

职业教育“十三五”精品规划教材

# 模拟电子技术

主 编 杨媛媛

副主编 陈 璐 张 爽 杨慧英

编 者 马 丽 陆静静

 电子科技大学出版社  
University of Electronic Science and Technology of China Press

**图书在版编目 (CIP) 数据**

模拟电子技术 / 杨媛媛主编. -- 成都 : 电子科技大学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-5647-7072-3

I. ①模… II. ①杨… III. ①模拟电路—电子技术—  
高等职业教育—教材 IV. ①TN710.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 107931 号

**模拟电子技术**

杨媛媛 主编

策划编辑 谭炜麟

责任编辑 谭炜麟

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 [www.uestcp.com.cn](http://www.uestcp.com.cn)

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 廊坊市国彩印刷有限公司

成品尺寸 185mm×260mm

印 张 13.5

字 数 349 千字

版 次 2019 年 5 月第一版

印 次 2019 年 5 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-7072-3

定 价 39.90 元

版权所有，侵权必究

# 前 言

模拟电子技术是从事电子技术工作必须掌握的基础课程。具体而言，该课程的目的是让学生理解和掌握模拟电路中最基本的单元电路的工作原理、分析方法及其应用；掌握常用电子仪器仪表的正确使用方法，学会查阅电子元器件手册，合理选用元器件；培养学生具备分析和设计简单电路的能力，具备常用简单电子电路的功能分析、测试和故障排除能力。

模拟电子技术是一门基础理论课程，同时也是一门实践性很强的技术应用课程，因此要求学生必须掌握扎实的理论基础，同时要求学生正确运用理论知识分析实践中遇到的各种问题和现象。笔者多年来从事该门课程的教学，学生普遍反映这门课程难学、难懂、难掌握，为解决这样的问题，笔者将多年教学经验汇集编写出本书。本书采用项目导向、任务驱动的模式编排，通过指导学生亲手制作一些常用、实用电子小产品和电路，让学生在“做中学、在学中做”，以此掌握重要的“知识点”，逐步培养学习兴趣，建立自信心，增强成就感。在具备一定基础知识后，再完成一些综合性“项目”，将所学“知识点”有机结合起来，在动手实践的基础上既培养学生动手能力，又加强对理论知识的学习，最终达到本课程的基本要求。

本书共 6 个项目，项目 1：认识常用半导体器件，主要介绍与训练半导体二极管、半导体三极管、场效应管的识别与判断，学习基本半导体元件工作原理和电路特性；项目 2：调试与制作低频电压放大电路，学习 3 种基本组态放大电路的工作原理和调试方法；项目 3：集成运算放大电路的制作与应用，利用集成运放搭建基本的比例运算电路、波形发生电路，学习集成运放的应用、理解电路反馈的概念；项目 4：多功能函数信号发生器的制作，学习 RC 正弦波振荡电路、LC 正弦波振荡电路、晶体振荡器电路的制作和调试；项目 5：实用低频功率放大电路的制作，分别用分立元件和集成功放搭建功率放大电路，学习提供放大电路输出功率、效率的方法；项目 6：直流稳压电源的制作，学习和训练分立元件搭建直流串联稳压电源电路、常用 LDO 芯片搭建直流稳压电源的方法。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中不妥与错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正，提出宝贵意见，以便进一步修订和完善。

编 者  
2019 年 3 月

# 目 录

项目 1 认识常用半导体器件 .....	1
任务 1 认识二极管的导电特性 .....	1
任务导入 .....	1
任务描述 .....	2
任务实施 .....	2
知识导航 .....	3
一、半导体基础知识 .....	3
二、PN 结 .....	6
三、半导体二极管 .....	9
任务 2 辨别二极管的好坏与极性 .....	12
任务导入 .....	12
任务描述 .....	13
任务实施 .....	13
知识导航 .....	14
一、二极管的应用 .....	14
二、其他类型的二极管 .....	16
任务 3 认识三极管的导电特性 .....	21
任务导入 .....	21
任务描述 .....	21
任务实施 .....	21
知识导航 .....	22
一、三极管的结构与类型 .....	23
二、三极管的电流放大作用 .....	24
三、三极管的特性曲线 .....	26
四、三极管的主要参数 .....	29
五、温度对三极管参数的影响 .....	31
任务 4 辨别三极管的好坏、结构类型与引脚极性 .....	32
任务导入 .....	32
任务描述 .....	32
任务实施 .....	32
知识导航 .....	34
一、三极管状态的判断 .....	34



二、三极管在电子技术中的应用 .....	35
项目小结 .....	36
自测题 .....	37
项目 2 调试与制作低频电压放大电路 .....	42
任务 1 观察基本三极管放大电路的工作波形 .....	42
任务导入 .....	42
任务描述 .....	43
任务实施 .....	43
知识导航 .....	44
一、放大的概念及放大电路的组成原则 .....	44
二、放大电路的性能指标 .....	45
三、基本共射极放大电路的工作原理 .....	48
四、放大电路的分析方法 .....	51
任务 2 调试与制作稳定静态工作点的电路 .....	60
任务导入 .....	60
任务描述 .....	60
任务实施 .....	60
知识导航 .....	63
一、静态工作点稳定的必要性 .....	63
二、稳定静态工作点的电路 .....	64
三、共基极放大电路的组成与分析 .....	69
任务 3 调试与分析共集电极放大电路 .....	70
任务导入 .....	70
任务描述 .....	70
任务实施 .....	71
知识导航 .....	73
一、共集电极放大电路的组成 .....	73
二、共集电极放大电路的分析 .....	73
三、共集电极放大电路的应用 .....	75
四、3 种基本放大电路的比较 .....	75
五、复合管放大电路 .....	75
任务 4 制作多级放大电路 .....	77
任务导入 .....	77
任务描述 .....	78
任务实施 .....	78
知识导航 .....	79
一、多级放大电路的组成 .....	79
二、直接耦合多级放大电路 .....	79

三、阻容耦合多级放大电路 .....	81
四、电隔离耦合放大电路 .....	84
项目小结 .....	85
自测题 .....	86
项目 3 集成运算放大电路的制作与应用 .....	90
任务 1 认识与调试集成运放电路 .....	90
任务导入 .....	90
任务描述 .....	91
任务实施 .....	91
知识导航 .....	92
一、集成运放概述 .....	92
二、理想集成运放 .....	94
三、集成运算放大电路的基本运算电路 .....	96
四、集成运放的主要性能指标 .....	103
五、集成运放应用中的一些实际问题 .....	104
任务 2 测试与分析负反馈放大电路 .....	106
任务导入 .....	106
任务描述 .....	106
任务实施 .....	106
知识导航 .....	109
一、反馈的基本概念和判断方法 .....	109
二、负反馈对放大电路性能的影响 .....	113
任务 3 使用晶体管制作基本的集成运放电路 .....	115
任务导入 .....	115
任务描述 .....	115
任务实施 .....	116
知识导航 .....	117
一、直接耦合放大电路的零点漂移现象 .....	117
二、差分放大电路 .....	118
三、电流源电路 .....	122
四、直接耦合互补输出级 .....	126
任务 4 测试有源滤波电路 .....	127
任务导入 .....	127
任务描述 .....	127
任务实施 .....	128
知识导航 .....	129
一、滤波电路的基础知识 .....	129
二、有源低通滤波电路 .....	130



三、其他滤波电路 .....	131
项目小结 .....	133
自测题 .....	134
<b>项目 4 多功能函数信号发生器的制作</b> .....	<b>143</b>
任务 1 制作与调试 RC 正弦波振荡电路 .....	144
任务导入 .....	144
任务描述 .....	144
任务实施 .....	144
知识导航 .....	145
一、正弦波振荡器概述 .....	145
二、RC 正弦波振荡电路 .....	147
任务 2 制作与调试非正弦波发生电路 .....	151
任务导入 .....	151
任务描述 .....	151
任务实施 .....	151
知识导航 .....	152
一、矩形波发生电路 .....	152
二、三角波发生电路 .....	155
三、锯齿波发生电路 .....	157
项目小结 .....	158
自测题 .....	159
<b>项目 5 实用低频功率放大电路的制作</b> .....	<b>162</b>
任务 1 制作互补对称功率放大电路 .....	162
任务导入 .....	162
任务描述 .....	163
任务实施 .....	163
知识导航 .....	164
一、功率放大电路概述 .....	164
二、常用的互补对称功率放大电路 .....	167
三、功率放大电路的安全运行 .....	173
任务 2 制作集成功率放大电路 .....	175
任务导入 .....	175
任务描述 .....	175
任务实施 .....	176
知识导航 .....	177
一、集成功率放大电路概述 .....	177
二、集成功率放大电路的分析 .....	177
三、集成功率放大电路的主要性能指标 .....	178

四、集成功率放大电路 LM386 的典型应用电路 .....	179
项目小结 .....	180
自测题 .....	181
<b>项目 6 直流稳压电源的制作</b> .....	<b>184</b>
任务 1 制作整流电路 .....	184
任务导入 .....	184
任务描述 .....	185
任务实施 .....	185
知识导航 .....	186
一、电源概述 .....	186
二、整流电路 .....	188
三、滤波电路 .....	193
任务 2 制作串联型稳压电源 .....	196
任务导入 .....	196
任务描述 .....	197
任务实施 .....	197
知识导航 .....	198
一、串联型稳压电路的工作原理 .....	198
二、三端式集成稳压器 .....	201
项目小结 .....	202
自测题 .....	203
<b>参考文献</b> .....	<b>206</b>

# 项目 1 认识常用半导体器件

## 【知识目标】

- 掌握二极管的结构和伏安特性。
- 了解稳压二极管、光电二极管、发光二极管、变容二极管等的特性及应用。
- 掌握三极管的结构及其工作在放大状态的条件。
- 理解半导体三极管的伏安特性及各工作状态的特点。

## 【技能目标】

- 能正确测试各种二极管的外特性。
- 能根据需要查半导体器件手册，合理选用二极管，能分析二极管应用电路的工作原理，正确理解电路功能。
- 能根据功能要求设计简单二极管的应用电路，并对所设计的电路进行安装、检测和调试。
- 能用万用表判别三极管的好坏、类型和引脚极性。
- 能正确测试半导体三极管的外特性；根据记录的测量结果，能对三极管的特性做出准确描述。
- 能根据需要查阅半导体器件手册，合理选用三极管。

## 任务 1 认识二极管的导电特性

### 任务导入

半导体二极管简称二极管，它是用半导体材料制成的最简单器件，在实际电路中已被广泛应用，如电视机、洗衣机等电器设备接通电源后，指示灯亮起，这些用的大

多都是发光二极管；手机、录音机等充电器大多都用到整流二极管等。掌握二极管的特性是电类专业学生必备的基本技能。

## 任务描述

- (1) 测试普通二极管的导电特性，记录结果并进行特性描述。
- (2) 测试光耦器件的外特性，记录结果并进行特性描述。

## 任务实施

### 任务要求

按测试顺序要求完成所有测试内容，记录测试数据，并将结果填入相应的表格中，并绘制出相应的特性曲线。

### 测试环境

稳压电源一台，万用表一只，面包板一块，元器件、导线若干。

### 测试电路

测试二极管伏安特性的电路如图 1-1 所示。其中，二极管 VD 可选用 1N4007、1N4001 或 1N4148 等，电阻  $R=1k\Omega$ 。

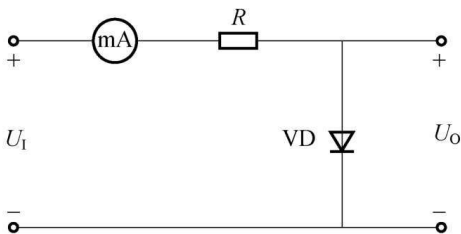


图 1-1 测试二极管伏安特性的电路

### 测试步骤

- (1) 按照图 1-1 在面包板上接好电路。
- (2) 由直流稳压电源输出 10V 电压接入输入端，即  $U_1 = +10V$ （此时二极管两端所加的电压为正向电压），测量输出电压  $U_o$  和电流  $I$  的大小，同时计算二极管的电阻  $R_{VD}$ ，并记录于表 1-1 中。
- (3) 同步骤 (2)，按表 1-1 中的  $U_1$  数值改变直流稳压电源的输出电压，并将测量和计算结果  $U_o$ 、 $I$ 、 $R_{VD}$  填入表中。
- (4) 保持步骤 (2) 和步骤 (3)，将二极管 VD 反接（此时二极管所加的电压为反

向电压), 测量输出电压  $U_o$  和电流  $I$  的大小, 计算反向电阻  $R_{VD}$ , 并记录于表 1-1 中。

(5) 根据表 1-1 中的数据绘制出二极管的伏安特性曲线。

结论: 当二极管加正向电压时, 二极管两端的电压——(较大或较小), 正向电阻——(大或小); 加反向电压时, 反向电流——(很大或很小), 反向电阻——(大或小)。

表 1-1 二极管特性测试结果

正向	$U_1/V$	10	8	6	4	2	1	0.8	0.5	0.2
	$U_o/V$									
	$I/mA$									
	$R_{VD}/k\Omega$									
反向	$U_1/V$	20	12	10	8	6	4	2	1	0
	$U_o/V$									
	$I/mA$									
	$R_{VD}/k\Omega$									

## 知识导航

### 一、半导体基础知识

#### (一) 导电材料的分类

自然界中的物质根据其导电能力的强弱通常可分为以下三大类。

- ①导体: 指很容易导电的物质。金属一般都是导体。
- ②绝缘体: 指几乎不导电的物质。例如, 橡皮、陶瓷、塑料、石英等。
- ③半导体: 指导电特性处于导体和绝缘体之间的物质。例如, 锗、硅、砷化镓和一些硫化物、氧化物等。

#### (二) 半导体

物质的导电性能决定于原子结构。导体一般为低价元素, 它们的最外层电子极易挣脱原子核的束缚成为自由电子, 在外电场的作用下产生定向移动, 形成电流。高价元素(如惰性气体)或高分子物质(如橡胶), 它们的最外层电子受原子核束缚力很强, 很难成为自由电子, 所以导电性极差, 称为绝缘体。常用的半导体材料硅(Si)和锗(Ge)均为四价元素, 它们的最外层电子既不像导体那么容易挣脱原子核的束缚, 也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧, 因而其导电性介于二者之间。

在形成晶体结构的半导体中, 人为地掺入特定的杂质元素时, 导电性能具有可控性; 并且, 在光照和热辐射条件下, 其导电性还有明显的变化, 这些特殊的性质就决



定了半导体可以制成各种电子器件。

### (三) 本征半导体

将纯净的半导体经过一定的工艺过程制成单晶体，即为本征半导体。晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵，称为晶格。由于相邻原子间的距离很小，因此，相邻的两个原子的一对最外层电子（即价电子）不但各自围绕自身所属的原子核运动，而且出现在相邻原子所属的轨道上，成为共用电子，这样的组合称为共价键结构，如图 1-2 所示。图 1-2 中标有“+4”的圆圈表示除价电子外的正离子。

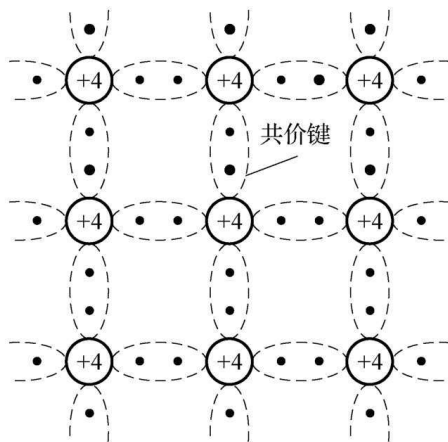


图 1-2 本征半导体共价键结构

### (四) 本征半导体中的两种载流子

晶体中的共价键具有很强的结合力，因此，在常温下，仅有极少数的价电子由于热运动（热激发）获得足够的能量，从而挣脱共价键的束缚变成自由电子。

与此同时，在共价键中留下一个空位置，称为空穴。原子因失掉一个价电子而带正电，或者说空穴带正电。在本征半导体中，自由电子与空穴是成对出现的，即自由电子与空穴数目相等，如图 1-2 所示。这样，若在本征半导体两端外加一电场，则一方面自由电子将产生定向移动，形成电子电流；另一方面由于空穴的存在，价电子将按一定的方向依次填补空穴。也就是说，空穴也产生定向移动，形成空穴电流。由于自由电子和空穴所带电荷极性不同，因此它们的运动方向相反，本征半导体中的电流是两个电流之和。

运载电荷的粒子称为载流子。导体导电只有一种载流子，即自由电子，导电；而本征半导体有两种载流子，即自由电子和空穴，均参与导电，这是半导体导电的特殊性质。

应当指出的是，本征半导体的导电性能很差，且与环境温度密切相关。半导体材料性能对温度的这种敏感性，既可以用来制作热敏器件和光敏器件，又可以使半导体器件温度稳定性变差。

### (五) 杂质半导体

通过扩散工艺，在本征半导体中掺入少量合适的杂质元素，便可得到杂质半导体。按掺入的杂质元素不同，可形成 N 型半导体和 P 型半导体；控制掺入杂质元素的浓度，就可控制杂质半导体的导电性能。

#### 1. N 型半导体

在纯净的硅晶体中掺入五价元素（如磷），使之取代晶格中硅原子的位置，就形成了 N 型半导体。由于杂质原子的最外层有 5 个价电子，因此除了与周围硅原子形成共价键外，还多出一个电子，如图 1-3 所示。多出的电子不受共价键的束缚，只需获得很少的能量，就可以成为自由电子。在常温下，由于热激发就可使它们成为自由电子，而杂质原子因在晶格上，且又缺少电子，因此变为不能移动的正离子。N 型半导体中，自由电子的浓度大于空穴的浓度，故称自由电子为多数载流子，空穴为少数载流子，并将前者简称多子，后者简称少子。由于杂质原子可以提供电子，因此称为施主原子。N 型半导体主要靠自由电子导电，掺入的杂质越多，多子（自由电子）的浓度就越高，导电性能也就越强。

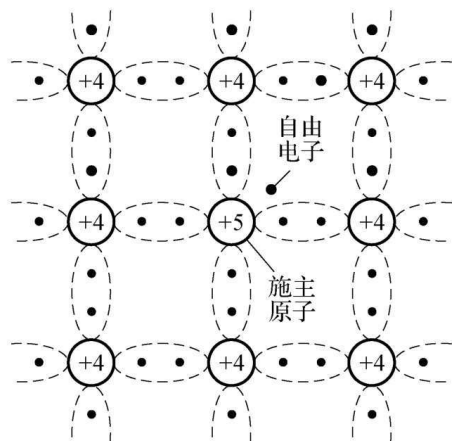


图 1-3 N 型半导体

#### 2. P 型半导体

在纯净的硅晶体中掺入三价元素（如硼），使之取代晶格中硅原子的位置，就形成了 P 型半导体。由于杂质原子的最外层有 3 个价电子，因此当它们与周围的硅原子形成共价键时，就产生了一个“空位”（空位为电中性），当硅原子外层电子由于热运动填补此空位时，杂质原子就成为不可移动的负离子，同时，在硅原子的共价键中产生一个空穴，如图 1-4 所示。因此 P 型半导体中，空穴为多子，自由电子为少子，主要靠空穴导电。与 N 型半导体相同，掺入的杂质越多，多子（空穴）的浓度就越高，导电性能也就越强。因为杂质原子中的空位吸收电子，所以称为受主原子。

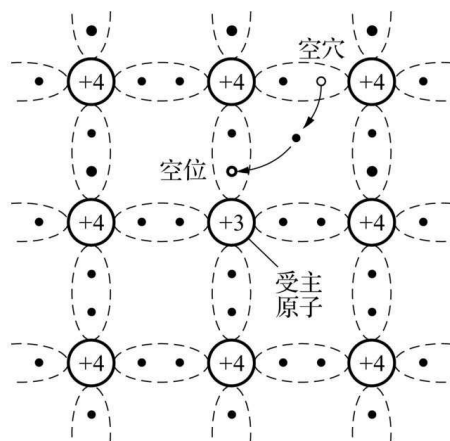


图 1-4 P 型半导体

以上分析可知，由于掺入的杂质使多子的数目大大增加，从而使多子与少子复合的机会大大增多。因此，对于杂质半导体，多子的浓度越高，少子的浓度就越低。可以认为，多子的浓度约等于所掺杂质原子的浓度，因而它受温度的影响很小；而少子是本征激发形成的，所以尽管其浓度很低，却对温度非常敏感，这将影响半导体器件的性能。

## 二、PN 结

采用不同的掺杂工艺，将 P 型半导体与 N 型半导体制作在同一块硅片上，在它们的交界面就形成了 PN 结。PN 结具有单向导电性。

### (一) PN 结的形成

所谓 PN 结，就是 P 型半导体和 N 型半导体的交界面处所形成的一个特殊薄层。例如，在一块纯净的半导体中，通过特殊的工艺，在它的一边掺入微量的三价元素硼，形成 P 型半导体；在它的另一边掺入五价元素磷，形成 N 型半导体。由于在 P 区中有大量的空穴，只有极少量的自由电子；同样，在 N 区中有大量的自由电子，只有极少量的空穴。因此，这种浓度差异导致载流子就要从浓度大的地方向浓度小的地方扩散，如图 1-5 (a) 所示。

在扩散时，首先是交界面附近的空穴与自由电子碰撞而消失（这一现象称为复合），结果在交界面的 P 区一侧的空穴减少，出现一层带负电离子区；而靠近 N 区一侧出现一层带正电离子区。随着扩散运动的进行，在交界面两侧形成了一个空间电荷区，即 PN 结，如图 1-5 (b) 所示。这个空间电荷区形成了一个由正电荷层指向负电荷层的电场，称为内电场。空间电荷区又称为耗尽层。在空间电荷区以外的 P 区和 N 区仍为电中性区，不存在电场。

随着内电场的产生，正离子排斥 P 型半导体中的多数载流子空穴，吸引少数载流子自由电子；而负离子排斥 N 型半导体中的多数载流子自由电子，吸引少数载流子空穴。少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移运动。

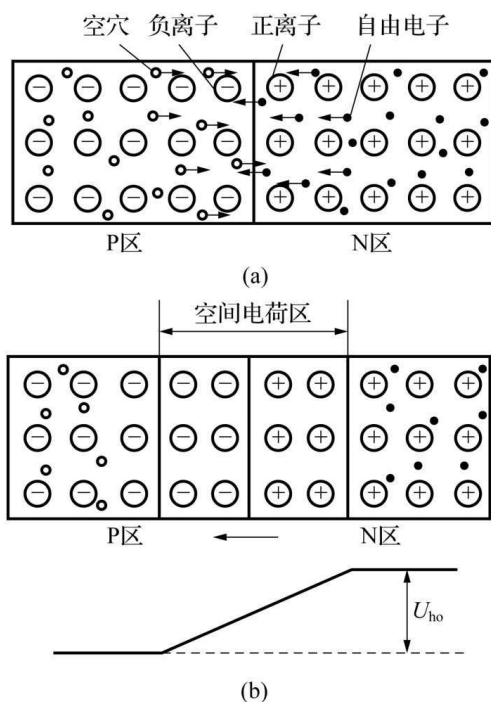


图 1-5 PN 结的形成

显而易见，在 P 型半导体与 N 型半导体刚接触时，由于载流子的浓度差，扩散运动大于漂移运动，随着扩散的进行，空间电荷区逐渐加宽，漂移运动逐渐增强，扩散运动逐渐减弱。当空间电荷区增大到一定宽度使得扩散运动和漂移运动相等时，扩散运动和漂移运动就达到了动态平衡。这时空间电荷区的宽度为几微米至几十微米，不再增加，内电场也就不再变化，硅材料为 0.7V 左右，锗则为 0.2V 左右。

## (二) PN 结的单向导电性

如果在 PN 结的两端外加电压，则将破坏原来的平衡状态。此时，扩散电流不再等于漂移电流，因而 PN 结将有电流流过。当外加电压极性不同时，PN 结表现出截然不同的导电性能，即呈现出单向导电性。

### 1. PN 结外加正向电压时处于导通状态

当电源的正极（或正极串联电阻后）接到 PN 结的 P 端，且电源的负极（或负极串联电阻后）接到 PN 结的 N 端时，称为 PN 结外加正向电压，也称为正向接法或正向偏置。此时，外电场将多数载流子推向空间电荷区，使其变窄，削弱了内电场，破坏了原来的平衡，使扩散运动加剧，而漂移运动减弱。由于电源的作用，扩散运动将源源不断地进行，因此形成正向电流，PN 结导通，如图 1-6 所示。PN 结导通时的结压降上只有零点几伏，因而都应在它所在的回路中串联一个电阻，以限制回路的电流，防止 PN 结因正向电流过大而损坏。

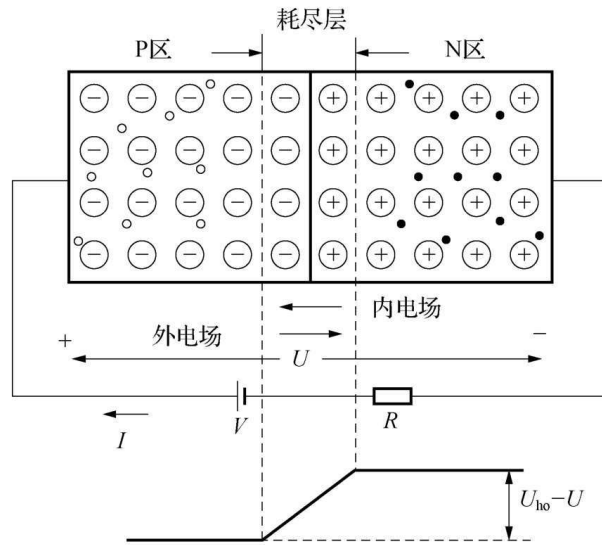


图 1-6 PN 结外加正向电压时导通

## 2. PN 结外加反向电压时处于截止状态

当电源的正极（或正极串联电阻后）接到 PN 结的 N 端，且电源的负极（或负极串联电阻后）接到 PN 结的 P 端时，称为 PN 结外加反向电压，也称为反向接法或反向偏置，如图 1-7 所示。此时，外电场使空间电荷区变宽，加强了内电场，阻止扩散运动的进行，而加剧漂移运动的进行，形成反向电流，也称为漂移电流。因为少子的数目极少，即使所有的少子都参与漂移运动，反向电流也非常小，所以在近似分析中常将它忽略不计，认为 PN 结外加反向电压时处于截止状态。

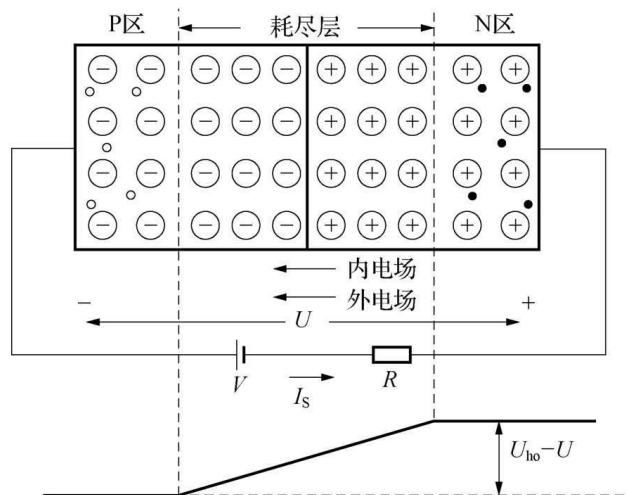


图 1-7 PN 结外加反向电压时截止

综上所述，PN 结正向偏置时，正向电流较大；PN 结反向偏置时，反向电流很小。这就是 PN 结的单向导电性。



### 3. PN 结的反向击穿

当加于 PN 结两端的反向电压增大到一定数值时, PN 结的反向电流将随反向电压的增加而急剧增大, 这种现象称为 PN 结的反向击穿。此时, PN 结的单向导电性被破坏。

反向击穿分为电击穿和热击穿。反向击穿后, 只要反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结容许的耗散功率, PN 结一般不会损坏。如果反向电压下降到击穿电压以下后, 其性能可恢复到原有状态, 则称为电击穿; 如果反向击穿电流过大, 电压很高, 消耗在 PN 结上的功率很大, 则容易使 PN 结发热, 导致 PN 结因温度过高而烧毁, 这种击穿称为热击穿。

反向击穿按机制又分为雪崩击穿和齐纳击穿。

在掺杂浓度较低的 PN 结中, 耗尽层宽度较宽, 当反向电压增加到较大数值时, 耗尽层的电场加强, 使少子漂移速度加快, 动能增大, 通过空间电荷区与原子相撞, 产生很多的电子—空穴对, 这些新产生的电子与空穴被电场加速后又去撞击更多的原子, 就像雪崩一样, 致使电流急剧增加, 这种击穿称为雪崩击穿。

在掺杂浓度较高的 PN 结中, 耗尽层宽度很窄, 较小的反向电压就可以在耗尽层形成很强的电场, 将价电子直接从共价键中拉出来, 产生电子—空穴对, 致使电流急剧增大, 这种击穿称为齐纳击穿。

## 三、半导体二极管

将 PN 结用外壳封装起来, 并加上电极引线就构成了半导体二极管, 简称二极管。由 P 区引出的电极为阳极, 由 N 区引出的电极为阴极, 常用二极管的外形如图 1-8 所示。

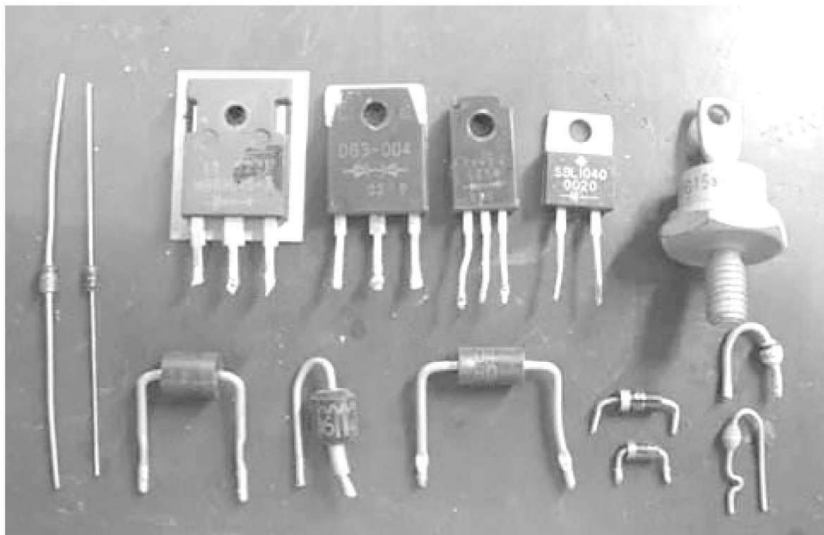


图 1-8 常用二极管的外形

#### (一) 二极管的类型和结构

二极管是应用最广泛的一种半导体器件, 其种类很多。按照所用的半导体材料,