

师专物理专业试用教材

# 电子线路基础

(上册)

湖南省师专物理教材编写组编

河南科学技术出版社

# 电子线路基础

(上册)

湖南师专物理教材编写组编

责任编辑 马文翰

河南科学技术出版社出版发行

湖南邵阳资江印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 31印张600千字

1987年8月第1版 1987年8月第1次印刷

印数1—2000册

统一书号: 7245.91 定价: 3.85元

# 前 言

为促进师专物理专业的教学改革和教材建设,在我省各师专领导的关怀支持下,成立了湖南省师专物理教学协作会。统一编写了一套师专物理专业教材。

在教材编写时,我们主要依据湖南各师专物理教学的实际,各门课程的教学大纲和中学物理教学的需要。教材着重基本概念、基本原理的阐述和基本技能的培养。文字力求简明。并注意反映有关的物理学史资料 and 现代科学技术的成果。

在教材编写中,得到了省教委的关怀、省物理学会和湖南教育学院、湘潭师范学院、吉首大学等院校的支持。我们深表感谢。本书可作为师专物理专业、物理专科函授和物理师训班的试用教材,也可供中学物理教师参考。

本书分上、下两册,上册八章,下册四章,共十二章。第一章“半导体的基本知识”由零陵师专王敦惠编写;第二章“低频放大电路基础”的前七节由邵阳师专刘绍谅编写,第八节“场效应管及其放大电路”由岳阳师专姜天编写;第三章“反馈放大器”由常德师专金新桃编写;第四章“直流放大电路”由岳阳师专袁年保编写;第五章“低频功率放大电路”由邵阳师专钟秋生、怀化师专叶迟凡编写;第六章“直流稳压电源”由常德师专傅祖清编写;第七章“调谐放大电路”由怀化师专叶迟凡编写;第八章“自激正弦波振荡器”由娄底师专王纯编写;第九章“无线电广播及接收机”由郴州师专廖湘德编写;第十章“脉冲”由吉首大学杨复兴编写;第十一章“数字电路基础”由衡阳师专张法光编写;第十二章“电视”由益阳师专何寿康、刘光生编写;附录由岳阳师专姜天编写。全书由刘绍谅、叶迟凡、王纯、刘光生、何寿康、张法光等同志审稿;插图由刘绍谅、谭岳衡、刘光生、何寿康等同志绘制。

由于我们经验不足,水平不高,缺点错误一定不少,恳请读者批评指正。

湖南省师专物理教材编写组

一九八七年三月

# 《电子线路基础》上册目录

## 第一章 半导体的基本知识 (1)

|                       |                         |
|-----------------------|-------------------------|
| 1.1 半导体的导电性能 (1)      | 1.3.2 晶体二极管的伏安特性 (9)    |
| 1.1.1 什么是半导体 (1)      | 1.3.3 二极管的主要参数 (10)     |
| 1.1.2 本征半导体 (1)       | 1.3.4 交流等效电路 (12)       |
| 1.1.3 P型半导体和N型半导体 (3) | 1.3.5 实用二极管 (12)        |
| 1.2 PN结的导性 (4)        | 1.4 晶体三极管 (14)          |
| 1.2.1 PN结的形成 (4)      | 1.4.1 晶体三极管的基本结构 (14)   |
| 1.2.2 PN结的单向导电性 (5)   | 1.4.2 晶体三极管的电流分配关系 (14) |
| 1.2.3 PN结的伏安特性 (6)    | 1.4.3 晶体三极管的放大作用 (18)   |
| 1.2.4 PN结的击穿特性 (6)    | 1.4.4 晶体三极管的伏安特性 (17)   |
| 1.2.5 PN结的电容效应 (7)    | 1.4.5 (7)               |
| 1.3 晶体二极管 (9)         | 1.4.6 晶体三极管的主要参数 (14)   |
| 1.3.1 晶体二极管的结构 (9)    | 思考题与习题 (21)             |

## 第二章 低频放大电路基础 (22)

|                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| 2.1 放大电路的组成及工作原理 (22)        | 2.4.3 其它偏置电路 (45)                |
| 2.1.1 基本放大电路的组成 (22)         | 2.5 射极输出器和放大电路三种组态的比较 (46)       |
| 2.1.2 直流通路和静态工作点 (23)        | 2.5.1 射极输出器 (46)                 |
| 2.1.3 交流通路 (24)              | 2.5.2 放大电路三种基本组态的比较 (48)         |
| 2.1.4 放大过程 (25)              | 2.6 放大电路的频率特性 (50)               |
| 2.1.5 放大电路的部分性能指标 (26)       | 2.6.1 频率特性的一般概念 (50)             |
| 2.2 放大电路的图解分析法 (27)          | 2.6.2 中频段电压放大倍数 (52)             |
| 2.2.1 直流负载线和静态工作点 (28)       | 2.6.3 低频段电压放大倍数 (53)             |
| 2.2.2 交流负载线 (29)             | 2.6.4 高频段电压放大倍数 (54)             |
| 2.2.3 信号放大的图解法 (29)          | 2.6.5 完整的频率特性曲线                  |
| 2.2.4 静态工作点的选择 (31)          | 2.6.6 发射极电容对低频特性的影响              |
| 2.3 微变等效电路分析法 (33)           | 2.7 多级放大电路 (57)                  |
| 2.3.1 简化的等效电路 (33)           | 2.7.1 多级放大电路的耦合方式 (57)           |
| 2.3.2 $r_{be}$ 的计算公式 (35)    | 2.7.2 多级放大电路的电压放大倍数和输入、输出电阻 (58) |
| *2.3.3 $\beta$ 参数微变等效电路 (37) | *2.7.3 放大倍数的分贝表示法 (60)           |
| 2.3.4 微变等效电路的应用一例 (39)       | 2.7.4 多级放大电路的频率特性 (62)           |
| 2.4 放大电路的偏置电路 (41)           | 2.8 场效应管及其放大电路 (63)              |
| 2.4.1 温度对静态工作点的影响 (42)       |                                  |
| 2.4.2 分压式电流负反馈偏置电路 (42)      |                                  |

|       |                |      |       |          |      |
|-------|----------------|------|-------|----------|------|
| 2.8.1 | 结型场效应管 (JFET)  | (63) | 2.8.3 | 场效应管放大电路 | (72) |
| 2.8.2 | 绝缘栅场效应 (MOS) 管 | (65) |       | 练习题      | (76) |

### 第三章 反馈放大器 (81)

|       |                 |      |       |               |       |
|-------|-----------------|------|-------|---------------|-------|
| 3.1   | 反馈的基本概念         | (81) | 3.2.3 | 扩展通频带         | (95)  |
| 3.1.1 | 什么是反馈           | (81) | 3.2.4 | 减少非线性失真       | (97)  |
| 3.1.2 | 反馈放大电路的方框图      | (83) | 3.2.5 | 对输入电阻和输出电阻的影响 | (98)  |
| 3.1.3 | 负反馈的分类          | (84) | 3.3   | 深度负反馈放大器增益的估算 | (102) |
| 3.1.4 | 反馈放大器的四种基本类型    | (85) | *3.4  | 反馈放大器的方框图计算法  | (105) |
| 3.2   | 负反馈对放大电路工作性能的影响 |      | 3.4.1 | 方框图法的基本步骤     | (106) |
| 3.2.1 | 负反馈对增益的影响       | (92) | 3.4.2 | 射极输出器         | (108) |
| 3.2.2 | 提高增益的稳定性        | (94) |       | 练习题           | (110) |

### 第四章 直流放大电路 (112)

|       |             |       |       |              |       |
|-------|-------------|-------|-------|--------------|-------|
| 4.1   | 直接耦合放大电路    | (112) | 4.3.5 | 内部电路介绍       | (128) |
| 4.1.1 | 几种直接耦合方式    | (112) | 4.4   | 运算放大器的运用     | (133) |
| 4.1.2 | 零点漂移        | (113) | 4.4.1 | 比例器          | (133) |
| 4.2   | 差动放大电路      | (114) | 4.4.2 | 加法器          | (133) |
| 4.2.1 | 典型差动放大电路    | (115) | 4.4.3 | 减法器          | (134) |
| 4.2.2 | 差动放大电路性能的改进 | (120) | 4.4.4 | 微分器          | (134) |
| 4.2.3 | 几种常用接法      | (122) | 4.4.5 | 积分器          | (135) |
| 4.3   | 集成运算放大器     | (124) | 4.4.6 | 集成运算放大器应用举例  | (135) |
| 4.3.1 | 基本特性        | (124) | 4.4.7 | 集成运放使用中的一些问题 | (137) |
| 4.3.2 | 反相运算放大器     | (125) |       | 附: 集成技术简介    | (139) |
| 4.3.3 | 同相运算放大器     | (126) |       | 习题           | (141) |
| 4.3.4 | 主妥参数        | (126) |       |              |       |

### 第五章 低频功率放大电路 (144)

|       |             |       |       |                |       |
|-------|-------------|-------|-------|----------------|-------|
| 5.1   | 低频功率放大的特点   | (144) | 5.4.2 | 互补对称实际电路       | (157) |
| 5.2   | 单管甲类功率放大电路  | (147) | 5.4.3 | OCL 复合互补对称实际电路 | (162) |
| 5.3   | 变压器推挽功率放大电路 | (151) | 5.4.4 | 集成音频功率放大器实例分   |       |
| 5.4   | 互补对称功率放大电路  | (153) |       | 析              | (163) |
| 5.4.1 | 互补对称原理电路    | (153) |       | 习题与思考题         | (165) |

### 第六章 直流稳压电源 (167)

|       |        |       |       |             |       |
|-------|--------|-------|-------|-------------|-------|
| 6.1   | 整流电路   | (167) | 6.2.1 | 电容滤波电路      | (172) |
| 6.1.1 | 半波整流电路 | (167) | 6.2.2 | 电感滤波电路      | (175) |
| 6.1.2 | 全波整流电路 | (169) | 6.2.3 | $\pi$ 型滤波电路 | (176) |
| 6.1.3 | 桥式整流电路 | (171) | 6.3   | 简单稳压电路      | (177) |
| 6.1.4 | 倍压整流电路 | (172) | 6.3.1 | 稳压电源的质量指标   | (178) |
| 6.2   | 滤波电路   | (172) | 6.3.2 | 稳压管的特性      | (178) |

|                     |       |                        |                |
|---------------------|-------|------------------------|----------------|
| 6.3.3 稳压原理          | (179) | 6.4.1 典型电路结构和稳压原理      | (181)          |
| 6.3.4 电路元件的选择       | (179) | 6.4.2 稳压电路性能的改进        | (183)          |
| 6.3.5 硅稳压管稳压电路的质量指标 | (180) | 6.4.3 实际稳压电路<br>思考题与习题 | (185)<br>(191) |

|                |       |
|----------------|-------|
| 6.4 串联型晶体管稳压电路 | (181) |
|----------------|-------|

## 第七章 调谐放大电路 (193)

|                                   |       |                                     |       |
|-----------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|
| 7.1 调谐放大电路的特点                     | (193) | 7.3.2 单向化的Y参数等效电路                   | (201) |
| 7.2 LC并联谐振回路                      | (194) | 7.4 单调谐放大电路                         | (202) |
| 7.2.1 并联回路阻抗的频率特性                 | (194) | 7.4.1 单调谐放大电路的单向化混<br>合 $\pi$ 型等效电路 | (202) |
| 7.2.2 并联回路端电压的频率特性                | (195) | 7.4.2 部分接入式调谐回路的作用                  | (203) |
| 7.2.3 回路通频带                       | (196) | 7.4.3 单调谐放大电路的性能计算                  | (204) |
| 7.2.4 选择性                         | (197) | 7.4.4 多级单调谐放大电路                     | (209) |
| 7.2.5 信号源内阻和负载电阻对并<br>联谐振回路的影响    | (198) | *7.5 双调谐放大电路                        | (212) |
| 7.3 晶体管的高频等效电路                    | (199) | 附 声表面波滤波器(SAWF)<br>介绍               | (215) |
| 7.3.1 混合 $\pi$ 型等效电路的形式和<br>参数的意义 | (199) | 思考题与习题                              | (217) |

## 第八章 自激正弦波振荡器 (219)

|                         |       |                             |                |
|-------------------------|-------|-----------------------------|----------------|
| 8.1 自激振荡原理与条件           | (219) | 8.3.4 频率稳定度及改进型电容三<br>点式振荡器 | (231)          |
| 8.1.1 自激振荡的原理           | (219) | 8.3.5 集成运放LC三点式振荡器          | (234)          |
| 8.1.2 自激振荡的自激条件         | (220) | 8.3.6 LC振荡器起振的简易判别<br>方法    | (235)          |
| 8.1.3 自激振荡的建立和振幅的稳定     | (221) | *8.4 石英晶体振荡器                | (236)          |
| 8.2 互感耦合LC振荡器           | (224) | 8.4.1 石英谐振器                 | (236)          |
| 8.2.1 常见的互感耦合LC振荡器      | (224) | 8.4.2 石英晶体振荡器               | (238)          |
| 8.2.2 共射调集式振荡器          | (225) | 8.5 RC振荡器                   | (240)          |
| 8.2.3 互感耦合振荡器的特点及实<br>例 | (226) | 8.5.1 概述                    | (240)          |
| 8.3 三点式LC振荡器            | (227) | 8.5.2 RC桥式振荡器               | (241)          |
| 8.3.1 电感三点式振荡器          | (227) | 8.5.3 RC移相式振荡器<br>习题        | (247)<br>(248) |
| 8.3.2 电容三点式振荡器          | (229) |                             |                |
| 8.3.3 三点式振荡器的组成原则       | (230) |                             |                |

## 附录 常用晶体管主要参数 (253)

|                  |       |                                       |       |
|------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| 表1 检波二极管和整流二极管参数 | (253) | 表6 DD01、DD02、3DD15硅NPN<br>高反压大功率三极管参数 | (257) |
| 表2 稳压二极管参数       | (253) | 表7场效应管三种基本放大电路的比较                     | (257) |
| 表3 3A×31低频小功率管参数 | (254) | 表8 MQS场效应管主要参数                        | (258) |
| 表4 3DG6高频小功率管参数  | (255) | 表9各种场效应管的特性比较                         | (封三)  |
| 表5 3DG12高频小功率管参数 | (256) |                                       |       |

# 第一章 半导体的基本知识

## 1.1 半导体的导电性能

### 1.1.1 什么是半导体

铜、银、铝等金属材料是很容易导电的，称之为导体；陶瓷、塑料、橡胶、玻璃等很不容易导电，这类材料称为绝缘体。导体的导电性能良好，电阻率很低，在 $10^{-6}$ — $10^{-4}$ 欧·厘米的范围之内，绝缘体的导电能力很差，电阻率很高，在 $10^{10}$ — $10^{20}$ 欧·厘米的范围之内。

自然除了导体和绝缘体外，还存在一类物质，其导电性能介于导体和绝缘体之间，它既不象导体那样容易导电，也不象绝缘体那样很难导电，这类物质称为半导体。半导体的电阻率介于导体和绝缘体之间，其值为 $10^{-3}$ — $10^{10}$ 欧·厘米。

半导体之所以引起人们特大的兴趣，得到广泛的应用，不是由于其电阻率在数值上与导体和绝缘体的差别，而在于它的电阻率在各种因素（掺杂、光照等）作用下有非常大的差别。第一，半导体的电阻率随温度上升而迅速下降，而金属的电阻率随温度升高而略有增加。例如铜，温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，电阻率增加0.4%；而纯锗温度从 $20^{\circ}\text{C}$ 升到 $32^{\circ}\text{C}$ ，电阻率下降一半。第二，掺杂影响显著。在金属导体中如果掺入很少杂质，其电阻率增加，但变化不大。半导体却不同，在纯净的半导体中掺入微量的适当杂质能使电阻率显著降低。例如在一块纯锗中加入百分之一的硼，锗的电阻率从47欧·厘米下降到1欧·厘米左右。不仅如此，选择不同类型的杂质，还可以改变半导体的导电类型，形成P型、N型两种导电类型，利用半导体掺杂后的这种独特性质，能够制造出各种不同用途的半导体器件。另外，用光照射半导体时，半导体的导电能力也显著增加，光照度愈强，半导体的导电能力愈大。人们利用半导体的这种特性，可以制成供自动控制用的热敏元件和光敏元件（如热敏电阻、光敏电阻和光电管等）。

### 1.1.2 本征半导体

非常纯净且原子排列整齐的半导体称为本征半导体。半导体为什么会具有以上特点，这就需要从它的内部导电机构来说明，先从最简单的本征半导体讨论起。

原子构成物质时，各原子间是以一定的作用互相结合起来的。纯锗纯硅等等本征半导体材料的原子排列很整齐、规则。它们的晶格平面结构如图1.1.1所示，每个锗或硅原子最外层的四个电子叫做价电子。每个原子各拿出一个价电子和它相邻的一个原子共有，也就是每两个

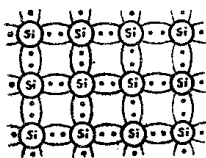


图1.1.1 硅单晶共价键结构

相邻原子之间共有一对价电子。这对价电子既受本身原子核的吸引，又受相邻原子核的吸引，从而将这两个原子紧紧地束缚在一起，形成共价键结构。这种共有价电子的束缚作用叫做共价键。锗和硅都是四价元素，最外层四个价电子正好和四个相邻原子的价电子组成四对共有电子对，即构成四个共价键。共价键中的电子处于束缚状态，被束缚在这两个原子附近，不能自由移动，不是自由电子。对于每个原子来说，都是呈电中性的。所以从整块半导体来看是由大量中性原子所构成的，所带正负电荷数目相同，呈电中性。

在一定温度下晶体中的原子不断在自己平衡位置附近作热运动。温度越高，这种热运动就越剧烈。所以本征锗、硅晶体中的价电子一方面处于共价键的束缚中，另一方面又同时从原子的热运动中获得能量。当价电子从原子的热运动中获得足够的能量时，便从束缚状态激发到自由状态，成为自由电子，如图1.1.2所示。这种由于热运动使本征半导体的价电子脱离共价键而成为自由电子的过程叫做热激发或本征激发。本征激发与温度有关，在一定的温度下，就有一定数量的价电子被激发成为自由电子。

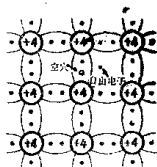


图1.1.2

热激发产生的电子-空穴对

在本征激发过程中，硅晶体某个共价键上的电子激发成自由电子后，在原来的共价键中就留下了一个空位，这个空位就叫空穴。空穴的出现，使原来是电中性的硅原子成为一个带正电的正离子。因此可以认为这个正电荷为空穴所具有，这样在本征激发下硅晶体同时形成了自由电子-空穴对。若电子重新落入空穴，则电子-空穴对便消失。这种现象称为复合。在本征激发中，电子和空穴的浓度是相等的。

由于空穴带正电荷，相邻共价键中的价电子有可能填补这个空穴，这个空穴便消失，与此同时，却在相邻共价键中出现了一个新的空穴，这个新的空穴还会被新的共价键中的电子所填补，这种价电子接连不断地填补空穴的运动，相当于一个空穴从一处移到另一处，这种空穴的迁移运动和自由电子在键外的自由运动相似，使空穴成为能在半导体中自由运动的一种带电粒子。因此，本征硅中（锗也一样）由于本征激发，同时存在自由电子和空穴两种异号电荷的带电粒子。在外电场的作用下，自由电子逆电场方向作定向漂移运动形成电流 $I_n$ ；空穴顺电场方向作定向漂移运动形成电流 $I_p$ 。由于它们所带电荷异号，总电流为电子电流 $I_n$ 与空穴电流 $I_p$ 之和，即 $I = I_n + I_p$ 。自由电子和空穴都能运载电荷，统称为载流子。在外电场的作用下，载流子的运动叫做漂移运动，所形成的电流叫做漂移电流。由于在常温下本征半导体中电子-空穴对很少，因此本征半导体的导电能力很差。但它对温度非常敏感，随着环境温度的升高，由热激发产生的电子-空穴对的数目按指数规律增加，这将使半导体器件的性能不稳，造成一个十分严重的问题。

值得注意的是，在本征半导体中，本征激发和复合是同时存在的。本征激发使电子和空穴成对产生，复合则使电子和空穴成对消失。在一定温度下，激发和复合达到一定的动态平衡。此时，虽然激发和复合仍在不断进行，但激发多少便复合多少，使电子-空穴对维持在一定数目上，这样一种状态叫做热平衡。当环境温度升高时，热激发能量增加，激发超过了复合，破坏了原来的平衡，随着电子-空穴对的增多，它们相遇而复合的机会也增大，即复



合也增多，在一个新的条件下激发与复合达到了新的平衡。

### 1.1.3 P型半导体和N型半导体

本征半导体的导电能力很差，实际上用处不大。但如果在本征半导体中有选择性掺进微量的某种元素，即加入少许在化学成分上不同的物质，可以使半导体的导电率显著改变。随着掺杂元素的不同，杂质半导体分为N型（电子型）半导体和P型（空穴型）半导体。

#### 1、P型半导体

若在本征半导体硅中，掺入微量的三价元素，如（硼B）、铝（Al）或镓（Ga）等，掺入的杂质原子与硅原子组成共价键结构，如图1.1.3所示。由于硼是三价元素，即外层只有三个电子，当它与相邻四个硅原子组成共价键时，其中一个键上缺少一个电子，就可能形成一个空穴，这样，硼杂质的每一个原子都可能提供一个空穴，从而使掺硼晶体中空穴的数目大为增加，这种杂质半导体主要靠空穴导电，所以叫做空穴型半导体，简称P型半导体。同样，在P型半导体中，也有由于本征激发而产生的电子—空穴对，存在着电子载流子，但数量极少。因此，在P型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。硼原子提供了空穴，它可以接受一个电子，所以硼原子又称受主原子或受主杂质。

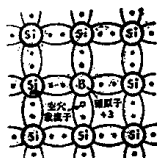


图1.1.3

硅中掺硼形成P型半导体

#### 2、N型半导体

如果在本征半导体中，掺入微量的五价元素，如磷（P）、砷（As）或锑（Sb）等，那么，一个磷原子与相邻四个原子组成共价键后，还多余一个价电子，如图1.1.4所示，这个电子受原子核的束缚很小，很容易成为自由电子，这样，硅晶体掺磷的结果，就会增加大量的自由电子，这种半导体中电子的数目很多，主要靠电子导电，叫做电子型半导体，简称N型半导体。磷原子贡出了一个自由电子，故称施主原子或施主杂质。在N型半导体中同样也具有本征激发产生的电子—空穴对，但空穴是少数载流子，而电子是多数载流子。

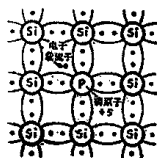


图1.1.4

硅中掺磷形成N型半导体

在半导体器件生产实践中，经常给半导体既掺三价元素又掺五价元素。例如在N型半导体中，掺进浓度较大的受主杂质，则空穴与原来N型半导体中的电子复合，使空穴占多数，原N型半导体转化为P型半导体。如果再次掺入浓度更高的N型杂质，则电子再度占多数，P型又转为N型，这叫杂质的补偿作用。

## 1.2 PN结的特性

如果把P型半导体和N型半导体通过一定的工艺制造在一起，在它们的接触面上就形成了PN结，PN结具有特殊的导电性能，它不仅和导体、绝缘体不同，而且和单块的P型半导体或N型半导体也截然不同，它是半导体器件中最基本的结构之一。

### 1.2.1 PN结的形成

所谓PN结就是P型和N型半导体接触介面所形成的一个特殊薄层。在薄层的两边，一边是P区，另一边是N区。在P区里有大量的空穴，在N区里只有本征激发所产生的少量的空穴。同样，在N区里有大量的电子，在P区里只有少量的电子。这样便在P区到N区中存在着载流子的浓度梯度，载流子就从浓度大的地方向浓度小的地方扩散。在扩散时，首先是靠近界面附近P区的空穴进入N区，与N区的多数载流子电子复合，结果在交界面的P区一侧的空穴减少，出现一层不能移动的带负电的受主杂质离子区。同样，靠近交界面的N区一侧的电子进入P区，与P区的多数载流子空穴复合，结果在交界面的N区一侧的电子减少，出现了一层不能移动的带正电的施主杂质离子区。于是界面两侧形成了一个空间电荷区，即所谓PN结。如图1.2.1所示，这个区域不再是电中性的，在P区一侧带负电，在N

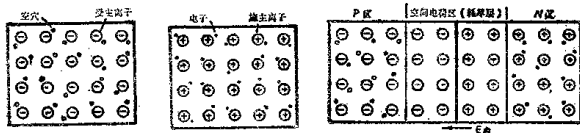


图1.2.1 电子与空穴的扩散和PN结的形成

区一侧带正电。随着这两个带异号电荷层的形成，在空间电荷区内形成了一个由正电荷层指向负电荷层的很强的电场，叫做内电场。在空间电荷区外仍呈中性，不存在电场。

显然，内电场的存在对空穴和电子的扩散运动是起阻碍作用的，相反，内电场的作用会使空穴和电子朝扩散的相反方向运动。内电场的这种作用叫做漂移作用。这说明：由于载流子浓度差异而形成的扩散作用与由空间电荷区所形成的漂移作用是互相对立的，使得空穴和电子不能在整块半导体内的浓度达到均匀分布。

扩散刚开始时，扩散大于漂移，扩散源源不断地进行，随着扩散的进行，空间电荷区逐渐加宽，漂移作用逐渐增强，扩散运动就逐渐减弱，当空间电荷区大到一定宽度使得扩散作用和漂移作用相等时，扩散与漂移就达到了动态平衡。这时，空间电荷区不再增宽其宽度约为几微米——几十微米。内电场也就不再增强了，P区和N区的接触界面处于平衡状态。

空间电荷区又称阻挡层，意思是阻挡载流子的扩散运动。在阻挡层中既然存在内电场，

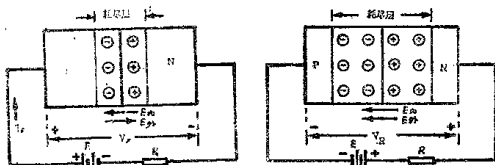
于是阻挡层两侧就存在电势差,叫做接触电势差。接触电势差的大小不仅取决于两种半导体的掺杂情况,而且与温度有关。

### 1.2.2 PN结的单向导电性

当给一个PN结的两端加上一个直流电压时,PN结将按外加电压的极性和大小的不同,而呈现出不同的导电特性。

#### 1、PN结加正向电压(称为正向偏置)

如果在PN结两端加一个正向电压 $V_F$ ,即:将电源的正极接P区,负极接N区,如图1.2.2(a)所示。这时外加电压就会在PN结上产生一个外加电场 $E_F$ , $E_F$ 方向与



(a) 正向偏置

(b) 反向偏置

图 1.2.2 PN结的单向导电性

结的内电场 $E_n$ 方向相反,起抵消内电场 $E_n$ 的作用,因而 $E_n$ 被削弱、扩散运动容易进行,形成了较大的正向电流 $I_F$ 。这时,外部电源不断地向半导体补充空穴和电子,使电流得以维持。概括地说:PN结加正向电压的结果,外电场与内电场的方向相反,使结内电场减弱,空间电荷区变窄,PN结的电阻减少,扩散运动加剧,形成较大的正向电流。

#### 2、PN结加反向电压(称为反向偏置)

如果在PN结两端加上反向电压 $V_R$ ,即:将电源的正极接N区,负极接P区,这时外加电压在PN结上形成的外加电场 $E_F$ 的方向与结内电场 $E_n$ 的方向相同, $E_n$ 被加强,阻挡层变厚,载流子的扩散运动几乎全被阻止,外电路几乎没有电流通过,如图1.2.2(b)所示,这时的PN结相当于一个阻值很大的电阻,称为反向直流电阻。

应当指出:当PN结加上反向电压时,外电路中并不是绝对地没有电流通过,这时由于热运动产生的少数载流子还会在外加电场 $E_F$ 的作用下漂移过PN结,而形成很小的反向电流 $I_R$ (一般在微安级)。

PN结加反向电压时,通过PN结的主要是漂移电流,由于在一定温度时,半导体中的少数载流子的浓度也一定,因而反向电流 $I_R$ 在一定范围内将不随外加电压而变化。因而又将它叫做反向饱和电流。

### 1.2.3 PN结的伏安特性

在PN结的两端，加上正向电压或反向电压后，通过管子的电流随管子两端电压变化的情况，如图1.2.3所示，曲线OA代表管子正向偏置时的特性，而曲线OB则代表管子在反向偏置时的伏安特性。

根据理论分析，PN结的理想伏安特性，可由下式表示：

$$I = I_S (e^{\frac{V}{V_T}} - 1) = I_S (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \dots\dots (1.1.1)$$

其中：I——PN结的电流（安）

$I_S$ ——反向饱和电流（安）

e——自然对数的底

V——外加电压（伏）

$V_T$ ——温度的电压当量  $= \frac{kT}{q}$ ，q是电子的电荷量，T是绝对温度，

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  焦耳/K，称为玻耳兹曼常量。

当温度为TK时，电子的平均动能与kT值成比例，把kT值换算为电子伏特单位，由于  $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$  焦耳，所以  $k = 0.86 \times 10^{-4} \text{eV/K}$ 。在常温下，例如  $T = 300\text{K}$ ，有

$$kT = 0.86 \times 10^{-4} \times 300 = 0.026 \text{eV}$$

$$kT/q = 0.026 (\text{eV}) / q = 0.026 \text{V} = 26 \text{mV}$$

式(1.1.1)说明：

1)、当管子加正向电压时，电压V为正，当V较 $V_T$ 大几倍时，式(1.1.1)中的  $e^{V/V_T}$  远较1为大，故1可略去，这样，管子电流依电压成指数关系，如图1.2.3中的OA段。

2)、当管子加上反向电压时，电压V为负值。当|V|比 $V_T$ 大几倍时，指数项很快接近于零，故  $I = -I_S$ ，如图1.2.3的曲线OB段所示，由此可知，反向饱和电流是个常数，不依外加反向电压变动。

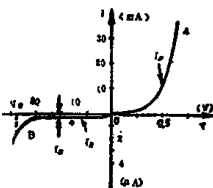


图1.2.3 PN结的理想伏安特性

### 1.2.4 PN结的击穿特性

由图1.2.3可以看到，当加在PN结的反向电压不大时，反向电流很小，但是，如果所加反向电压达到某一数值，例如达到 $V_B$ 时，反向电流急剧增长，这种现象叫PN结的击穿， $V_B$ 称为击穿电压，击穿有齐纳击穿和雪崩击穿两种。

#### 1、齐纳击穿

当反向电压增大到一定程度时，空间电荷区就会建立一个很强的电场。这个强电场能把价电子从共价键中拉出来，从而在空间电荷区产生大量电子——空穴对。这些电子——空穴

对产生后，空穴被强电场驱到P区，电子被强电场驱到N区，使反向电流猛增。这样由于强电场的作用，直接产生大量电子——空穴对而使反向电流剧增的现象叫齐纳击穿。

齐纳击穿常发生在掺杂浓度比较高的PN结中，因为此时空间电荷层比较薄，一个很小的反向电压就可以在空间电荷区建立一个很强的电场。

当温度升高时，电子热运动加剧，较小的反向电压就能把价电子从共价键中拉出来，所以温度上升时，击穿电压下降。也就是说，齐纳击穿具有负的温度系数。

## 2、雪崩击穿

雪崩击穿是由于少数载流子在空间电荷区内和半导体原子的碰撞而产生的。

当反向电压足够高时，结内电场足够强，结内载流子受强烈电场的加速作用，获得了很大的能量，它碰撞其它原子时，有可能打击出新的电子——空穴对，这些新的载流子在强电场的作用下碰撞别的原子，产生更多的载流子，如此链锁反应，使反向电流迅速增大，这种现象，称为雪崩击穿。

与齐纳击穿相反，雪崩击穿具有正的温度系数，即温度升高时，所需击穿电压也要增大，因为温度升高时，原子无规则热运动剧增，使电子定向运动更困难，必须加大反向电压，才能使少数载流子具有碰撞电离所需要的能量。

根据PN结的制造工艺不同和掺杂浓度不同，击穿电压差别很大，小的只有1伏左右，大的可达千伏以上，一般说来，击穿电压在5伏以下多为齐纳击穿，在7伏以上多为雪崩击穿。在5—7伏之间，常常两种击穿兼而有之。

### 1·2·5 PN结的电容效应

半导体器件工作在交流状态时，其性能随工作频率的升高而变坏，甚至完全丧失正常工作的能力。分析表明，限制器件频率特性的主要因素之一就是PN结的电容效应。PN结电容包含势垒电容和扩散电容两个方面。

#### 1、势垒电容 $C_T$

势垒电容所反映的是势垒宽度随外加电压的变化而变化，这种变化所形成的电容效应就电叫作势垒电容。

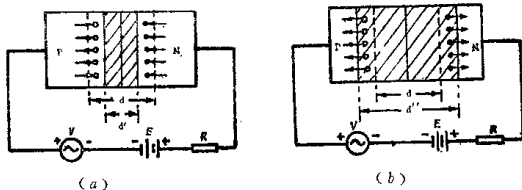


图 1·2·4 势垒宽度随外加电压的变化而变化

如图 1·2·4 (a) 所示, 当外加交流电压  $V$  为正半周时, 势垒区中电场减少, 使更多一些 P 区的空穴和 N 区的电子进入势垒区, 中和了一部分势垒区两侧带正电荷的施主离子和带负电荷的受主离子, 使势垒区变窄, 由  $d$  变到  $d'$ , 这相当于把一部分电子和空穴“存入”势垒区中, 等效于电容器充电。当外加交流电压  $V$  为负半周时, 如图 1·2·4 (a) 所示, 势垒区变宽, 由  $d$  到  $d''$ , 这相当于有一部分空穴和电子从势垒区“取出”, 这等效于电容器放电。这种由于外加电压的变化引起势垒区载流子“存入”和“取出”的现象, 同一个电容器充电和放电的效果是完全相同的, 也就是势垒区宽窄的变化体现了正负电荷对势垒区的放电和充电。理论分析指出: PN 结的接触面积愈大, 空间电荷区的宽度愈窄, 势垒电容也愈大。

由于空间电荷区的宽度随外加电压大小而变化, 外加正向电压时, 空间电荷区变窄, 势垒电容增大; 外加反向电压时, 空间电荷区变宽, 势垒电容减小。

## 2、扩散电容 $C_D$

扩散电容与势垒电容不同, 扩散电容是由于多数载流子的扩散运动而引起的电容效应, 由于多数载流子的扩散运动是发生在 PN 结外加正向电压时, 因而  $C_D$  存在于 PN 结正向导电的情况下, 而 PN 结外加反向电压时, 可以忽略。上面已指出, 当 PN 结外加正向电压时, 由

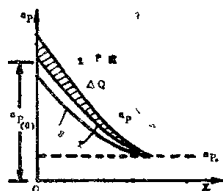


图 1·2·5 正向电压变化时,  
P 区中少数载流子浓度的变化

N 区扩散到 P 区的多数载流子 (电子) 并不是一进入 P 区就立即全部被空穴复合掉, 而是在向 P 区纵深的扩散中逐渐与空穴复合。这样, 电子在 P 区的浓度分布就是不均匀的, 靠近阻挡层处的电子浓度大, 而距阻挡层越远浓度越小。同理, 由 P 区扩散到 N 区的空穴, 其浓度的分布也是非均匀的。当外加电压变化时, 电子或空穴的密度分布也跟着变化, 形成了载流子的充放电效应, 称为扩散电容。

经理论推导, 扩散电容  $C_D$  和通过 PN 结的电流成正比。因此, PN 结正向导通时,  $C_D$  的数值很大, 可达  $0.01 \mu f$ , 而 PN 结工作在反向时,  $C_D$  可以忽略。

## 1.3 晶体二极管

### 1.3.1 晶体二极管的结构

晶体二极管按其结构的不同可分为点接触型和面接触型两类。

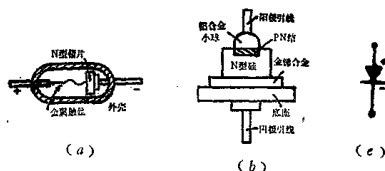


图 1.3.1 晶体二极管的结构及符号

点接触型二极管是由一根很细的金属触丝和一块半导体（如锗）的表面接触，然后在正方向通过很大的瞬时电流，使触丝和半导体牢固地焊接在一起，构成PN结，并做出相应的电极引线，外加管壳密封面。如图1.3.1(a)所示。由于点接触二极管金属丝很细，形成的PN结面积很小，所以极间电容很小，但它因此不能承受高的反向电压和大电流。这种类型的管子适于做高频检波和脉冲数学电路里的开关元件，也可用来作小电流整流，如2AP1是点接触型锗二极管，最大整流电流是16mA，最高工作频率是150MHz。

面接触型或称面结型二极管的PN结是用合金法或扩散法做成的，其结构如图1.3.1(b)所示。由于面接触型二极管的PN结面积大，可承受较大的电流，但极间电容也大，这种类型的管子适用于整流，而不宜于高频电路中，如2CP1是面接触型硅二极管，最大整流电流是400mA，最高工作频率只有3KHz。

### 1.3.2 晶体二极管的伏安特性

测试二极管的伏安特性曲线的实验电路如图1.3.2所示，改变可变电源的输出，从伏特表和毫安表读出二极管两端的电压和通过二极管的电流。每改变一次电源电压即可读出一组电压、电流值，把若干组电压、电流值绘制成曲线，便得到晶体二极管的特性曲线（测试二极管正反向特性曲线时可利用双向双掷开关），这种测试曲线的方法称为逐点法。另外一种测试方法是用品体管特性曲线图示仪，如国产仪器JT-1型晶体管特性图示仪可直接将二极管的特性曲线显示在示波管的荧光屏上。

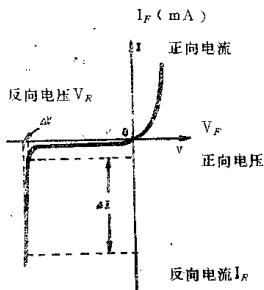
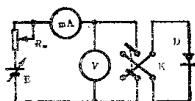


图 1·3·2 测试二极管伏安特性曲线电路图 图 1·3·3 二极管伏安特性曲线

图 1·3·3 是晶体二极管的伏安特性曲线，由图可以看出，二极管的伏安特性曲线是非线性的。下面加以说明：

1、正向特性当外加电压为零时，PN 结处于动态平衡状态，没有电流通过 PN 结，所以曲线通过原点。

当外加电压从零逐渐扩大时，由于外电场削弱了阻挡层中内电场而有利于载流子的扩散运动，形成了扩散电流。在曲线起始部分 OA 段，电流随电压增长是缓慢的。因为这时正向电压还不够大，阻挡层的阻碍作用仍很强，二极管呈现出一个很大的电阻，好象有一个“门坎”。硅管的“门坎电压”（又称死区电压）约为 0.5 伏，锗管的门坎电压约为 0.1 伏，门坎电压通常以  $V_F$  表示。当正向电压大于门坎电压时，内电场被大大削弱，电流随电压迅速上升如 AB 段，增长很快。

2、反向特性当二极管加反向电压时，加强了阻挡层中的内电场对扩散运动的阻力、有利于漂移电流通过，在 OC 段、反向电压很小、漂移电流随反向电压增加而增加，但到 CD 段，反向电流却几乎不随反向电压变化，因为这时反向电压已使全部少数载流子参与了导电，反向电流已达到饱和状态。当反向电压增大到 D 点时，反向电流突然猛增，PN 结击穿。

### 1·3·3 二极管的主要参数

1、最大整流电流  $I_F$  是指管子长期运行时，允许通过的最大正向平均电流。因为电流通过 PN 结要引起管子发热，电流太大，发热量超过限度，就会使 PN 结烧坏。

2、反向击穿电压  $V_B$  指管子反向击穿时的电压值。击穿时，反向电流剧增，二极管的单向导电性被破坏，甚至因过热而烧坏。一般手册上给出的最高反向工作电压约为击穿电压的一半，以确保管子安全运行。

3、反向电流  $I_R$  指管子未击穿时反向电流的大小，其值愈小，则管子的单向导电性好。由于温度增加，反向电流会急剧增长，所以在使用二极管时要注意温度的影响。



二极管的参数是正确使用二极管的依据，一般半导体器件手册中都给出不同型号管子的参数。在使用时，应特别注意不要超过最大整流电流和最高反向工作电压，否则管子容易损坏。

4、直流电阻 $R_D$ 加于二极管两端的电压与流过二极管的电流之比，称为二极管的直流电阻。

如果加于二极管两端的电压是曲线上Q点的正向电压 $V_F$ ，则流过的电流是正向电流 $I_F$ ，从图1·3·4可见，Q点 $R_D$ 的大小等于直线OQ斜率的倒数，即：

$$R_D = \frac{V_F}{I_F} = \frac{1}{\tan \alpha} \quad (1.3.1)$$

同理，对于反向情况也一样。

由图1·3·4还可以看出， $I_F$ 愈大，直线OQ的斜率愈大， $R_D$ 愈小。 $R_D$ 随工作电流的增大而减小。平时用万用电表量出的二极管电阻，就是直流电阻 $R_D$ 。

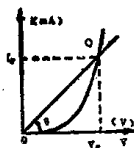


图1·3·4 直流电阻的意义

5、交流电阻 $r_D$ 二极管在工作点Q附近电压的微变值 $\Delta V$ 与相应的电流微变值 $\Delta I$ 之比，称为该点的交流电阻 $r_D$ 。

从几何意义上说， $r_D$ 的大小等于曲线上Q点切线斜率的倒数，从图1·3·5不难看出：

$$r_D = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{\tan \alpha} \quad (1.3.2)$$

显然，由于二极管电流电压的非线性关系，曲线上各点的斜率均不同，这说明了 $r_D$ 并非常数，而与工作点Q的位置有关。从二极管正向特性曲线的形状来看， $r_D$ 随工作电流增大而减小。

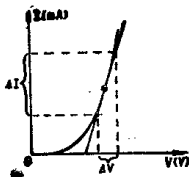


图1·3·5 交流电阻的意义

#### 1·3·4 交流等效电路

当二极管上加了较高频率的电压时，由于二极管结电容的分流作用，使一部分高频电流会直接从结电容上通过，这样，影响电流的不仅是二极管本身的体电阻 $R$ 和PN结的动态电阻 $r$ ，还有PN结的电容 $C$ 。 $C$ 为势垒电容 $C_T$ 和扩散电容 $C_D$ 的并联，即：

$$C = C_T + C_D \quad (1.3.3)$$

所以，晶体二极管的交流等效电路如图1·3·6所示。



图1·3·6 二极管的交流等效电路

#### 1·3·5 实用二极管

1、变容二极管PN结的电容虽然影响二极管的高频工作，但是我们利用势垒电容 $C_T$ 随外加电压（通常加反向电压）变化的特征，可以制成变容二极管。在这里，变容二极管不再