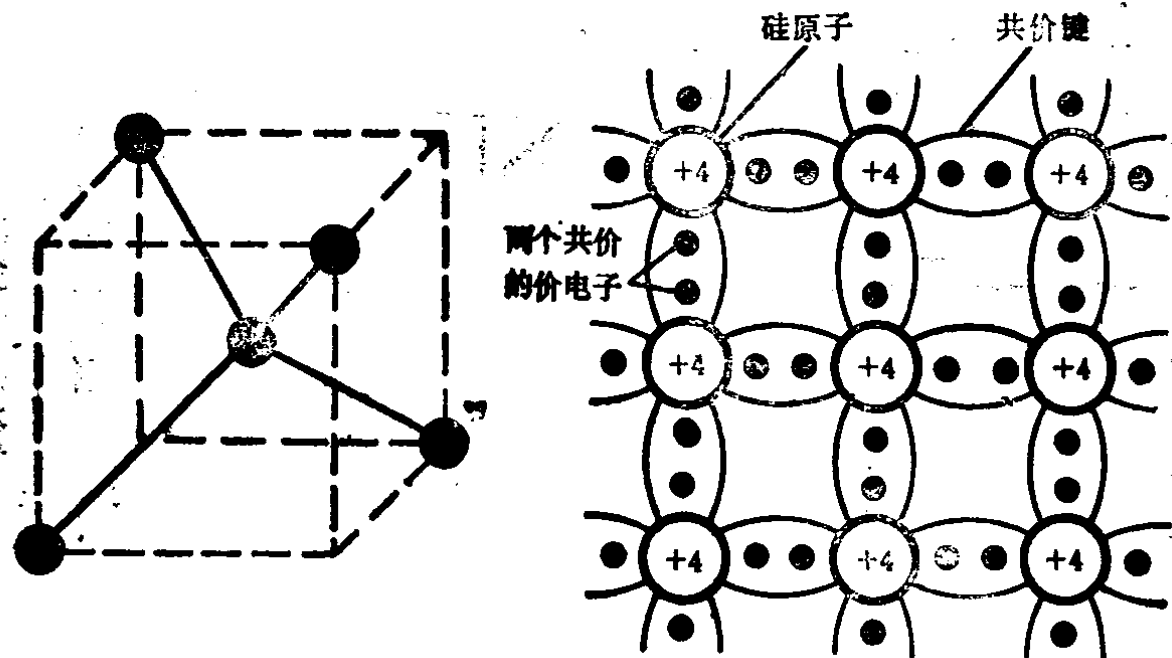


图 1.1-2 硅、锗的晶体结构

图 1.1-3 晶体的共价键结构

从硅或锗的晶体结构可知,晶体中每一个原子邻近都有四个距离相等的原子,由于相距很近(约  $2.35 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ ),所以它的四个价电子,不但受自身原子核引力的束缚,而且还受邻近的四