

# 第一篇 模拟电子技术基础

本篇主要介绍半导体的基本特性、载流子基本概念、PN 结的单向导电性；二极管、稳压管、三极管、场效应管和集成运算放大器的特性曲线、工作状态及线性微变等效电路；讨论了基本放大电路的静态工作点和动态参数的分析计算；集成运算放大电路的线性电路（比例器、加法器、减法器、积分器、微分器、反相器和跟随器等）和非线性电路（零压比较器和任意电压比较器）；简单介绍了单向桥式整流稳压电路工作原理、反馈的基本概念和多级阻容耦合放大电路。

# 第 1 章 半导体及二极管应用

## 1.1 学习指导

本章节讨论了两个问题：一是模拟电子技术的理论知识；二是半导体二极管的伏安特性及应用电路。其中，掌握 PN 结的单向导电性是学习半导体器件的基础。

### 1.1.1 内容提要

- (1) 半导体材料的基本概念，N 型和 P 型半导体的载流子特性，PN 结的单向导电性。
- (2) 半导体二极管和稳压管的工作原理、伏安特性及基本应用。
- (3) 单相桥式整流滤波稳压电路的工作原理。

### 1.1.2 重点与难点

#### 1. 重 点

- (1) 掌握 PN 结的单向导电性，即 PN 结加正向电压导通、加反向电压截止。
- (2) 掌握二极管的伏安特性及测量方法；掌握稳压管的稳压特性。
- (3) 掌握单相桥式整流滤波稳压电路的工作原理。

#### 2. 难 点

PN 结的单向导电性的判断与理解；二极管和稳压管的伏安特性的应用。

## 1.2 半导体的基本知识

20 世纪 50 年代，电子管逐步被半导体器件取代，特别是 1948 年晶体管 (transistor) 的发明，对电子技术的发展起到了决定性的作用，而半导体器件的集成化电路的产生，又使电子技术进入一个崭新的时代。从小规模集成电路 (SSI) 到中规模 (MSI)、大规模 (LSI)、超大规模集成电路 (VLSI)，集成电路工艺水平日新月异，成就了现代电子科学技术的发展。

在自然界中，物质按导电能力的强弱可分为导体、绝缘体、半导体三大类。

导体：容易传导电流的材料，如金属。

绝缘体：几乎不传导电流的材料，如橡胶、陶瓷、石英、塑料等。

半导体：导电能力介于导体和绝缘体之间的材料。由于绝大多数半导体的原子排列呈晶体结构，所以由半导体材料构成的管件也称晶体管，最常用的半导体材料有锗（Ge）和硅（Si）。

半导体器件：用半导体材料制成的电子器件。

半导体的导电性能特点：

（1）具有光敏性和热敏性。

半导体受到光照或热辐射时，其电阻率会发生很大的变化，导电能力将有明显的改善，利用这一特性可制造光敏元件和热敏元件。

（2）具有掺杂特性。

在纯净的半导体中掺入微量的其他元素，半导体的导电性能将大大增强。

可见，半导体的导电性能极其不稳定，这也就导致由半导体材料制造出的电子器件具有很强的非线性特性。所以，在讨论二极管、稳压管、三极管、场效应管和集成运算放大器等半导体器件的伏安特性时，常用  $u-i$  坐标图进行分析讨论。

### 1.2.1 本征半导体

按照半导体理论，将不含杂质的半导体单晶体称为本征半导体。

本征半导体在绝对温度下，且无外界能源施加能量（如光照等）时，是不导电的。但在温度增加或接受光照时，一些共价键中的价电子由于获得一定的能量，挣脱原子核的束缚，成为自由电子，这种现象称为本征激发（也称热激发）。原子核因失去电子，在共价键中出现了空位，这个呈现出正电性的空位称为空穴。空穴的出现是半导体的一个重要特点。如图 1.1 所示。

本征半导体中的自由电子和空穴是成对出现的，称之为电子空穴对。如果在半导体两端加上直流电源  $E$ ，如图 1.2 所示，则自由电子将向电源正端定向运动形成电子电流。空穴虽不移动，但因为带正电，故能吸收相邻原子中的价电子来填补，这样共价键中受束缚的价电子在晶体不断地递补空位而间接产生空穴的定向移动，从而形成空穴电流。电子移动时是负电荷的移动，空穴移动时是正电荷的移动，电子和空穴都能运载电荷，所以它们统称为载流子。

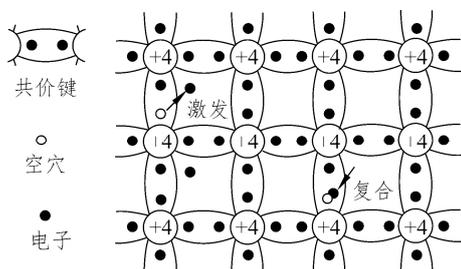


图 1.1 本征半导体的电子空穴对

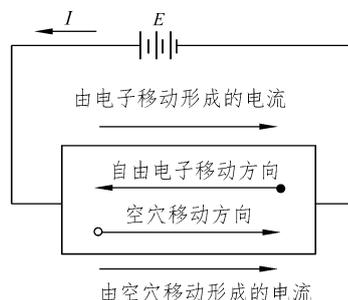


图 1.2 载流子在外电场作用下形成电流

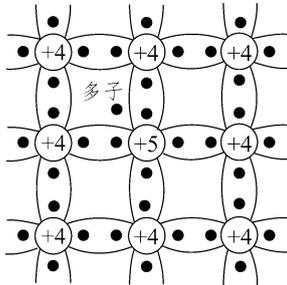
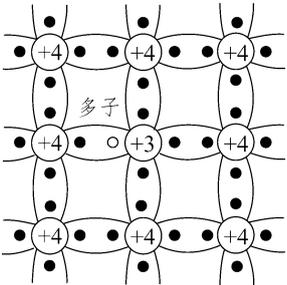
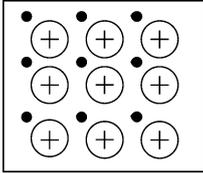
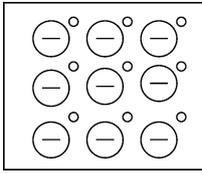
双极型半导体器件：具有电子、空穴两种载流子参与导电的器件。如二极管、稳压管和三极管都可以统称为双极型半导体器件。

单极型半导体器件：只具有一种载流子（电子或空穴）参与导电的器件。如场效应管就称为单极型半导体器件。

### 1.2.2 杂质半导体

在本征半导体中掺进微量的其他元素（称为“杂质”）称为杂质半导体，即N型半导体、P型半导体统称为杂质半导体，其结构和特性等如表 1.1 所示。

表 1.1 杂质半导体

项目	N 型半导体	P 型半导体
掺杂	五价元素（如：磷、砷）	三价元素（如：硼、铝）
结构示意图		
特点	多数载流子是电子，少数载流子是空穴	多数载流子是空穴，少数载流子是电子
示意图		

#### 1) 杂质半导体掺杂特性

在本征半导体中掺进五价元素（如磷、砷等），这些微量原子的外层有 5 个价电子，其中 4 个与本征半导体的外层电子组成共价键，多余的 1 个价电子则成为自由电子，由于自由电子为多数载流子，故称这类半导体为 N 型半导体。

在本征半导体中掺进三价元素（如硼、铝等），这些微量原子的外层有 3 个电子，在组成共价键的过程中多出 1 个空位（即空穴），由于空穴为多数载流子，故称这类半导体为 P 型半导体。

#### 2) 杂质半导体结构示意图

N 型半导体多余的 1 个价电子成为自由电子，即自由电子为多数载流子。

P 型半导体多出的一个空位成为空穴，即空穴为多数载流子。

#### 3) 杂质半导体特点

N 型半导体电子数目  $\gg$  空穴数目，即电子为多数载流子，空穴为少数载流子。

P 型半导体空穴数目  $\gg$  电子数目，即空穴为多数载流子，电子为少数载流子。

#### 4) 杂质半导体示意图

当五价杂质原子失去价电子时，成为带正电的杂质离子，用 $\oplus$ 表示 N 型半导体。

当三价杂质原子获得价电子时，成为带负电的杂质离子，用 $\ominus$ 表示 P 型半导体。

在杂质半导体中，多数载流子的数目与掺入杂质有关，掺入杂质越多，多数载流子的数目就越多；而少数载流子的数目则与温度有关，温度越高，少数载流子的数目就越多。应当注意，不论是哪一种掺杂半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但半导体中的正负电荷数是相等的，整个晶体仍然保持电中性。

### 1.2.3 PN 结的形成

PN 结是构成各种半导体器件的核心，许多半导体器件都是由不同数量的 PN 结构成的。所以，PN 结的理论是学习半导体器件的基础。

#### 1. 载流子的运动

##### (1) 扩散运动。

在电中性的半导体中，当同一种载流子出现浓度差别时，载流子将从浓度较高的区域向浓度较低的区域运动，这种由多数载流子形成的运动称为扩散运动。如图 1.3 (a) 所示。

##### (2) 漂移运动。

在电场的作用下，少数载流子（即 N 型半导体中的空穴，P 型半导体中的自由电子）的定向运动，称为漂移运动。如图 1.3 (c) 所示。

#### 2. PN 结的形成

在一块半导体晶体上，采取一定的掺杂工艺，使两边分别形成 P 型半导体和 N 型半导体，由于 N 型与 P 型半导体中浓度的不同，在交界处产生扩散运动。如图 1.3 (a) 所示。

扩散运动的结果：N 区侧因失去电子，留下带正电的杂质离子（用 $\oplus$ 表示）；P 区侧因失去空穴，留下带负电的杂质离子（用 $\ominus$ 表示），形成了一个很薄的空间电荷区，这个空间电荷区就称为 PN 结。如图 1.3 (b) 所示。

在内电场的作用下，少子产生漂移运动，最后扩散运动与漂移运动达到相对的稳定，PN 结（即空间电荷区）处于动态平衡。如图 1.3 (c) 所示。

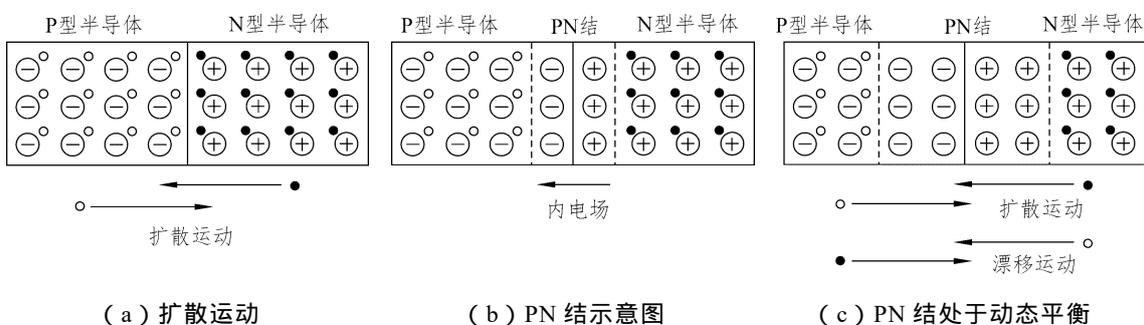


图 1.3 PN 结的形成

PN 结的形成过程为：

多子浓度的差别→扩散运动→杂质离子形成空间电荷区→内电场  $\left\{ \begin{array}{l} \text{促使少子漂移} \\ \text{阻止多子扩散} \end{array} \right. \rightarrow \text{达到动态平衡}$

PN 结是构成各种半导体器件的核心，不同的半导体器件的 PN 结的结构或数量有所不同。如半导体器件二极管、稳压管的结构中只有一个 PN 结，三极管的结构中有两个 PN 结。

### 1.2.4 PN 结的单向导电性

PN 结通常处于动态平衡状态，当外加一定的电压时，将会破坏这种动态平衡状态，即外加电压极性不同，PN 结呈现的导电性能也不同，其导电性能如表 1.2 所示。

表 1.2 PN 结的单向导电性

项目	PN 结外加正向偏置电压（简称：正偏）	PN 结外加反向偏置电压（简称：反偏）
电路图		
PN 结电阻特性	内电场减弱，多子的扩散运动增强，PN 结呈现低电阻状态	内电场增强，主要少子漂移运动形成电流，PN 结呈现高电阻状态
PN 结导电特性	一定范围内，外电场越强，扩散电流越大，称 PN 结为导通状态	一定温度条件下，漂移电流很小很小，称 PN 结为截止状态

#### 1. PN 结外加正向偏置电压

在一定范围内，PN 结外加正向偏置越高，正向电流  $i$  则越大，这时 PN 结呈现低电阻状态，常称 PN 结处于导通状态。

#### 2. PN 结外加反向偏置电压

PN 结外加反向偏置电压时，空间电荷区加宽，扩散运动几乎不能进行，反向电流很小，这时 PN 结呈现高电阻状态，常称 PN 结处于截止状态。

综上所述，PN 结加正偏时，呈现低电阻状态，PN 结为导通状态；PN 结加反偏时，呈现高电阻状态，PN 结为截止状态。这种导电特性称为 PN 结的单向导电性。

### 1.2.5 常见问题讨论

(1) 双极型半导体器件与单极型半导体器件的参与导电的载流子没有区别。

解答：错。

双极型半导体器件参与导电的载流子为电子、空穴两种载流子。

单极型半导体器件参与导电的载流子为电子或空穴，即只有一种载流子参与导电。

(2) PN 结在什么条件下，显示其单向导电基本特性？

解答：在外加电压条件下。

PN 结的单向导电性只有在外加电压时才显示出来。

(3) 在有外加电压时，PN 结呈现的电阻特性不变。

解答：错。

PN 结外加正向电压时，呈低电阻状态，即导通状态；外加反向电压时，呈高电阻状态，即截止状态。

## 1.3 半导体二极管及应用

### 1.3.1 基本概念

#### 1. 基本结构

半导体二极管是由一个 PN 结加上相应的电极引线和管壳封装制成的。P 型半导体一端的电极为阳极（也称正极），N 型半导体一端的电极为阴极（又称负极）。如图 1.4 (a) 所示。

#### 2. 图形符号

根据半导体二极管基本结构，在电子电路中用图 1.4 (b) 所示符号表示半导体二极管。

#### 3. 伏安特性的测试

根据图 1.4 (a) 所示的二极管的基本结构和表 1.2 中的电路图可知，二极管是一个具有单向导电伏安特性的双极型器件；通过电路图 1.4 (c)、(d) 的实验测试，可得到如图 1.4 (e) 所示的伏安特性曲线，同时说明二极管是一个非线性元件。

##### 1) 正向特性测试

当二极管加正偏电压 [ 如图 1.4 (c) 所示 ] 时，调节电压源  $E$  值由  $0\text{V}$  逐渐增加，同时用电压表和毫安表测量二极管上的正向电压和电流，得到二极管的正向伏安特性。

##### 2) 反向特性测试

当电压源反向连接 [ 即如图 1.4 (d) 所示二极管加反偏电压 ] 时，从  $0\text{V}$  开始调节电压源  $E$  值，同时测量二极管的反向电压和电流，得到二极管的反向伏安特性。

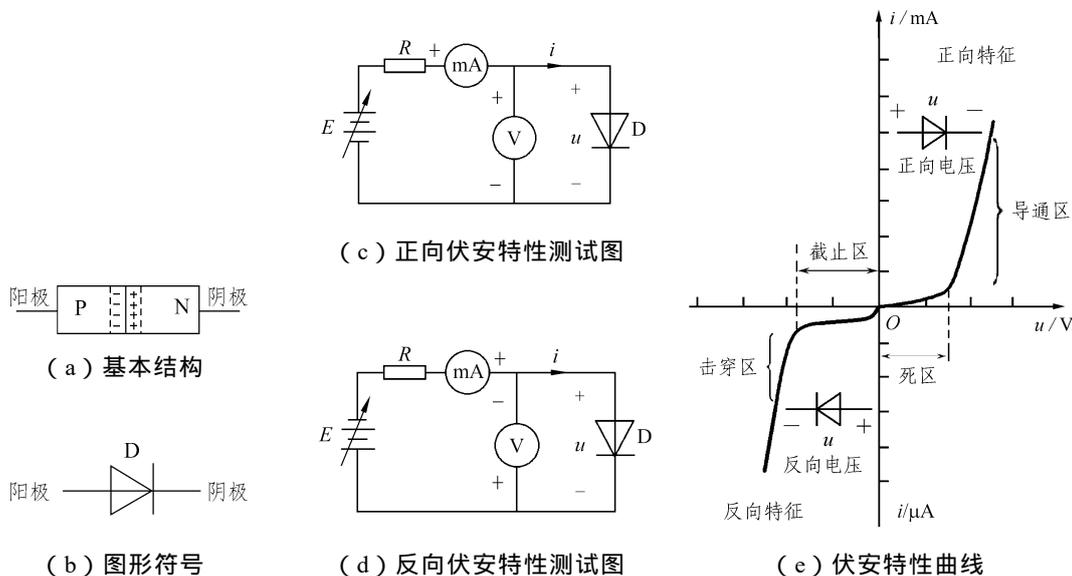


图 1.4 半导体二极管

#### 4. 伏安特性曲线的分析

不同的半导体二极管的伏安特性是有差异的, 由于基本结构中都仅存在一个 PN 结, 则伏安特性曲线的基本形状是相似的, 即都具有单向导电性, 并且是双极型器件。

##### 1) 正向特性

图 1.4 (e) 中第一象限内的曲线称为正向特性。

(1) 当二极管工作在“死区”状态时, PN 结呈现高阻状态, 正向电流几乎为零。通常, 硅管的死区电压为  $0.6 \sim 0.7 \text{ V}$ , 锗管的死区电压为  $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。

(2) 当正向电压  $u$  大于死区电压时, PN 结呈现低阻状态, 正向电流增长很快。这时通常称二极管为“正向导通”状态。

##### 2) 反向特性

图 1.4 (e) 中第三象限内的曲线称为反向特性。

当外加反向电压不超过反向击穿电压时, PN 结呈现高阻状态, 称二极管为“反向截止”状态。

当外加反向电压过高而超过反向击穿电压时, 反向电流突然增大, 称二极管反向击穿。击穿后的二极管失去了单向导电性能, 即二极管损坏。

### 1.3.2 主要参数

二极管的特性可用两种方式来说明: 一种是用伏安特性曲线; 另一种是用一些数据, 这些数据就称为二极管的参数。参数一般可从半导体器件手册中查到。主要参数有: