

高职高专课程改革项目研究成果  
“互联网+”新形态教材



# 模拟电路分析与实践

主 编◎张慧敏 吴青萍  
副主编◎施 静 徐 敏

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 模拟电路分析与实践

主 编 张慧敏 吴青萍

副主编 施 静 徐 敏

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书根据职业教育要求和学生特点编写,以培养学生的技术应用能力为主线,内容覆盖面较全,难度不大;以理论“够用”和实践为重,以讲清概念、强化应用为目标,适当增加拓展内容和项目。

本书的主要内容包括:分析与制作心形彩灯、分析与设计声控灯、设计与制作温度报警器、分析与制作扩音器、分析与设计直流稳压电源、设计与制作信号发生器等。本书每个项目和每个任务都配有练习题及答案,培养学生利用相关知识解决实际问题的能力。本教材可作为高等职业教育的电子、信息、电气、自动化及计算机等专业的教材,还可作为自学考试和工程技术人员的学习参考书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电路分析与实践 / 张慧敏, 吴青萍主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2019.8 (2019.9重印)

ISBN 978-7-5682-7391-6

I. ①模… II. ①张… ②吴… III. ①模拟电路-电路分析-高等教育-教材  
IV. ①TN710.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第174528号

---

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 17.25

字 数 / 402千字

版 次 / 2019年8月第1版 2019年9月第2次印刷

定 价 / 42.00元

责任编辑 / 朱 婧

文案编辑 / 朱 婧

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 施胜娟

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 前 言

本书是依据教育部制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》编写而成。编写时坚持“理论够用、实践为重，理论与实践相结合，以项目为载体，以职业能力培养为目标”的原则，突出高职高专教育的特点。

本书基于“项目导向、任务驱动”模式，以典型工作任务为引导，将项目制作、理论知识和技能训练有机结合，充分体现了高职特色，更加符合当今高等职业院校高素质技能型人才的培养要求。本书将模拟电子技术课程的知识点融入分析与制作心形彩灯、分析与设计声控灯等6个项目中，对学生进行电子电路的识图、分析、制作与调试等基本职业技能的训练。本书以培养学生的动手能力、职业素养为目标，同时融入了电子设备转接工、无线电调试工等岗位的知识及能力要求，使学生在掌握模拟电子技术理论知识的基础上，能够提高在电子产品生产中的实际操作技能，真正体现职业教育的内涵。

在内容的安排上，本书以技术应用为主旨，贴近生产实践，以各种分立及集成器件为基础，以放大电路的基本分析方法为重点，以集成电路的应用为目的，减少了烦琐的理论推导及测试方法等内容，并且更加注重集成电路的实用性。与生产实践相联系，着眼于提高学生分析问题和解决问题的能力。

在结构的设计上，本书是融理论和实践为一体的项目化训练教材，技能训练内容丰富、实用，同时适当引入计算机仿真技术，坚持教、学、做一体化，探索理论知识和技能训练一体化的模式，使教材内容更加符合学生的认知规律，使理论学习和技能训练与生产生活中的实际应用相结合，让学生在轻松的氛围中学习原理、体会应用、锻炼技能。

为了方便学生自学和复习，书中每个任务和项目后都附有相关习题及答案（扫码查看），以便于学生自测。另外，书中还安排有“知识拓展”和“项目拓展”模块，供有兴趣的读者深入研究。

本书项目1、项目3、项目2的任务3、项目1~项目4的习题答案由常州信息职业技术学院张慧敏老师编写，项目2的任务1~任务2由常州信息职业技术学院施静老师编写，项目4的任务1~任务3、项目5和项目6的习题答案由常州信息职业技术学院徐敏老师编写，项目5、项目6、项目4的任务4、附录由常州信息职业技术学院吴青萍老师编写。全书由张慧敏、吴青萍老师统稿并修改，江苏理工学院乔晓华教授对全书进行了认真审阅，并提出了不少宝贵建议。本书在编写过程中参考了不少同行们编写的优秀教材，从中得到了不少启发。在此，一并致以诚挚的感谢！

由于时间仓促、编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请同行们给予批评指正。

编 者

# 目 录

<b>项目 1 分析与制作心形彩灯</b> .....	1
任务 1.1 分析与测试半导体二极管 .....	1
1.1.1 认识二极管 .....	1
1.1.2 分析二极管应用电路 .....	8
1.1.3 认识特殊类型的二极管 .....	12
1.1.4 任务训练：识别与检测半导体二极管 .....	15
任务 1.2 分析与测试半导体三极管 .....	18
1.2.1 认识三极管 .....	18
1.2.2 分析三极管的特性 .....	23
1.2.3 任务训练 1：识别与检测半导体三极管 .....	26
1.2.4 任务训练 2：仿真分析半导体三极管特性 .....	27
任务 1.3 分析与制作心形彩灯 .....	30
知识拓展 认识绝缘栅型场效应管 .....	31
项目拓展 分析与制作电子开关 .....	35
小结 .....	38
习题 .....	38
<b>项目 2 分析与设计声控灯</b> .....	41
任务 2.1 分析与测试共射放大电路 .....	41
2.1.1 估算共射放大电路的静态工作点 .....	41
2.1.2 分析共射放大电路的动态性能 .....	46
2.1.3 分析分压式偏置共射放大电路 .....	56
2.1.4 任务训练：仿真分析共射放大电路 .....	59
任务 2.2 分析共集电极和多级放大电路 .....	63
2.2.1 分析共集电极放大电路 .....	63
2.2.2 分析多级放大电路 .....	68
任务 2.3 分析与制作声控灯 .....	73
小结 .....	76
习题 .....	77



<b>项目 3 设计与制作温度报警器</b>	79
任务 3.1 认识集成运放和负反馈	79
3.1.1 认识集成运算放大器	79
3.1.2 认识负反馈	89
3.1.3 分析负反馈对放大器性能的改善	96
任务 3.2 分析与测试集成运放的线性应用电路	104
3.2.1 分析比例运算电路	104
3.2.2 分析加减法运算电路	107
3.2.3 分析微积分电路	109
3.2.4 任务训练：仿真分析集成运放线性应用电路	111
任务 3.3 分析与测试集成运放的非线性应用电路	118
3.3.1 分析电压比较器	118
3.3.2 任务训练：仿真分析电压比较器	122
任务 3.4 分析与制作温度报警器	126
项目拓展 分析与制作温度变送器	127
小结	129
习题	129
<b>项目 4 分析与制作扩音器</b>	133
任务 4.1 认识滤波器和音调电路	134
4.1.1 认识滤波器	134
4.1.2 认识音调电路	141
任务 4.2 分析与测试功率放大电路	146
4.2.1 分析乙类功率放大器	146
4.2.2 分析甲乙类功率放大器	152
4.2.3 任务训练：仿真分析功率放大电路	161
任务 4.3 分析集成功率放大器	165
任务 4.4 分析与制作扩音器	173
小结	178
习题	179
<b>项目 5 分析与设计直流稳压电源</b>	182
任务 5.1 分析与测试整流电路	182
5.1.1 分析整流电路	182
5.1.2 任务训练：仿真分析整流电路	188
任务 5.2 分析与测试滤波和稳压电路	189
5.2.1 分析滤波电路	189
5.2.2 分析稳压电路	193



5.2.3 任务训练：仿真分析滤波和稳压电路	199
任务 5.3 分析与设计直流稳压电源	202
项目拓展 分析与制作多路输出稳压电源	208
小结	209
习题	210
<b>项目 6 设计与制作信号发生器</b>	<b>213</b>
任务 6.1 分析与测试振荡电路	213
6.1.1 认识 $RC$ 正弦波振荡器	213
6.1.2 分析三点式 $LC$ 正弦波振荡器	221
6.1.3 仿真分析正弦波振荡器	228
任务 6.2 分析与测试振荡电路	229
6.2.1 分析方波产生电路	229
6.2.2 分析三角波产生电路	230
6.2.3 任务训练：仿真分析三角波发生器	232
任务 6.3 分析与制作简易信号发生器	233
项目拓展 分析与制作简易电子琴	235
小结	237
习题	237
<b>附录 1 半导体分立器件型号命名方法</b>	<b>240</b>
<b>附录 2 常用半导体二极管的主要参数</b>	<b>245</b>
<b>附录 3 常用半导体三极管的主要参数</b>	<b>247</b>
<b>附录 4 集成电路的命名方法</b>	<b>249</b>
<b>附录 5 部分模拟集成电路主要参数</b>	<b>251</b>
<b>附录 6 常用仪器仪表介绍和使用 VP-5220 D/C 双踪示波器</b>	<b>253</b>
<b>参考文献</b>	<b>266</b>

# 项目 1

## 分析与制作心形彩灯

### 引导语

日常生活中经常会见到心形彩灯，图 1.1 所示为某心形彩灯的实物。这些心形彩灯的电路主要由**半导体二极管**、**半导体三极管**、**电阻等组成**，图 1.2 是发光二极管和三极管的实物。通过本项目的学习，在熟悉半导体二极管、半导体三极管特性的基础上，理解心形彩灯的工作原理，可以尝试设计和动手制作心形彩灯。本项目**重点研究半导体二极管、三极管的特性以及心形彩灯的工作原理**。



图 1.1 指示灯的实物

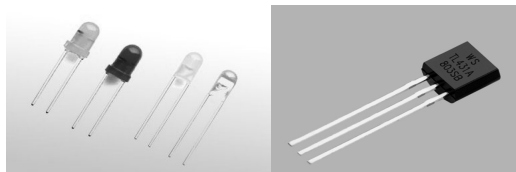


图 1.2 发光二极管和三极管的实物



心形彩灯演示

## 任务 1.1 分析与测试半导体二极管

### 1.1.1 认识二极管

#### 知识储备

二极管是组成指示灯电路的核心器件，而构成二极管的材料是半导体，所以本节首先认识半导体。

#### 1. 半导体的基本知识

##### 1) 半导体材料及共价键结构

半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。在自然界中属于半导体的物质很多，如锗、硅、砷化镓和一些硫化物、氧化物等，其中硅和锗是目前最常用的半导体材料，它们

都是4价元素，最外层原子轨道上具有4个电子（价电子），如图1.3所示。半导体与金属和许多绝缘体一样均具有晶体结构，它们的原子形成有序的排列。晶体结构中，由于原子之间距离很近，价电子不仅受到所属原子核的吸引，还受到相邻原子核的吸引，每个价电子为相邻的两个原子核所共有，即相邻的原子被共有的价电子联系在一起，这种结构称为**共价键**结构，如图1.4所示。

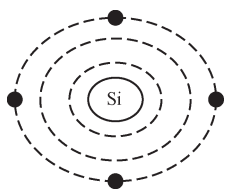


图 1.3 硅原子结构模型

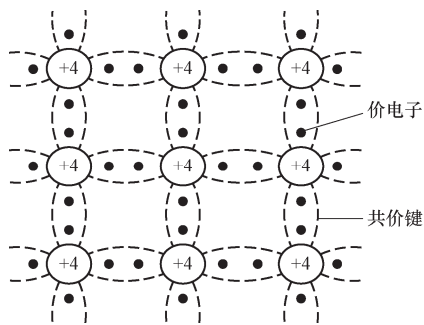


图 1.4 单晶体的共价键结构

## 2) 本征半导体与载流子

完全纯净且具有晶体结构的半导体称为**本征半导体**。晶体原子间的共价键具有很强的结合力，在绝对温度为零度时，价电子不能挣脱共价键的束缚，也就不能自由移动，此时半导体不导电。当温度升高或光照增强时，少数价电子获得能量，从而挣脱共价键的束缚，成为自由电子，在原来共价键的相应位置留下一个空位，这个空位称为“空穴”。如图1.5所示，其中A处为空穴，B处为自由电子。

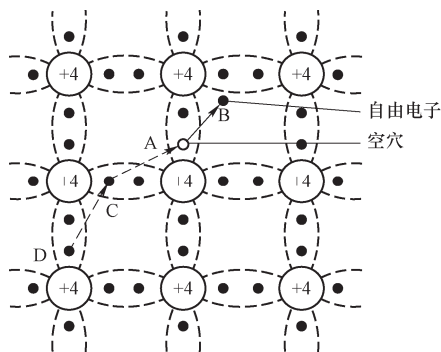


图 1.5 本征激发现象

因为自由电子与空穴是成对出现的，所以称为**电子空穴对**，此时**整个原子对外仍然呈现电中性**，这种现象就称为**本征激发**。

由于共价键A处出现了空穴，在外加电场或其他能源的作用下，邻近的价电子就容易填补到这个空穴中，使该价电子原来所在共价键的位置形成一个空穴，如图1.5中C处所示，这样空穴便从A处移至C处；同样，

邻近的价电子（图中D处）又填补到这个新的空穴，空穴又从C处移到D处。因此，空穴可以在半导体中自由移动，实质上是价电子填补空穴的运动（二者运动方向相反）。从自由电子角度来看，其定向移动会形成电流；从空穴角度来看，空穴可看成一种带正电荷的载流子，它所带电量与电子相等，符号相反，其定向移动也会形成电流。

可见，在本征半导体中存在两种载流子，即带负电荷的电子载流子和带正电荷的空穴载流子。

## 3) 杂质半导体

在本征激发产生电子空穴对的同时，自由电子在运动中有可能和空穴相遇，重新被共价键束缚起来，电子空穴对消失，这种现象称为“复合”。激发和复合现象是相互矛盾的，最终处于动态平衡时本征激发的电子空穴对很少，所以导致其导电能力非常弱，接近绝缘体，一

般不直接使用本征半导体。由于半导体材料具有两个非常重要的特性：① 热敏和光敏特性（当温度升高或者光照增强时，其导电能力大大增强）；② 掺杂特性（在纯净半导体中掺入少量的杂质后，半导体的导电能力大大增强）。所以，常用的半导体材料实际都是经过掺杂后的杂质半导体。按照掺入杂质的不同，杂质半导体可分为 N 型和 P 型两种。

#### （1）N 型半导体

在纯净的硅（或锗）晶体中，掺入少量五价元素，如磷、砷等。由于掺入的元素数量较少，因此整个晶体结构基本上保持不变，只是某些位置上的硅原子被磷原子替代。磷原子 5 个价电子中的 4 个与硅原子形成共价键结构，而多余一个价电子处于共价键之外，很容易挣脱原子核的束缚成为自由电子。这样半导体中自由电子数目明显增加，大大提高半导体的导电性能。同时空穴数量远少于自由电子数量，故自由电子被称为多数载流子（简称多子），空穴被称为少数载流子（简称少子）。这种杂质半导体主要以电子导电为主，称为电子半导体，简称 N 型半导体，如图 1.6（a）所示。

#### （2）P 型半导体

在纯净的硅（或锗）晶体中，掺入少量三价元素，如硼、铝等，硼原子与周围的硅原子形成共价键时，会因缺少一个价电子而在共价键中出现一个空位，这个空位很容易被相邻的价电子填补，而使失去价电子的共价键出现一个空穴，这样在杂质半导体中出现大量空穴。空穴被称为多数载流子，自由电子被称为少数载流子。这种杂质半导体主要靠空穴导电，称为空穴半导体，简称 P 型半导体，如图 1.6（b）所示。

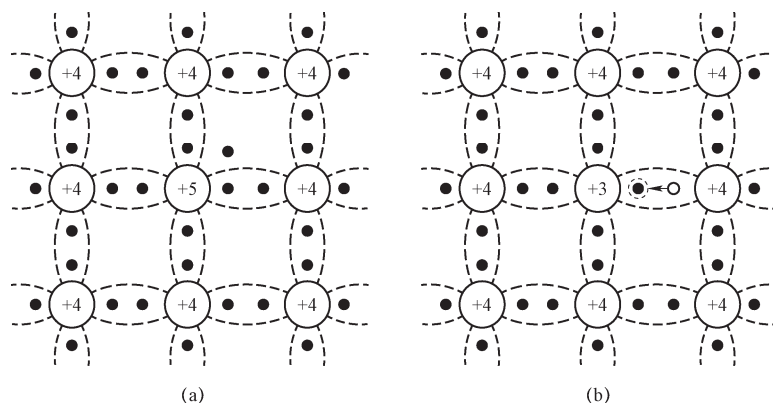


图 1.6 N、P 型半导体结构示意图

（a）N 型半导体；（b）P 型半导体

必须指出的是，不论是 N 型半导体还是 P 型半导体，虽然都是一种载流子占多数，但整个晶体中正负电荷数量相等，呈现电中性。

#### 4) PN 结的形成

若在一块本征半导体上，两边掺入不同的杂质，使一边成为 P 型半导体，另一边成为 N 型半导体。由于两种半导体多子不同，其交界面两侧的电子和空穴存在浓度差，会出现多数载流子的扩散运动。N 区的自由电子往 P 区扩散，而 P 区的空穴往 N 区扩散，如图 1.7 所示。扩散的结果是在 N 区留下带正电的离子（图中用  $\oplus$  表示），而 P 区留下带负电的离子（图中用  $\ominus$  表示），在交界面两侧的区域自由电子和空穴成对消失而复合，形成一个很薄的空间电

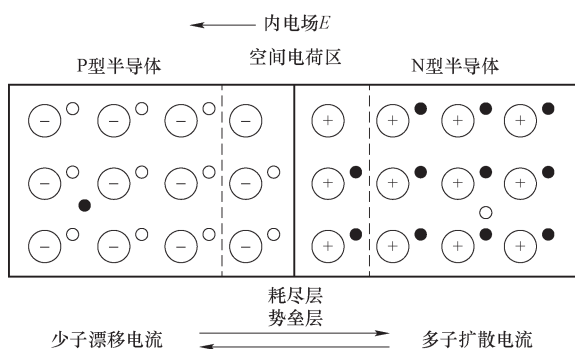


图 1.7 PN 结的形成

在 PN 结的形成过程中，刚开始时以扩散运动为主，随着空间电荷区的加宽和内电场的加强，多数载流子运动逐渐减弱，漂移运动逐渐加强，使空间电荷区变窄，而空间电荷区的变窄，又会对扩散运动产生抑制作用。最终，扩散运动与漂移运动会达到动态平衡。此时，空间电荷区的宽度基本稳定下来，扩散电流等于漂移电流，通过 PN 结的电流为零，PN 结处于动态的稳定状态。

## 2. 半导体二极管

### 1) 半导体二极管的结构与分类

PN 结是半导体二极管的核心组成部分。二极管是在 P 区和 N 区两侧各接上电极引线，再加以外壳封装而成，如图 1.8 (a) 所示。P 区所接引线称为二极管的阳极，N 区所接引线称为二极管的阴极，其简化符号如图 1.8 (b) 所示，箭头方向表示正向电流的方向，即从阳极指向阴极。

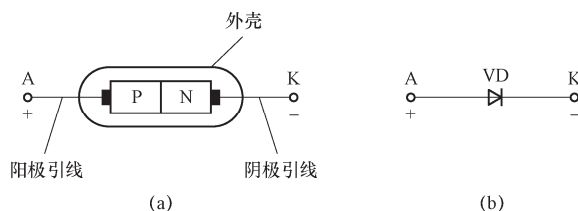


图 1.8 二极管结构和符号

(a) 结构示意图；(b) 符号

二极管的分类方法很多，按照封装形式可以分为塑料封装、金属封装、陶瓷或玻璃封装等，图 1.9 所示为常见的几种二极管封装形式。按半导体材料的不同可分为硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管。按用途的区别可分为普通二极管和特殊二极管。普通二极管按用途不同又可分为整流二极管、开关二极管、检波二极管等；特殊二极管包括稳压二极管、变容二极管、发光二极管、光电二极管等。

根据 PN 结结面积大小，二极管可分为点接触型和面接触型，如图 1.10 所示。点接触型二极管 PN 结面积小，高频特性好，但不能通过大电流，主要用于高频检波和小电流整流；面接触型二极管 PN 结面积大，高频特性差，但允许通过较大的电流，主要用于低频整流电路。

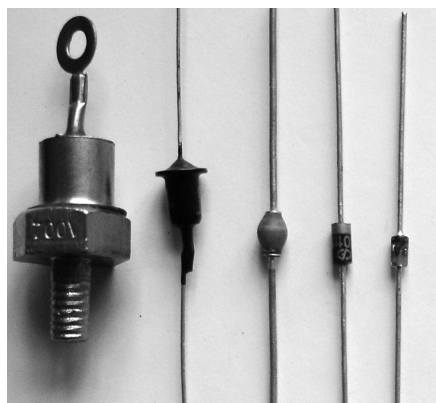


图 1.9 二极管常见封装形式

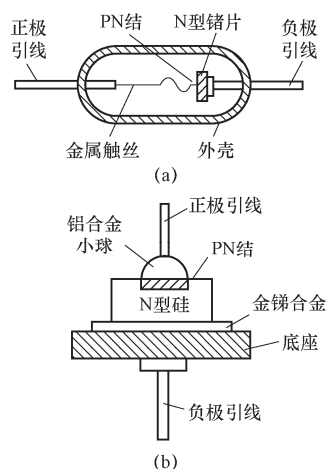


图 1.10 点接触型和面接触型二极管

(a) 点接触型; (b) 面接触型

## 2) 半导体二极管的特性

### (1) 二极管的单向导电性。

**P 区接电源正极，N 区接电源负极**，这种接法叫做 PN 结外加正向电压，又叫正向偏置，简称**正偏**，如图 1.11 所示。这时外加电压在耗尽层中建立的外电场与内电场方向相反，削弱了内电场作用，使空间电荷区变窄，使多数载流子的扩散运动大于少数载流子的漂移运动。在电源的作用下，多数载流子就能越过空间电荷区形成较大的扩散电流。电流从电源的正极流入 P 区，经过 PN 结由 N 区流回电源的负极，称为正向电流。由于多数载流子浓度较大，当外加电压不太高时就可以形成很大的正向电流，所以 PN 结的正向电阻较小。

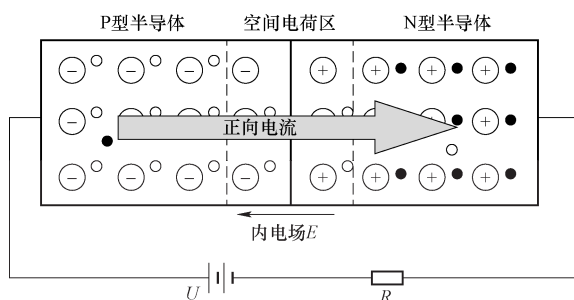


图 1-11 外加正向电压时的 PN 结

**N 区接电源正极，P 区接电源负极**，这种接法叫做 PN 结外加反向电压，又叫反向偏置，简称**反偏**，如图 1.12 所示。这时外加电压在耗尽层中建立的外电场与内电场方向一致，增强了内电场，使空间电荷区加宽，多数载流子的扩散运动难以进行，但有利于少数载流子的漂移运动。在外电场的作用下，N 区的少数载流子空穴越过 PN 结进入 P 区，P 区的少数载流子自由电子越过 PN 结进入 N 区，形成了漂移电流，这个电流由 N 区流向 P 区，故称为反向电流。由于少数载流子浓度很小，即使它们全部漂移，其反向电流还是很小的，PN 结基本上可认为不导电，处于截止状态。此时的电阻称为反向电阻，它的数值很大。

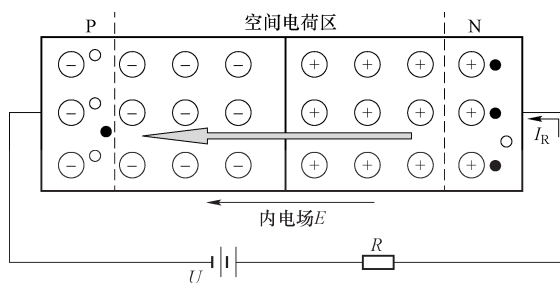


图 1.12 外加反向电压时的 PN 结

简而言之，PN 结加正向电压（正偏）时，具有较大的正向扩散电流，呈现低电阻，PN 结导通；PN 结加反向电压（反偏）时，具有很小的反向漂移电流，呈现高电阻，PN 结截止，这就是 PN 结的单向导电性，也即为二极管的单向导电性。利用二极管的单向导电性可以判定二极管的好坏，二极管正向电阻与反向电阻相差越大，二极管特性越好，阻值相同或者相近则表明二极管已损坏。

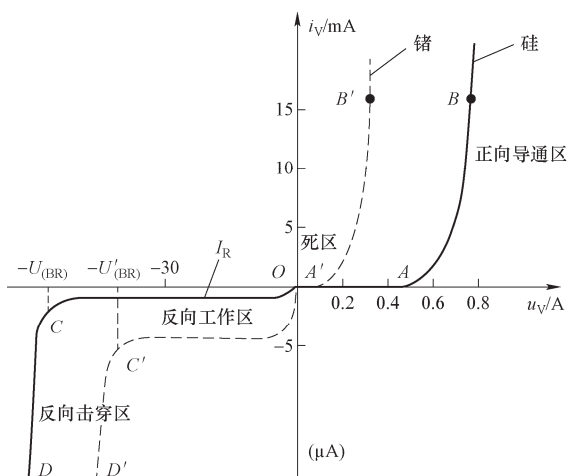


图 1.13 硅管和锗管的伏安特性曲线

正向特性的“死区”，相应地  $A$  ( $A'$ ) 点的电压称为死区电压（阈值电压），其大小与材料和温度有关。图 1.13 中实线和虚线分别为硅材料和锗材料的伏安特性曲线，从图中可以看出，硅管的死区电压约为  $0.5\text{ V}$ ，锗管的死区电压约为  $0.1\text{ V}$ 。当正向电压大于阈值电压后，电路的电流逐渐增大，二极管进入导通状态。当输入电压大于某值以后，电流急剧增大，二极管完全导通，这个电压值称为导通压降，硅管的导通压降为  $0.6\sim 0.8\text{ V}$ ，锗管的导通压降为  $0.2\sim 0.3\text{ V}$ 。

② 反向特性。从图 1.13 所示的反向伏安特性曲线可以看出，当反向电压小于击穿电压  $U_{\text{BR}}$  时，电路中仅有很小的  $\mu\text{A}$  级反向饱和电流  $I_{\text{R}}$ ，二极管处于反向截止状态，呈现很大的电阻，且此时的反向饱和电流几乎不随反向电压的增大而变化，仅与二极管的材料和温度有关。当所加反向电压进一步增大后，二极管的反向电流急剧增大，进入反向击穿区。普通二极管进入反向击穿区后就会损坏，其性能是不可逆的，所以在正常使用时要避免二极管工作到

(2) 二极管的伏安特性。

二极管的伏安特性是指二极管两端所加电压大小与流经二极管电流大小之间的关系曲线。图 1.13 所示为通过测试得到的二极管的伏安特性曲线。注意，为了使曲线清晰，横轴所代表的电压在  $U > 0$  和  $U < 0$  两部分采用不同比例，纵轴所代表的电流在  $I > 0$  和  $I < 0$  两部分采用不同的单位。二极管伏安特性曲线分为正向特性曲线和反向特性曲线，且正反向导电性能差异很大。

① 正向特性。正向特性曲线起始部分（图 1.13 中  $OA$  段、 $OA'$  段）变化很平缓，说明正向电压较小时，正向电流几乎为零，此时二极管处于不导通状态，这一部分称为正向特性的“死区”，

此区域。

造成二极管反向击穿的原因有两个：一个是齐纳击穿；另一个是雪崩击穿。当二极管工作在反向击穿区时，这两种击穿几乎都是同时存在的，只不过对于不同的二极管，起主要作用的击穿原因不同而已。

③ 硅管和锗管特性的比较。比较图 1.13 中硅管和锗管的伏安特性曲线，正向特性曲线中，锗管的死区电压和导通压降比硅管小些，更容易克服死区进入导通状态；反向特性曲线中，锗管的反向饱和电流比硅管大很多（小功率硅管的反向电流一般小于  $0.1\mu\text{A}$ ，锗管通常为几十  $\mu\text{A}$ ）。总结二极管的正反向特性，硅管材料更接近理想的开关特性，常用的二极管都采用硅材料构成。

### （3）温度对二极管特性的影响。

由于二极管主要由 PN 结构成，而半导体具有热敏性，二极管的特性对温度很敏感。温度升高时，扩散运动加强，多数载流子运动加剧，正向电流增大，二极管正向特性曲线向左移动，正向压降减小；如果外加的是反向电压，温度升高时，本征激发的少数数目增多，运动加剧，则反向漂移电流增大，反向特性曲线向下移动。温度对二极管伏安特性曲线的影响如图 1.14 所示。

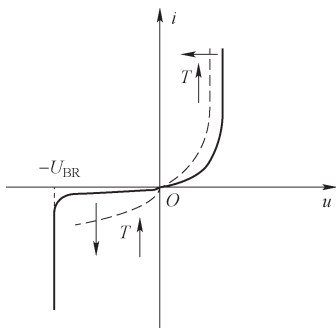


图 1.14 温度对二极管伏安特性曲线的影响

## 自测习题

### 1. 判断

- (1) 半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。( )
- (2) N 型半导体的多子是空穴，少子是电子。( )
- (3) 半导体对外呈现电中性。( )
- (4) 半导体中多子的扩散运动和少子的漂移运动最终会达到静止状态。( )
- (5) 二极管的 P 极接外加电源的正极，N 极接外加电源的负极，二极管一定导通。( )



自测习题答案

### 2. 填空

- (1) 半导体导电时有两种载流子参与导电，分别是\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。半导体导电能力受环境\_\_\_\_\_的影响。半导体具有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_特性。
- (2) PN 结外加正向电压，PN 结\_\_\_\_\_；PN 结外加反向电压，PN 结\_\_\_\_\_。PN 结具有\_\_\_\_\_导电性。二极管内部由\_\_\_\_\_组成；二极管具有\_\_\_\_\_导电性。
- (3) 关于二极管的导通压降，硅管\_\_\_\_\_，锗管\_\_\_\_\_。
- (4) 关于二极管的死区电压，硅管\_\_\_\_\_，锗管\_\_\_\_\_。
- (5) 二极管的伏安特性曲线的正向部分在环境温度升高的时候将\_\_\_\_\_。

## 1.1.2 分析二极管应用电路

### 知识储备

二极管是一种非线性器件，严格分析二极管电路需要采用非线性电路的分析方法。为了简化分析，常常采用其等效电路模型进行近似估算。在不同的条件下，应该采用不同的等效电路模型进行分析，常用的等效电路模型主要包括以下3种。

#### (1) 理想模型。

二极管的理想模型是指把二极管当作开关使用。当处于**正向偏置时**，二极管导通，其正向电阻很小，可忽略不计，**相当于开关闭合**；当处于**反向偏置时**，二极管截止，其反向电阻为无穷大，**相当于开关断开**。理想的二极管伏安特性曲线及等效电路如图 1.15 所示。在实际电路中，当电源电压远大于二极管的导通压降时，可以利用此模型近似分析电路。

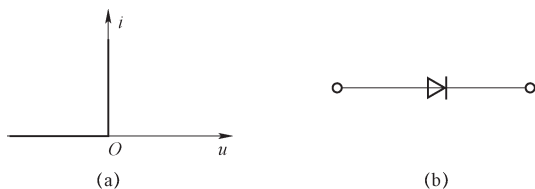


图 1.15 理想模型伏安特性曲线及等效电路

(a) 伏安特性；(b) 等效电路

#### (2) 恒压降模型。

在实际电路中，当电源电压没有远大于二极管的导通压降时，理想模型不准确，需要其他电路模型代替理想模型。二极管导通时，只要流经二极管的电流大于 1 mA，其**管压降**可认为是一个恒定值，不随电流而变化，**硅管的典型值为 0.7 V**，**锗管的典型值为 0.3 V**，其伏安特性曲线及等效电路如图 1.16 所示。

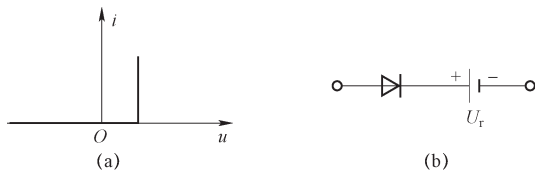


图 1.16 恒压降模型伏安特性曲线及等效电路

(a) 伏安特性；(b) 等效电路

#### (3) 折线模型。

为了更精确地描述二极管的非线性特性，二极管的管压降不再认为是恒定值，而是随着电流增加而增加，在模型中用等效直流电源和一个电阻来近似二极管的非线性特性，这种模型称为折线模型，其伏安特性曲线及等效电路如图 1.17 所示。

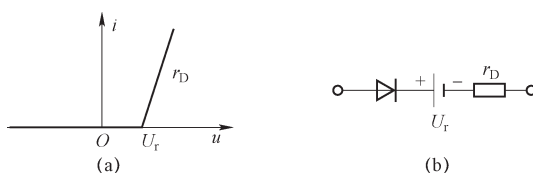


图 1.17 折线模型伏安特性曲线及等效电路

(a) 伏安特性; (b) 等效电路

### 1. 限幅电路分析

限幅电路也称为削波电路，它是一种能把输入电压的变化范围加以限制的电路，常用于波形变换和整形。下面以图 1.18 所示电路为例分析电路的工作原理。

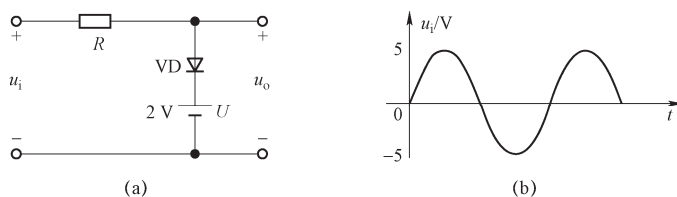


图 1.18 限幅电路示例

(a) 限幅电路; (b) 输入波形

图 1.18 中电源电压没有远大于二极管的导通压降，所以选择恒压降模型比较准确。假设二极管为硅管，导通压降为  $0.7\text{V}$ ，根据二极管的单向导电性，当二极管阳极电位高于阴极电位  $0.7\text{V}$  时，二极管导通，输出电压被钳制在  $2.7\text{V}$ ；当二极管阳极电位低于阴极电位时，二极管截止，回路中不存在电流，电阻  $R$  上无压降，输出电压与输入电压相同。分析二极管电路，往往按二极管导通条件将输入信号分为几个区间一一进行讨论。

输入  $2.7\text{V} \leq u_i \leq 5\text{V}$  时，二极管导通， $u_o = 2.7\text{V}$ ；输入  $-5\text{V} < u_i < 2.7\text{V}$  时，二极管截止， $u_o = u_i$ ，画出输出波形如图 1.19 所示。

### 2. 电平选择电路分析

从多路输入信号中选出最低或最高电平的电路称为二极管电平选择电路。电平选择电路中往往包括多个二极管，这就涉及“优先权”这个非常重要的概念。下面以图 1.20 所示电路为例进行介绍。设二极管正向压降为  $0.7\text{V}$ ，分析不同输入信号时输出电压应为多大。

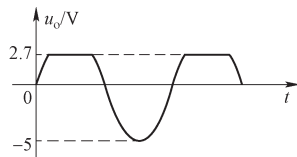


图 1.19 限幅电路输出波形

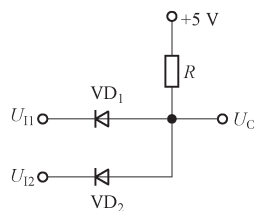


图 1.20 电平选择电路示例



二极管限幅电路的仿真分析

分析时，可先假设二极管断开，然后判断加在二极管两端的正向电压（即阳极、阴极之间电压）是否大于导通电压，若大于导通电压，则二极管导通；否则二极管截止。

(1) 当  $U_{i1} = 0\text{V}$ 、 $U_{i2} = 0\text{V}$  时，假设两二极管截止，电路中无电流，则  $\text{VD}_1$  阳极端电位

$U_O$  为 5 V,  $VD_1$  两端加的正向电压为  $U_O - U_{I1} = 5\text{ V}$ , 大于导通电压,  $VD_1$  导通。同理,  $VD_2$  也导通。输出  $U_O = 0.7\text{ V}$ , 见表 1.1。

表 1.1 电平分析

$U_{I1}/\text{V}$	$U_{I2}/\text{V}$	$U_O/\text{V}$
0 (“0”)	0 (“0”)	0.7 (“0”)
0 (“0”)	3 (“1”)	0.7 (“0”)
3 (“1”)	0 (“0”)	0.7 (“0”)
3 (“1”)	3 (“1”)	3.7 (“1”)

(2) 当  $U_{I1} = 0\text{ V}$ 、 $U_{I2} = 3\text{ V}$  时, 两个二极管都具备导通条件。如果需要  $VD_1$  导通,  $U_O$  至少为 0.7 V; 如果需要  $VD_2$  导通,  $U_O$  至少为 3.7 V。因为  $VD_1$  导通需要的条件较低, 所以  $VD_1$  优先导通。 $VD_1$  导通后, 输出  $U_O$  被钳制在 0.7 V,  $VD_2$  阳极电位小于阴极电位, 自动进入截止状态。

(3) 当  $U_{I1} = 3\text{ V}$ 、 $U_{I2} = 0\text{ V}$  时, 分析过程同 (2), 此时  $VD_2$  优先导通, 输出被钳制在 0.7 V,  $VD_1$  进入截止状态。

(4) 当  $U_{I1} = U_{I2} = 3\text{ V}$  时,  $VD_1$  和  $VD_2$  同时导通,  $U_O = 3.7\text{ V}$ 。

可见, 输出与输入之间是逻辑与的关系。因此, 当输入为数字量时, 图 1.20 所示的电平选择电路也称为与门电路。

将图 1.20 所示电路中的  $VD_1$  与  $VD_2$  反接, 将电源电压改为负值, 则变为高电平选择电路。如果输入也为数字量, 则该电路就变为或门电路。

### 3. 二极管主要参数

无论是电路设计还是电子设备的维修, 元器件的选择都是一个需要面对的问题。在整流电路中, 最重要的就是选择合适的二极管。二极管的特性可以用它的参数来表示, 参数是正确使用和选择二极管的依据, 在半导体手册中可以查到每种型号元器件的相关参数。二极管的主要参数包括以下几个。

#### 1) 最大整流电流 $I_F$

最大整流电流  $I_F$  是指二极管允许通过的最大正向平均电流。当电流超过  $I_F$ , 二极管将会因为过热而烧毁。

#### 2) 最大反向工作电压 $U_{RM}$

最大反向工作电压  $U_{RM}$  是指二极管允许的最大工作电压。当反向电压超过此值时, 二极管可能被击穿。为了留有余地, 保证二极管的正常工作, 通常取击穿电压的一半作为  $U_{RM}$ , 即留有一倍的余量。

#### 3) 反向饱和电流 $I_R$

反向饱和电流  $I_R$  又称最大反向电流, 是指二极管在最高反向工作电压下允许流过的反向电流。 $I_R$  越小, 说明管子的单向导电性越好, 即二极管工作在反偏状态时越接近理想的开关断开状态。 $I_R$  的大小只与温度有关系, 温度越高,  $I_R$  越大, 所以使用时要注意温度的影响。