



“十四五”职业教育国家规划教材

高等职业教育新业态新职业新岗位系列教材

用微课学·模拟电子技术 项目教程（第2版）

周继彦 何飞勇 郑婵娟 主 编

金 艳 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以实际生产中的产品——光控电子开关电路、直流稳压电源、分压式工作点稳定放大器、MOS 管开关电路、助听器、音调调节电路、功率放大电路和正弦波振荡电路的制作与调试过程为导向,采用基于工作过程的教学方式,遵循由浅入深、循序渐进的教学规律,将全书分为 8 个项目,每个项目都包含项目引入、学习目标、相关知识、项目实施、项目总结、思考与练习 6 个环节,每个项目的完成都是对必备理论知识和实践技能的综合运用过程。

本书以培养学生的应用能力为主线,本着“融入思政教育、融通岗课赛证、突出实践操作、结合创新应用、数字化教与学”的原则,着重加强学生的电子技术应用能力和再学习能力。

本书可作为高职高专院校现代通信技术、电子信息技术、应用电子技术、电气自动化、智能机器人等专业“模拟电子技术”课程的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

用微课学·模拟电子技术项目教程 / 周继彦, 何飞勇, 郑婵娟主编. -- 2 版. -- 北京: 电子工业出版社,

2025. 6. -- ISBN 978-7-121-50221-7

I. TN710

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025K4Y312 号

责任编辑: 王昭松

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 12 字数: 307 千字

版 次: 2019 年 1 月第 1 版

2025 年 6 月第 2 版

印 次: 2025 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 52.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254015, wangzs@phei.com.cn, QQ83169290。

PREFACE

前言

“模拟电子技术”是高职高专电子类、机电类、计算机类等工科类专业学生必修的一门重要专业基础课，旨在培养学生识别与选用模拟电子元器件、认识和分析模拟电子技术基本单元电路及灵活运用于实际工程的能力。通过对本课程的学习，学生将了解电子技术的发展方向和应用领域，以适应电子技术发展的形势，为后续专业课程的学习和从事与本课程有关的工程技术工作打好基础。

本书为“十三五”“十四五”国规教材的修订版，依据教育部高职高专教育模拟电子技术集成课程教学基本要求编写而成，本着“融入思政教育、融通岗课赛证、突出实践操作、结合创新应用、数字化教与学”的原则，以电子工程师职业岗位训练为主体，打破传统的学科体系教学模式，以从企业典型工作任务中提炼出来的项目为学习载体，重新整合了教学内容。本书按照项目化教学模式，结合实际电路介绍模拟电子技术的基础知识和基本技能，并运用所学的理论知识对各类产品电路进行分析、设计、仿真、组装和调试，注重对学生职业能力、设计能力和创造能力的培养，促进学生职业技能的提高。

本书在编写过程中力求突出如下特点。

(1) 采用项目化教学模式，以典型的电子产品的制作过程为导向，将理论知识与实践技能紧密结合，提高学生解决问题的能力。

(2) 内容安排遵循由浅入深、循序渐进的教学规律，从半导体器件到基本放大电路，逐步深入到集成运算放大器的复杂电路的制作与调试，使学生能够逐步建立起完整的知识体系。

(3) 每个项目都设定了明确的学习目标，并围绕这些目标进行了精细的教学设计，包含项目引入、学习目标、相关知识、项目实施、项目总结、思考与练习 6 个环节。

(4) 引入了形式直观、生动的微课视频等数字化资源，有助于学生更好地理解和掌握相关知识和技能，同时符合现代学生的学习习惯，方便学生随时随地进行学习。

(5) 以工作手册的形式编写，每个项目都包含了详细的操作步骤、电路图、元器件清单及测试方法等内容。学生可以根据书中的指导逐步完成项目的制作与调试，教师也可方便地

融入团队协作、安全意识等思政元素。

(6) 思考与练习环节参照“1+X”集成电路开发与测试职业技能等级证书考试指南的应知考评要求编写, 选用了题库中模拟电路部分的习题, 为学生参加证书考试打下基础, 并增加了具有实用价值和有利于增强分析问题、解决问题能力的题目。

本书由广东科学技术职业学院的周继彦、何飞勇、郑婵娟担任主编, 中国电信股份有限公司珠海拱北分公司的高级工程师金艳担任副主编。其中项目 1~3 由周继彦编写; 项目 4~6 由何飞勇编写; 项目 7、8 由郑婵娟编写; 金艳对岗位需求的知识和技能进行了归纳和总结; 周继彦设计和录制了微课视频等数字化资源, 并对全书进行了统稿和校对。

在本书编写过程中, 参考了大量的同类书籍和行业相关资料, 在此向相关作者表示谢意。由于编者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 恳请广大读者批评指正!

编 者

电子工业出版社版权所有
盗版必究

CONTENTS

目 录

项目 1 光控电子开关电路的制作与调试	(1)
项目引入	(1)
学习目标	(1)
相关知识	(1)
1.1 半导体基础知识	(1)
1.1.1 本征半导体和杂质半导体	(2)
1.1.2 PN 结	(3)
1.2 二极管	(6)
1.2.1 二极管的结构、分类和特性	(6)
1.2.2 二极管的主要参数	(8)
1.2.3 二极管电路分析方法	(9)
1.2.4 特殊的二极管	(12)
项目实施	(14)
步骤 1: 光控电子开关电路的组成	(14)
步骤 2: 电路仿真及分析	(14)
步骤 3: 主要元器件的识别和测试	(15)
步骤 4: 电路安装与调试	(18)
项目总结	(19)
思考与练习	(20)
项目 2 直流稳压电源的制作与调试	(22)
项目引入	(22)
学习目标	(23)
相关知识	(23)
2.1 单相整流电路	(23)
2.1.1 单相半波整流电路	(23)
2.1.2 桥式整流电路	(24)
2.2 滤波电路	(26)
2.2.1 电容滤波电路	(26)

2.2.2 其他类型的滤波电路·····	(29)
2.3 稳压电路·····	(30)
2.3.1 稳压二极管稳压电路·····	(30)
2.3.2 集成稳压电路·····	(31)
项目实施·····	(34)
步骤 1: 1.25~27V 可调直流稳压电源的组成·····	(34)
步骤 2: 电路仿真及分析·····	(35)
步骤 3: 电路安装与调试·····	(38)
项目总结·····	(38)
思考与练习·····	(39)
项目 3 分压式工作点稳定放大器的制作与调试 ·····	(42)
项目引入·····	(42)
学习目标·····	(42)
相关知识·····	(42)
3.1 三极管·····	(42)
3.1.1 三极管的结构与电流放大作用·····	(43)
3.1.2 三极管的共射特性曲线·····	(45)
3.1.3 三极管的主要参数·····	(47)
3.2 三极管放大电路·····	(49)
3.2.1 放大电路的主要性能指标·····	(49)
3.2.2 基本共发射极放大电路·····	(50)
3.2.3 放大电路的分析方法·····	(53)
3.2.4 分压偏置式共发射极放大电路·····	(60)
3.2.5 共集电极放大电路·····	(64)
3.2.6 共基极放大电路·····	(67)
项目实施·····	(68)
步骤 1: 分压式工作点稳定放大器的设计方案·····	(68)
步骤 2: 电路仿真及分析·····	(69)
步骤 3: 三极管的识别与检测·····	(71)
步骤 4: 常用电子仪器仪表的使用练习·····	(72)
步骤 5: 电路安装与调试·····	(75)
项目总结·····	(75)
思考与练习·····	(76)
项目 4 MOS 管开关电路的制作与调试 ·····	(82)
项目引入·····	(82)
学习目标·····	(82)
相关知识·····	(82)

4.1 场效应管	(82)
4.1.1 场效应管的结构和工作原理	(83)
4.1.2 场效应管的主要参数	(85)
4.1.3 场效应管放大电路	(86)
4.1.4 MOS 管开关电路	(89)
项目实施	(91)
步骤 1: MOS 管开关电路的设计方案	(91)
步骤 2: 电路仿真及分析	(92)
步骤 3: 电路安装与调试	(92)
项目总结	(93)
思考与练习	(93)
项目 5 助听器的制作与调试	(95)
项目引入	(95)
学习目标	(95)
相关知识	(96)
5.1 多级放大电路	(96)
5.1.1 多级放大电路的耦合方式	(96)
5.1.2 多级放大电路的分析	(97)
5.2 放大电路中的反馈	(100)
5.2.1 反馈的基本概念及类型判断	(100)
5.2.2 负反馈对放大电路性能的改善	(103)
5.2.3 负反馈放大电路的四种组态	(105)
5.2.4 深度负反馈的近似估算	(106)
项目实施	(108)
步骤 1: 助听器电路的组成	(108)
步骤 2: 电路仿真及分析	(109)
步骤 3: 电路安装与调试	(110)
项目总结	(111)
思考与练习	(111)
项目 6 音调调节电路的制作与调试	(114)
项目引入	(114)
学习目标	(114)
相关知识	(115)
6.1 差动放大电路	(115)
6.1.1 直接耦合放大电路的零点漂移现象	(115)
6.1.2 基本差动放大电路的组成及工作原理	(115)
6.1.3 差动放大电路的输入、输出方式	(116)

6.1.4 差动放大电路的改进电路	(118)
6.2 集成运算放大器	(118)
6.2.1 集成运算放大器的组成	(118)
6.2.2 集成运算放大器的主要性能指标、选择方法及在使用中的一些问题	(119)
6.3 集成运算放大器的应用	(121)
6.3.1 集成运算放大器的线性应用分析	(122)
6.3.2 集成运算放大器的非线性应用分析	(129)
项目实施	(131)
步骤 1: 音调调节电路的设计方案	(131)
步骤 2 电路仿真及分析	(133)
步骤 3: 电路安装与调试	(135)
项目总结	(135)
思考与练习	(135)
项目 7 功率放大电路的制作与调试	(140)
项目引入	(140)
学习目标	(140)
相关知识	(140)
7.1 功率放大电路概述	(140)
7.1.1 功率放大电路的特点	(141)
7.1.2 功率放大电路的分类	(141)
7.1.3 功率放大电路的分析方法	(142)
7.1.4 提高输出功率及转换效率的方法	(143)
7.2 常用功率放大电路	(143)
7.2.1 OCL 乙类双电源互补对称功率放大电路	(143)
7.2.2 OCL 甲乙类双电源互补对称功率放大电路	(146)
7.2.3 OTL 功率放大电路	(147)
7.3 集成功率放大器	(148)
7.3.1 LM386 及其应用	(148)
7.3.2 TDA2030A 及其应用	(149)
项目实施	(151)
步骤 1: 功率放大电路的设计方案	(151)
步骤 2: 电路仿真及分析	(152)
步骤 3: 电路安装与调试	(154)
项目总结	(154)
思考与练习	(154)
项目 8 正弦波振荡电路的制作与调试	(158)
项目引入	(158)

学习目标	(158)
相关知识	(159)
8.1 正弦波振荡的基础知识	(159)
8.1.1 产生正弦波振荡的条件	(159)
8.1.2 振荡电路起振和稳幅的实现过程	(160)
8.1.3 正弦波振荡电路的组成和分类	(160)
8.1.4 正弦波振荡电路的分析方法	(161)
8.2 常用正弦波振荡电路	(161)
8.2.1 RC 桥式正弦波振荡电路	(161)
8.2.2 LC 正弦波振荡电路	(163)
8.2.3 石英晶体正弦波振荡电路	(165)
项目实施	(167)
步骤 1: 正弦波振荡电路的设计方案	(167)
步骤 2: 电路仿真及分析	(168)
步骤 3: 电路安装与调试	(169)
项目总结	(170)
思考与练习	(170)
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	(173)
附录 B 常用半导体二极管型号和主要参数	(175)
附录 C 常用三极管的型号、功能和主要参数	(178)
参考文献	(181)

光控电子开关电路的制作与调试

项目引入

在许多电子设备或控制设备中，需要用到光控电子开关电路，如电视遥控器对电视机电源/声音/图像等信号的开关控制、汽车光控防盗锁、路灯自动照明控制等都采用了光控电子开关电路。光控电子开关电路不仅克服了机械开关寿命短、可靠性差等缺点，还避免了人直接接触较危险的强电设备，大大提高了操作的安全性。

需要指出的是，在实际应用中，为防止误触发或控制多路开关，通常要对光控信号进行编码，因此实际应用电路设计往往比书里介绍的电路设计复杂得多。

包括光控电子开关电路在内的绝大部分电子电路都要用到半导体二极管（简称二极管），由于二极管是各种半导体器件及其应用电路的基础，因此首先通过本项目学习二极管的基本特性。

学习目标

知识目标	技能目标	素养目标
1. 了解二极管的结构、电路符号、分类和主要参数。 2. 理解二极管的单向导电性、电容效应、温度特性等。 3. 掌握二极管的基本应用和分析方法。	1. 能用万用表对电阻、二极管等常用元件进行检测。 2. 能查阅半导体器件手册。 3. 能对光控电子开关电路进行安装与测试。 4. 能判断和处理简单的电路故障。	1. 引导学生关注行业动态和技术发展,培养他们的前瞻性和创新能力。 2. 在制作与调试过程中,培养学生的团队协作意识和沟通能力。 3. 培养学生的问题意识和解决问题的能力。

相关知识

1.1 半导体基础知识

自然界的物质按导电性能来分，可分为导体、绝缘体和半导体。自然界中常见的铜、铁、

铝等金属材料都是良好的导体，而陶瓷、水泥、橡胶等都是良好的绝缘体。半导体是导电能力介于导体与绝缘体之间的一类物质，常用的半导体材料有硅（Si）和锗（Ge）等。

半导体被用来制造电子元器件，是因为它的导电能力在外界某些因素作用下会发生显著的变化，主要体现在以下3个方面。

（1）杂敏特性。半导体的电导率会因加入杂质而发生显著的变化。例如，在室温下，纯硅中加入杂质，其电导率会增加几百倍。各种不同元器件的制作，利用的正是掺杂来改变和控制半导体的电导率。

（2）热敏特性。温度的变化也会使半导体的电导率发生显著的变化，人们利用这种热敏特性制作出了热敏元件。但是，热敏特性会使半导体元器件的热稳定性下降，所以应采取有效措施抑制因半导体元器件热敏特性造成的电路不稳定性。

（3）光敏特性。光照不仅可以改变半导体的电导率，还可以产生电动势，这种现象统称为半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光敏晶体管、光耦合器和光电池等。

1.1.1 本征半导体和杂质半导体

1. 本征半导体

纯净的具有晶体结构的半导体称为本征半导体。半导体元器件的制造首先要有本征半导体。

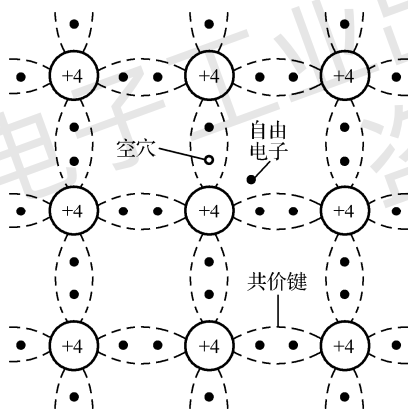


图 1-1 本征半导体的共价键结构

（1）本征半导体是晶体结构。本征半导体是指通过复杂的工艺和技术将纯净的半导体制成单晶体。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 1-1 所示。图中标有“+4”的圆圈表示除价电子外的正离子。

（2）本征半导体中有两种载流子。晶体中的共价键具有很强的结合力，在常温下，本征半导体中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，失去价电子的硅或锗原子在该共价键上留下一个空位，这个空位称为空穴。原子因失掉一个价电子而带正电（或者说空穴带正电）。由于本征硅（或锗）每产生一个自由电子必然会有一个空穴出现，即电子与空穴成对出现，所以称为电子空穴对，如图 1-1 所示。

当本征半导体处于外界电场作用下时，一方面其内部的自由电子逆外电场方向定向运动，形成电场作用下的漂移电子电流；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，相当于空穴顺外电场方向定向运动，形成电场作用下的漂移空穴电流。自由电子带负电荷，空穴带正电荷，它们都对形成电流做出贡献，因此本征半导体中有两种载流子，即自由电子和空穴。本征半导体在外电场作用下，其电流为电子流与空穴流之和。

在常温下，本征半导体内的电子、空穴成对出现，且数量少，因此本征半导体的导电能力比较弱。

2. 杂质半导体

本征半导体的导电能力很弱，为了提高半导体的导电能力，可以人为地掺入杂质构成杂质半导体。控制掺入杂质的浓度就可以控制杂质半导体的导电性能，按照掺入的杂质元素不同，可分别形成 P 型半导体和 N 型半导体。

(1) P 型半导体。如果在本征半导体中掺入微量三价元素，如硼 (B)、镓 (Ga) 等，那么就形成了 P 型半导体。例如，在硅本征半导体中掺入三价元素硼 (B)，由于最外层有三个价电子，所以当它们与周围四个硅原子形成共价键时，就产生一个空位，在室温或其他能量激发下，与硼原子相邻的硅原子共价键上的电子就可能填补这些空位，从而在电子原来的位置上形成带正电的空穴，硼原子本身则因获得电子而被称为受主原子，如图 1-2 (a) 所示。

在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，简称“多子”，电子是少数载流子，简称“少子”。P 型半导体在外界电场作用下，空穴电流远大于电子电流。P 型半导体是以空穴导电为主的半导体，所以它又被称为空穴型半导体。

(2) N 型半导体。如果在本征半导体中掺入微量五价元素，如磷 (P)、砷 (As) 等，那么其中杂质元素的四个价电子与周围的四个半导体原子形成共价键，第五个价电子很容易脱离原子核的束缚成为自由电子，杂质元素因提供一个电子而被称为施主原子，这种半导体叫作 N 型半导体，如图 1-2 (b) 所示。

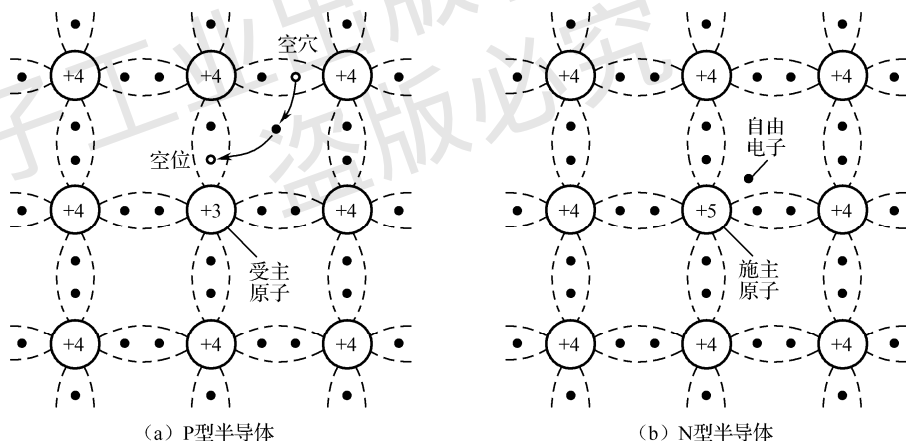


图 1-2 P 型半导体和 N 型半导体示意图

在 N 型半导体中，自由电子数远大于空穴数，所以 N 型半导体的多子是自由电子，少子是空穴。N 型半导体在外界电场作用下，电子电流远大于空穴电流。N 型半导体是以电子导电为主的半导体，所以它又被称为电子型半导体。

半导体中多子的浓度取决于掺入杂质的多少，少子的浓度与温度有密切的关系。

1.1.2 PN 结

单纯的一块 P 型半导体或 N 型半导体，只能作为一个电阻元件。但如果把 P 型半导体和 N 型半导体通过一定方法结合起来，那么就形成了 PN 结。PN 结是构成二极管、三极管、晶闸管及集成运算放大器等众多半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体结合后,在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差。由于电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散,所以有一些电子要从 N 区向 P 区扩散,同时也有一些空穴从 P 区向 N 区扩散,如图 1-3 所示。



(微课视频:PN 结的形成)

扩散到 P 区的电子与空穴复合,扩散到 N 区的空穴与电子复合,随着扩散的进行,在界面附近的 P 区中空穴数大量减少,出现了带负电的离子区;而在 N 区一侧因缺少电子,显露出带正电的离子区。半导体中的离子虽然也带电,但由于物质结构的关系,它们不能任意移动,所以并不参与导电。这些不能移动的带电离子通常称为空间电荷,它们在交界面上形成一个很薄的空间电荷区。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方区域并复合掉了(或者说耗尽了),因此该空间电荷区又叫耗尽层,如图 1-4 所示。

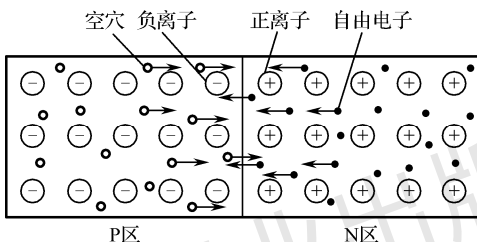


图 1-3 载流子的扩散

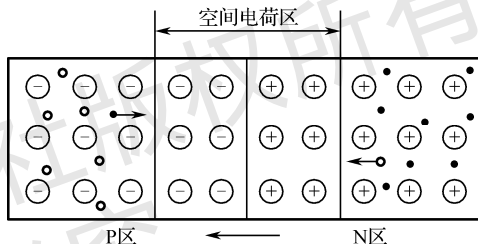


图 1-4 PN 结的形成

在出现了空间电荷区后,由于正、负电荷之间的相互作用,在空间电荷区中形成了一个电场,其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。由于这个电场是由载流子扩散运动形成的,故称为内电场。

PN 结的内电场是阻止扩散的,因为这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反,所以空间电荷区又可被看作一个阻挡层,它对多数载流子的扩散有阻挡作用。另外,根据电场的方向和电子、空穴的带电极性还可以看出,这个电场将使 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移,使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移,漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。当多数载流子扩散和少数载流子漂移达到动态平衡时,它们的作用大小相等、方向相反、相互抵消,外部(宏观)不显现电流现象。



(微课视频:为什么 PN 结具有单向导电性)

2. PN 结的单向导电性

(1) 外加正向电压。如图 1-5 所示,在 PN 结上外加正向电压 U_0 ,即 U_0 的正端接 P 区,负端接 N 区,这个方向的外加电压称为正向电压或正向偏置电压,简称正偏。外电场与 PN 结的内电场方向相反,外电场会削弱内电场的作用,所以 PN 结变窄,即阻挡层的厚度变小,这时多子的扩散运动将大于漂移运动。结内的电流便由起支配地位的扩散电流所决定,在外电路上形成一个流入 P 区的电流,称为正向电流 I_F 。当外加正向电压 U_0 升高时,PN 结内的电场便进一步减弱,扩散电流随之增大。在正常工作范围内,PN 结上的外加正向电压只要稍有变化,便能引起电流的显著变化。这样,正向的 PN 结表现为一个很小的电阻。

(2) 外加反向电压。如图 1-6 所示, 在 PN 结上外加反向电压 U_0 , 即 U_0 的正端接 N 区, 负端接 P 区, 这个方向的外加电压称为反向电压或反向偏置电压, 简称反偏。外电场与 PN 结的内电场方向相同, 促进了内电场的作用, 使阻挡层厚度加大。这样, P 区和 N 区中的多数载流子就很难越过阻挡层, 因此扩散电流趋近于零。但由于内电场增强, 使 N 区和 P 区中的少数载流子更容易产生漂移运动, PN 结的电流就由起支配地位的漂移电流决定, 在外电路上就形成了一个流入 N 区的反向电流 I_s 。但由于少数载流子的浓度很低, 所以反向漂移电流很小, 而且少数载流子是由本征激发产生的, 当材料制成后, 其数值取决于温度。在一定温度下, 电压再高, 其值也几乎不变, 所以 PN 结在反向偏置时, 可认为基本上是不导电的, 表现为一个很大的电阻。

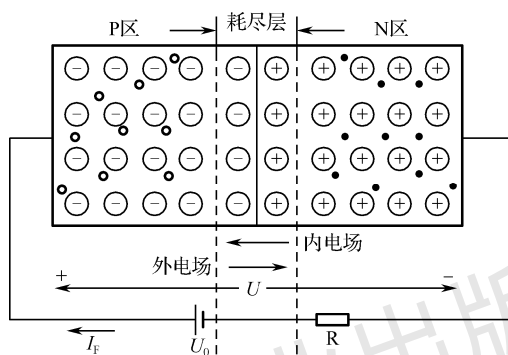


图 1-5 外加正向电压的 PN 结

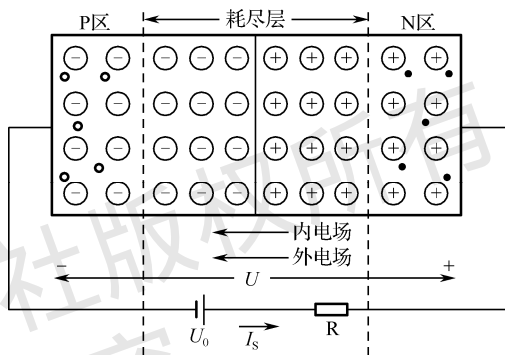


图 1-6 外加反向电压的 PN 结

由此可见, PN 结正向偏置时, 正向电阻很小, 形成较大的正向电流; PN 结反向偏置时, 呈现较大的反向电阻, 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 结上的反向电压增大到一定数值时, 反向电流会突然急剧增大, 这种现象称为 PN 结的反向击穿。电流开始剧增时对应的电压称为反向击穿电压。PN 结击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

雪崩击穿是指 PN 结内的少数载流子受强电场的加速作用而获得很大的能量, 当它与结内原子碰撞时, 把其中的价电子碰撞出来, 产生新的电子空穴对。新的电子空穴对在强电场的作用下, 再去碰撞其他的原子, 产生更多的电子空穴对, 如同雪崩一样。雪崩击穿的本质是碰撞电离, 易发生在掺杂浓度较低、外加电压较大的情况下。

齐纳击穿易发生在高浓度掺杂的 PN 结内。由于杂质浓度高, 故形成的 PN 结很窄, 即使外加反向电压不高 (5V 以下), 结内电场也非常强, 它可以把结内的束缚电子从共价键中拉出来引起反向电流的剧增。

在发生以上两种反向击穿时, 如果反向电压下降到击穿电压以下, 则 PN 结的性能仍能恢复到原来的状态, 称之为电击穿。但前提条件是反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结允许的散耗功率, 超过了就会因为热量散不出去而使 PN 结温度上升, 直到过热而烧毁, 这种现象就是热击穿。热击穿是不可恢复的, 在应用中应尽量避免。在有些情况下, 电击穿往往被人们利用, 如用于制作稳压管等。



(微课视频: 什么是雪崩击穿和齐纳击穿)

4. PN 结的电容效应

(1) 势垒电容。PN 结外加电压变化时，空间电荷区的宽度将发生变化，有电荷的积累和释放的过程，与电容的充放电相同，其等效电容称为势垒电容 C_b 。

(2) 扩散电容。PN 结外加的正向电压变化时，在扩散路程中载流子的浓度及其梯度均有变化，也有电荷的积累和释放的过程，其等效电容称为扩散电容 C_d 。

PN 结的结电容 C_j 为势垒电容和扩散电容的和，即

$$C_j = C_b + C_d \quad (1-1)$$

若 PN 结外加电压频率高到一定程度，则失去单向导电性。



(微课视频：什么是 PN 结的电容效应)

1.2 二极管

1.2.1 二极管的结构、分类和特性

1. 二极管的结构及分类

把一个 PN 结的两端接上电极引线，外面用金属（或玻璃、塑料）管壳封闭起来，便构成了二极管。P 端引出的电极为阳极（正极），N 端引出的电极为阴极（负极）。

二极管按照制造材料可分为硅二极管、锗二极管；按用途可分为整流二极管、稳压二极管、开关二极管和检波二极管等。

根据构造上的特点和加工工艺的不同，二极管又可分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。点接触型二极管 PN 结的接触面积小，不能通过很大的正向电流，也不能承受较高的反向电压，但它的高频性能好，工作频率可达 100MHz 以上，适于在高频检波电路和小功率电路中使用。面接触型二极管 PN 结的接触面积大，可以通过较大电流，能承受较高的反向电压，适于在整流电路中使用。平面型二极管是采用扩散法制成的，适用于大功率开关管，广泛应用于数字电路中。图 1-7 (a) ~ 图 1-7 (c) 所示为二极管的结构示意图，二极管的电路符号如图 1-7 (d) 所示。

2. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性就是流过二极管的电流 I_D 与加在二极管两端的电压 U_D 之间的关系曲线。它可通过测试电路（见图 1-8）测试出来，即分别在二极管两端加上正向电压和反向电压，改变电压数值的大小，同时测量流过二极管的电流值，就可得到二极管的伏安特性曲线。图 1-9 所示为二极管的伏安特性曲线。

(1) 正向特性。正向特性是指二极管加正向电压时的电流-电压关系。

死区：图 1-9 中的 OA 段，当外加正向电压较小时，正向电流非常小，近似为零。在这个区域内二极管实际上还没有导通，二极管呈现的电阻很大，故该区域常称为“死区”。硅二极

管的死区开启电压约为 0.5V ，锗二极管的死区开启电压约为 0.1V 。

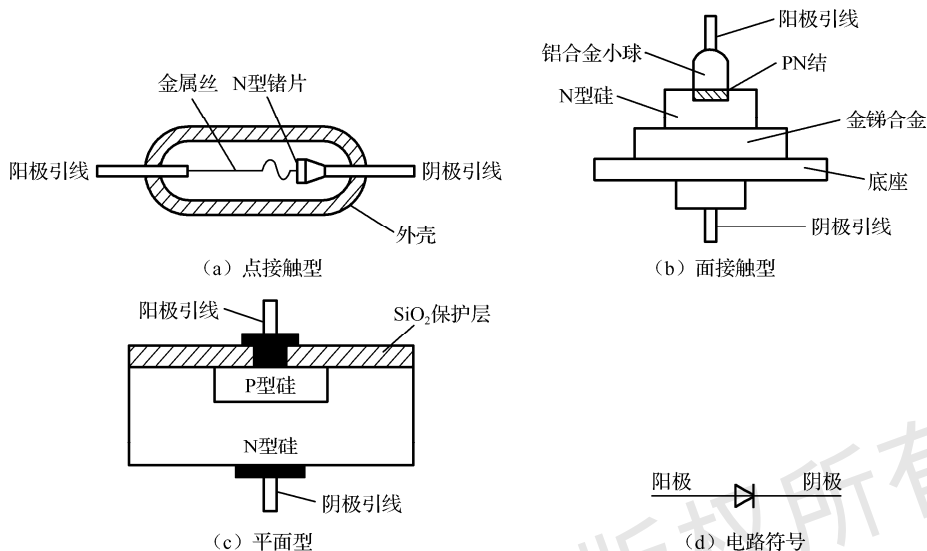


图 1-7 二极管的结构示意图及电路符号

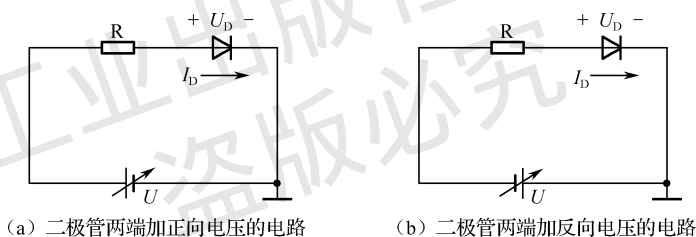


图 1-8 二极管的伏安特性测试电路

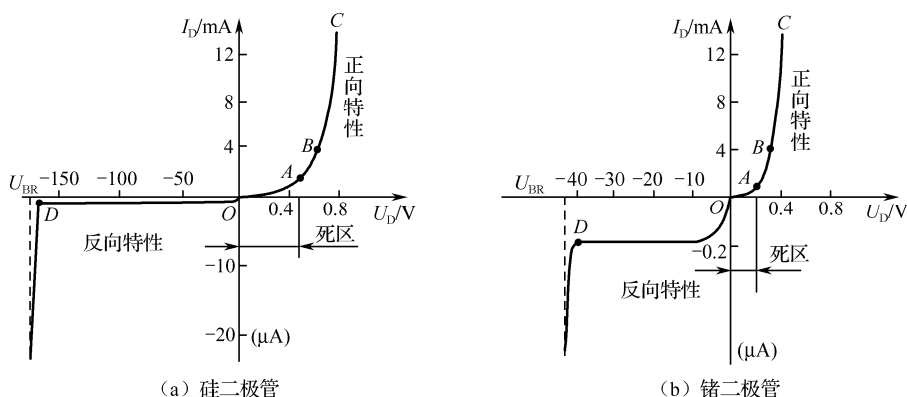


图 1-9 二极管的伏安特性曲线

正向导通区：过 A 点后，当外加正向电压超过死区电压后，正向电流开始增大，但电流与电压不成比例。当正向电压超过 B 点，即大于 0.6V 以后（对于锗二极管，此值约为 0.2V ），正向电流随正向电压增加而急速增大，基本上是直线关系。这时二极管呈现的电阻很小，可

以认为二极管处于充分导通状态。在该区域内,硅二极管的导通压降约为 0.7V,锗二极管的导通压降约为 0.3V。但是流过二极管的正向电流需要被限制,不能超过规定值,否则会使 PN 结过热而烧坏二极管。

(2) 反向特性。反向特性是指二极管加反向电压时的电流-电压关系。

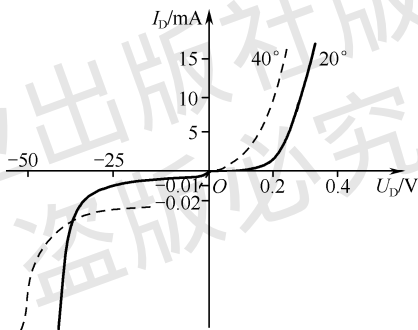
反向截止区:图 1-9 中 OD 段,在所加反向电压下,反向电流的值很小,且几乎不随电压的增加而增大,此电流被叫作反向饱和电流。此时二极管呈现很高的电阻,近似处于截止状态。硅二极管的反向饱和电流比锗二极管的反向饱和电流小,约在 $1\mu\text{A}$ 以下,锗二极管的反向饱和电流达几十微安甚至几毫安以上。这也是现在硅二极管应用比较多的原因之一。

反向击穿区:过 D 点以后,反向电压稍有增加,反向电流就急剧增大,这种现象称为反向击穿。二极管发生反向击穿时所加的电压叫作反向击穿电压。

综上所述,二极管的伏安特性是非线性的,因此二极管是一种非线性器件。在外加电压取不同值时,可以使二极管工作在不同的区域,从而充分发挥二极管的作用。

3. 二极管的温度特性

物质热运动的强度随温度的升高而增大,因而温度升高对二极管特性的影响是不容忽视的。图 1-10 所示为温度对二极管伏安特性的影响。



(微课视频:半导体二极管的温度特性)

图 1-10 温度对二极管伏安特性的影响

实验发现,随着温度升高,二极管的正向压降将减小,即二极管正向压降有负的温度系数,约为 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$;二极管的反向饱和电流随温度的升高而增大,温度每升高 10°C ,反向饱和电流约增大一倍,二极管的反向击穿电压随着温度升高而降低。

二极管的温度特性对电路的稳定是不利的,在实际应用中要加以抑制。但人们可以利用二极管的温度特性对温度的变化进行检测,从而实现对温度的自动控制。

4. 二极管的伏安特性表达式

理论和实验均可证明,二极管的伏安特性可近似表示为

$$i_D = I_S(e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1-2)$$

式中, i_D 为流过二极管的电流; I_S 为反向饱和电流; u_D 为外加电压; U_T 为温度的电压当量,当 $T=330\text{K}$ 时, $U_T=26\text{mV}$; e 为自然对数的底, $e \approx 2.71828$ 。

1.2.2 二极管的主要参数

器件参数是对器件性能的定量描述,是选择器件的依据。二极管的主要参数如下。

(1) 最大整流电流 I_{FM} 。它是二极管长期工作允许通过的最大正向平均电流。其大小取决于 PN 结的面积、材料和散热条件。一般二极管的 I_{FM} 值可达几毫安, 大功率二极管的 I_{FM} 值可达几安。工作电流不要超过 I_{FM} 值, 否则在长时间工作情况下, 二极管将因热击穿而烧毁。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。它是保证二极管不被反向击穿而规定的最大反向电压。一般手册中给出的最高反向工作电压约为击穿电压的一半, 以确保二极管安全运行。例如, 2AP1 的最高反向工作电压规定为 20V, 而反向击穿电压实际上大于 40V。

(3) 反向饱和电流 I_S 。它是二极管未击穿时的反向电流值。 I_S 越小, 二极管的单向导电性越好。实际应用时应注意温度对 I_S 的影响。

(4) 最大功耗 P_M 。它是保证二极管安全工作所允许的最大功率损耗。通常大功率二极管要加散热片。

(5) 直流电阻 R_D 。它是二极管伏安特性曲线上工作点所对应的直流电压与直流电流之比, 即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-3)$$

显然, 工作点不同, 其直流阻值就不同。器件的参数随工作电压和电流的变化而变化, 这种现象是非线性器件特有的性质。 R_D 在工程计算中用处不大, 但可用来说明二极管单向导电性的好坏。平时用万用表欧姆挡测量出的二极管电阻就是直流电阻 R_D 。一般二极管的正向直流电阻为几十欧姆至几百欧姆, 反向直流电阻为几千欧姆至几百千欧姆。

(6) 交流电阻 r_d 。二极管在小信号工作情况下, 需要用到交流电阻这一参数。交流电阻 r_d 的几何意义如图 1-11 所示。交流电阻 r_d 的定义: 二极管伏安特性曲线工作点 Q 附近电压的变化量与相应的电流变化量之比, 即

$$r_d = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_{I_D=I_Q}$$

r_d 的数值是随工作点电流的增大而减小的, 通常正向交流电阻 r_d 为几欧姆到几十欧姆。

r_d 的数值还可以从二极管的伏安特性表达式中导出, 即

$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \left. \frac{du_D}{di_D} \right|_{I_D=I_Q} = \left. \frac{du_D}{d[I_S(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)]} \right|_{I_D=I_Q} \approx \left. \frac{U_T}{I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}} \right|_{I_D=I_Q} \approx \frac{U_T}{I_Q} \quad (1-4)$$

当 $T=300K$ 时, $U_T=26mV$ 。例如, 当 Q 点的 $I_Q=2mA$ 时, $r_d=13\Omega$ 。

(7) 最高工作频率 f_M 。PN 结具有电容效应, 它的存在限制了二极管的工作频率。如果通过二极管的信号频率超过了管子的最高工作频率, 则结电容的容抗变小, 高频电流将直接从结电容通过, 二极管的单向导电性将变差。

1.2.3 二极管电路分析方法

由二极管组成的电路是非线性电路, 它的分析方法有图解分析法和模型分析法。在工程



(微课视频: 什么是二极管的正向交流电阻)

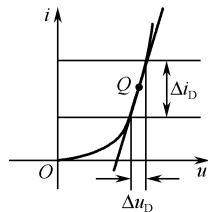


图 1-11 交流电阻 r_d 的几何意义

中，通常采用模型分析法。该方法是在特定的条件下，将非线性的二极管伏安特性分段线性化处理，从而用由某些线性元器件组成的电路（模型）来近似替代二极管，把非线性的二极管电路转化为线性电路来求解。常用的二极管等效电路有以下两种模型。

1. 理想模型

理想模型将二极管看作一个开关。加正向电压时导通，即开关闭合，二极管两端的电压 $u_D = 0$ ；加反向电压时截止，即开关断开，流过二极管的电流 $i_D = 0$ 。二极管的理想模型如图 1-12 所示。当二极管的正向电压和正向电阻与外接电路的电压和电阻相比均可忽略时，可采用该模型。

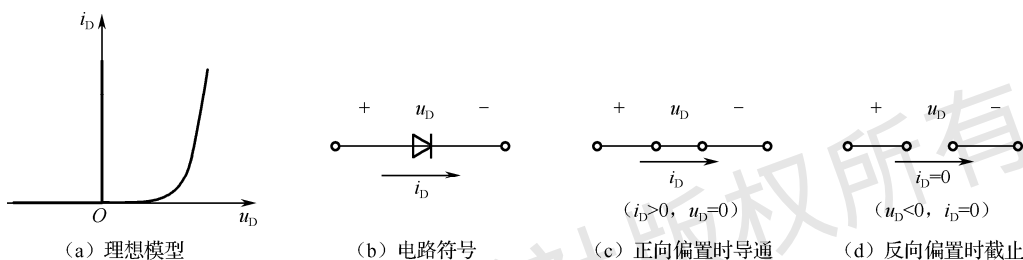


图 1-12 二极管的理想模型

2. 恒压降模型

恒压降模型将二极管看作理想二极管和一个恒压源的串联组合，恒压源的电压 U_D 为二极管的导通电压（该值与二极管的材料有关，若是硅二极管则 $U_D = 0.7V$ ，若是锗二极管则 $U_D = 0.2V$ ）。二极管的恒压降模型如图 1-13 所示。通常在二极管的正向压降与外加电压相比不能被忽略时使用这种模型。

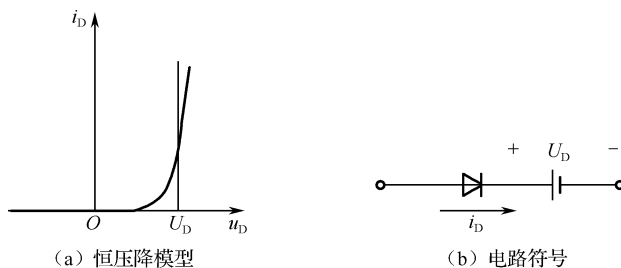


图 1-13 二极管的恒压降模型

【例 1-1】 电路图如图 1-14 所示，二极管为硅管，试分别用二极管的理想模型、恒压降模型计算回路中的电流 I_D 和输出电压 U_O 。

解：首先要判断二极管 VD 是导通还是截止。为此，可假定移去二极管 VD，计算连接二极管两端处的电位 U_a 和 U_b 。由图 1-15 所示的等效电路图可知

$$U_a = -12V, \quad U_b = -16V$$



（微课视频：例 1-1）

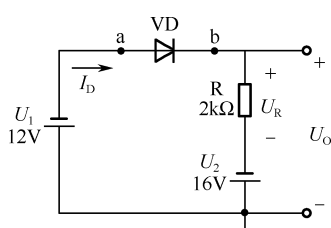


图 1-14 例 1-1 的电路图

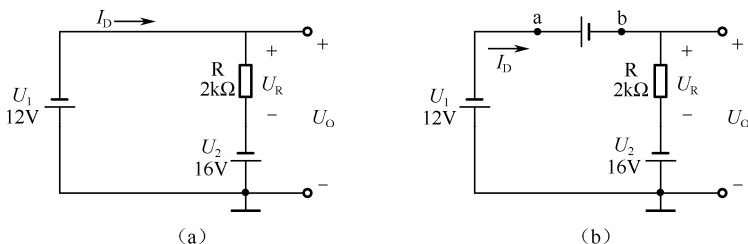


图 1-15 例 1-1 的等效电路图

因为 $U_a > U_b$ ，且 $U_a - U_b > 0.5V$ ，故在理想模型和恒压降模型中，二极管 VD 均导通。

(1) 用理想模型计算。由于二极管 VD 导通，故其管压降 $u_D = 0$ ，其等效电路如图 1-15 (a) 所示，所以

$$I_D = \frac{U_R}{R} = \frac{-U_1 + U_2}{R} = \frac{-12 + 16}{2} = 2 \text{ (mA)}$$

$$U_O = -U_1 = -12V$$

(2) 用恒压降模型计算。由于二极管 VD 导通，故将其等效为电压值为 0.7V 的恒压源，等效电路如图 1-15 (b) 所示，所以

$$I_D = \frac{U_R}{R} = \frac{-U_1 + U_2 - U_D}{R} = \frac{-12 + 16 - 0.7}{2} = 1.65 \text{ (mA)}$$

$$U_O = I_D R - U_2 = 1.65 \times 2 - 16 = -12.7 \text{ (V)}$$

【例 1-2】电路图如图 1-16 所示，试分别计算如下两种情况下输出端 O 的电位。

(1) 输入端 A 的电位为 $U_A = 3.6V$ ，B 的电位为 $U_B = 3.6V$ ；

(2) 输入端 A 的电位为 $U_A = 0V$ ，B 的电位为 $U_B = 3.6V$ 。

解：(1) 当 $U_A = 3.6V$ 、 $U_B = 3.6V$ 时，VD₁、VD₂ 均导通，则

$$U_O \approx 3.6V$$

(2) 当 $U_A = 0V$ 、 $U_B = 3.6V$ 时，因为 A 端的电位比 B 端电位低，所以 VD₁ 优先导通，则

$$U_O \approx 0V$$

当 VD₁ 导通后，VD₂ 上承受反向电压而截止。

当二极管正向导通时，正向压降很小，可以忽略不计，所以可以强制使其阳极电位与阴极电位基本相等，这种作用称为二极管的钳位作用。当二极管加反向电压时，二极管截止，相当于断路，阳极和阴极被隔离，称为二极管的隔离作用。在例 1-2 (1) 中，VD₁、VD₂ 均起钳位作用，把输出端 O 的电位钳制在 3.6V；在例 1-2 (2) 中，VD₁ 起钳位作用，把输出端 O 的电位钳制在 0V，VD₂ 起隔离作用，把输入端 B 和输出端 O 隔离开。

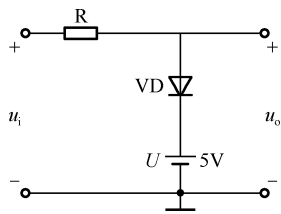


图 1-17 例 1-3 的电路图

【例 1-3】在图 1-17 所示的电路图中， $U = 5V$ ， $u_i = 10\sin(\omega t)V$ [见图 1-18 (a)]，VD 为理想二极管，试画出输出电压 u_o 的波形。

解：分析 u_i 和 5V 电源共同作用下，在哪个时间区段上 VD 正向导通，在哪个时间区段上 VD 反向截止，并在等效电路中求出 u_o 。

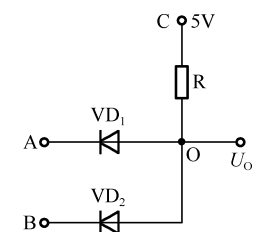


图 1-16 例 1-2 的电路图

的波形。

(1) 在 u_i 正半周, 且 $u_i < 5V$ 时, VD 的正极经 R 接 u_i , 其负极电源为 U 。由于 $u_i < 5V$, 故 VD 反向偏置, 理想二极管 VD 可视为断路。

此时, $u_o = u_i$, 输出电压波形为图 1-18 (b) 中的 Oa 段和 bc 段, 波形与输入电压 u_i 波形是一致的。

(2) 在 u_i 正半周, 当 $u_i > 5V$ 时。此时 VD 正向偏置, 理想二极管 VD 可视为短路。

此时, $u_o = 5V$, 输出电压波形位于图 1-18 (b) 的 ab 段, 平行于横轴。

(3) 在 u_i 负半周, 此时 VD 反向偏置, 理想二极管 VD 可视为断路。此时, $u_o = u_i$, 即 u_o 的波形与 u_i 的波形是一致的。

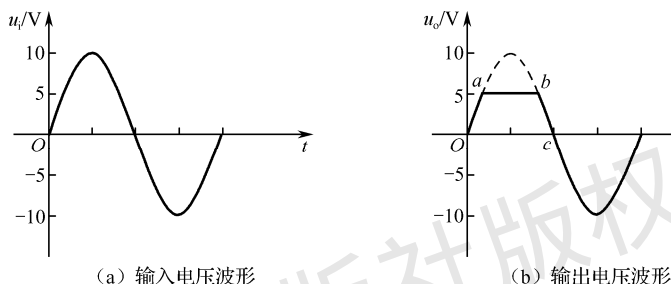


图 1-18 输入电压与输出电压波形

1.2.4 特殊的二极管

1. 稳压二极管

稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管。在反向击穿区, 稳压二极管的电流变化很大而电压基本不变, 利用这一特性可实现电压的稳定。由于它工作在反向击穿区的电击穿区, 所以在规定的电流范围内使用时, 不会形成破坏性的击穿。稳压二极管的伏安特性及电路符号如图 1-19 所示。

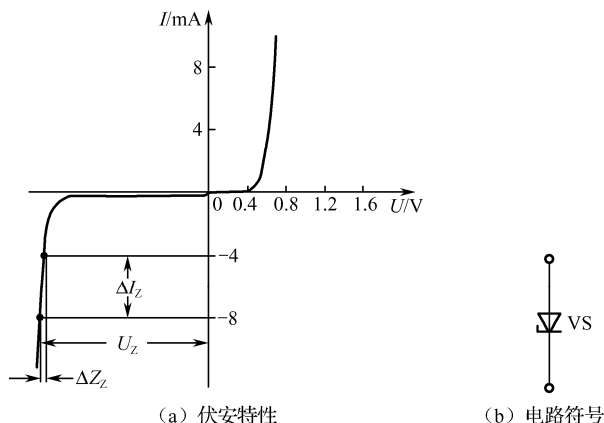


图 1-19 稳压二极管的伏安特性及电路符号

2. 发光二极管

发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 是一种光发射器件, 能把电能直接转化成光能, 它是由镓 (Ga)、砷 (As)、磷 (P) 等元素的化合物制成的。由这些材料构成的 PN 结加上正向电压时, 就会发出光来, 光的颜色主要取决于制造所用的材料, 如砷化镓发出红色光、磷化镓发出绿色光等。目前市场上发光二极管的颜色有红、橙、黄、绿、蓝五种, 其外形有圆形、长方形等。图 1-20 (a) 所示为发光二极管的电路符号。

发光二极管工作在正偏状态, 也具有单向导电性。它的导通电压比普通二极管的大, 一般为 $1.7\sim 2.4\text{V}$, 工作电流一般为 $5\sim 20\text{mA}$ 。应用时, 加上正向电压, 并接入相应的限流电阻即可。发光强度基本上与电流大小呈线性关系。

发光二极管用途广泛, 常用作微型计算机、电视机、音响设备、仪器仪表中的电源和信号的指示器, 也可做成数字形状, 用于显示数字。七段 LED 数码管就是用七个发光二极管组成的一个发光显示单元, 可以显示数字 (0~9)。将七个发光二极管的负极接在一起, 就是共阴极数码管; 将七个发光二极管的正极接在一起, 就是共阳极数码管。市场上有各种型号的发光二极管产品出售。发光二极管也可以组成字母、汉字和其他符号, 用于广告显示。它具有体积小、省电、工作电压低、抗冲击振动、寿命长、单色性好及响应速度快等优点。

3. 光敏二极管

光敏二极管是利用半导体的光敏特性制造的光接收器件, 即把光信号转化为电信号的一种器件, 也叫作光电二极管。图 1-20 (b) 所示为光敏二极管的电路符号。

光敏二极管在管壳上有一个玻璃窗口以便接收光照, 它的反向电流随着光照强度的增大而增大。

光敏二极管作为光电器件, 广泛应用于光的测量和光电自动控制系统, 如光纤通信中的光接收机、电视机和家庭音响的遥控接收。另外, 大面积的光敏二极管可用作能源, 即光电池, 光能源是很有发展前途的绿色能源。

4. 变容二极管

变容二极管是利用 PN 结的电容效应工作的, 它工作于反向偏置状态, 它的电容量与反偏电压大小有关。改变变容二极管的直流反偏电压, 就可以改变其电容量。图 1-20 (c) 所示为变容二极管的电路符号。

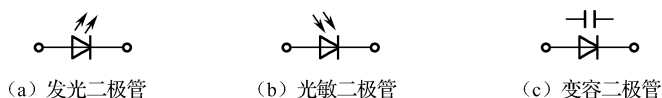


图 1-20 发光二极管、光敏二极管和变容二极管的电路符号

变容二极管被广泛应用于谐振回路。例如, 电视机中就使用它作为调谐回路的可变电容器来实现电视频道的选择。在高频电路中, 变容二极管作为变频器的核心器件, 是信号发射机中不可缺少的器件。

项目实施

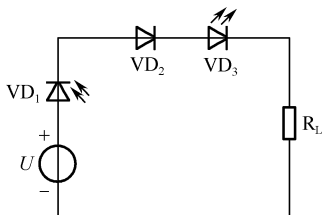


图 1-21 光控电子开关电路的原理图

步骤 1：光控电子开关电路的组成

光控电子开关电路的原理图如图 1-21 所示，光敏二极管 VD_1 串联在电路中，与普通二极管安装方向相同，在一定的光照下， VD_1 导通并驱动 VD_3 发光。反之，无光照时， VD_1 关断， VD_3 熄灭。

表 1-1 给出了光控电子开关电路元器件参数及其功能。

表 1-1 光控电子开关电路元器件参数及其功能

序 号	元器件标号	名 称	型号或参数	功 能
1	U	直流电压	10V	提供电源
2	VD_1	光敏二极管	3mm	光电转换
3	VD_2	开关二极管	1N4148	电路开关
4	VD_3	发光二极管	5mm	开关通断指示
5	R_L	电阻	1k Ω	限流保护

步骤 2：电路仿真及分析

在实际电路焊接之前，应该先利用仿真软件对电路进行仿真测试，在测试通过后，再进行实物的焊接、调试。用 Multisim 画出光控电子开关电路，其仿真连线图如图 1-22 所示。

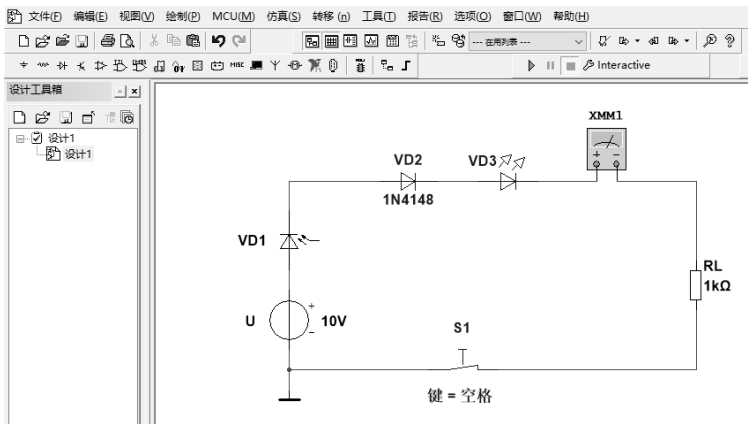


图 1-22 光控电子开关电路仿真连线图

(1) 运行电路，在按键开关 S_1 闭合条件下，观察发光二极管 VD_3 _____（发光或熄灭），用万用表测量电流值为_____。若按键开关 S_1 打开，则发光二极管 VD_3 _____（发光或

- 熄灭)，用万用表测量电流值为_____。
- (2) 若 VD_3 的通态电流为 5mA ，当电源电压 U 调整为 5V 时，为了保证电路功能的有效性，负载 R_L 值需调整为_____。
- (3) 根据步骤 (1) 和 (2)，分析电路的功能为_____。

步骤 3：主要元器件的识别和测试

1. 电阻的识别和测试

目前，国际上广泛采用色环标志法来标志电阻阻值允许的误差，色环电阻分为五环电阻和四环电阻，有四种颜色标在电阻体上的为四环电阻，有五种颜色标在电阻体上的为五环电阻，如图 1-23 所示。



图 1-23 色环标志电阻

(1) 四环电阻标志法。四环电阻的第 1 道环和第 2 道环分别表示电阻的第 1 位和第 2 位有效数字，第 3 道环表示 10 的乘方数 (10^n ， n 为颜色所表示的数字)，第 4 道环表示允许误差 (若无第 4 道环，则误差为 $\pm 20\%$)。色环电阻的单位一律为 Ω 。

表 1-2 列出了色环标志法中各色环代表的意义。

表 1-2 色环标志法中各色环代表的意义

色环颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	金	银	无色
有效数字	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	—	—	—
倍率 (乘数)	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{-1}	10^{-2}	—
误差/%	—	± 1	± 2	—	—	± 0.5	± 0.25	± 0.1	—	—	± 5	± 10	± 20

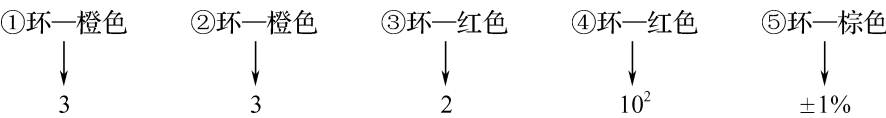
例如：某电阻有 4 道色环，分别为黄、紫、红、金，则其色环的意义如下。



其阻值为 $4700 (1 \pm 5\%) \Omega$ 。

(2) 五环电阻标志法。精密电阻常采用五环电阻标志法，它用前 3 道色环表示 3 位有效数字，第 4 道色环表示 10^n ， n 为颜色所表示的数字，第 5 道色环表示阻值的允许误差。

例如：某电阻的 5 道色环为橙、橙、红、红、棕，则其色环的意义如下。



其阻值为 $33200 (1 \pm 1\%) \Omega$ 。

色环电阻是各种电子设备应用得较多的电阻，无论怎样安装，维修者都能方便地读出其阻值，便于检测和更换。但在实践中发现，有些色环电阻的排列顺序不甚分明，往往容易被读错，在识别时，可运用如下技巧加以判断。

技巧 1：先找标志误差的色环，从而排定色环顺序。最常用的表示电阻误差的颜色是金、银、棕，尤其是金环和银环，一般绝少用作电阻色环的第一环，所以在电阻上只要有金环和银环，就可以基本认定这是色环电阻的最末一环。

技巧 2：棕色环既常用作误差环，又常作为有效数字环，且常常在第一环和最末一环中同时出现，使人很难识别哪个是第一环。在实践中，可以按照色环之间的间隔进行判别：如对于一个 5 道色环的电阻而言，第 5 道环和第 4 道环之间的间隔比第 1 道环和第 2 道环之间的间隔要宽一些，据此可判定色环的排列顺序。

技巧 3：在仅靠色环间距无法判定色环顺序的情况下，还可以利用电阻的生产序列值来判别。比如，有一个电阻的色环读序是棕、黑、黑、黄、棕，其值为 $100 \times 10^4 \Omega = 1\text{M}\Omega$ ，误差为 $\pm 1\%$ ，属于正常的电阻系列值，若是反顺序读棕、黄、黑、黑、棕，其值为 $140 \times 10^0 \Omega = 140\Omega$ ，误差为 $\pm 1\%$ 。显然按照后一种排序所读出的阻值，在电阻的生产系列中是没有的，故后一种色环顺序读法是不对的。

按以上方法进行电阻标称阻值的识别及实际阻值的测量，完成表 1-3。

表 1-3 电阻阻值的识别与测量

序列号	电阻标注色环颜色	阻值及误差（由色环写出）	测量阻值（万用表）
例	黄、紫、黑、棕、金	$4700 (1 \pm 5\%) \Omega$	4650Ω
1			
2			
3			

2. 电容的识别和测试

电容的标注方法可以用直接标志法，即将主要参数直接标在电容上，如 $47\mu\text{F}$ ；也可以用数字表示法，即用三位数字表示容量，前两位数字为电容标称容量的有效数字，第三位数字表示有效数字后面零的个数，单位为 pF ，如 335 即 $33 \times 10^5 \text{pF}$ ，其电容值为 $3.3\mu\text{F}$ 。

电容在使用前要进行好坏检测，用万用表检测的方法：在测试前，先将电容两极短接放电，再把万用表欧姆挡拨到 $R \times 1\text{k}$ 挡，两个表笔分别与电容的两端相接。若被测元器件为电解电容，则应将黑表笔接电容正极，红表笔接电容负极。

(1) 若表针迅速向右摆起，然后慢慢向左退回原位，则说明电容是好的。

(2) 如果表针摆起后不再回转，那么说明电容已经被击穿。

(3) 如果表针摆起后逐渐退回到某一位置停止，则说明电容已经漏电。

(4) 如果表针摆不起来，一般停留并稳定在 $50 \sim 200\text{k}\Omega$ 刻度范围内，那么说明电容电解质已经干涸，失去容量。

按以上方法进行电容类型、极性的识别，以及漏电阻的测量，完成表 1-4。

表 1-4 电容的识别与测量

序 列 号	标 志 方 法	标 志 内 容	标 称 容 值	万 用 表 挡 位	实 测 漏 电 阻
例	直接标志法	33μF, 20V	33μF	1kΩ挡	400kΩ
1					
2					

3. 二极管的识别和测试

1) 二极管的识别

二极管种类繁多，应根据电路的具体要求，参阅半导体器件手册，选用合适的二极管。在使用二极管时，注意不能接错极性，否则电路不能正常工作，甚至会烧毁其他元器件。普通二极管的外形一般可根据管壳外面的标记确定，标有白色色环或标有“-”号的一端是它的负极，如图 1-24 所示。

识别发光二极管正负极的方法：仔细观察发光二极管，可以发现其内部是一大一小两个电极，如图 1-25 所示。一般来说，较小的电极是发光二极管的正极，较大的电极是它的负极。若是新买来的发光二极管，则引脚较长的一端是正极。



图 1-24 普通二极管的外形与极性

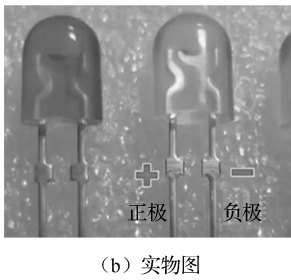


图 1-25 发光二极管正负极识别方法

2) 二极管的测试

(1) 用指针式万用表测试二极管的方法。将指针式万用表拨到欧姆挡（一般用 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡），用两个表笔分别接触二极管的两个电极，测出一个阻值，然后将两表笔对换，再测出一个阻值，若两次测量阻值相差很大，则说明二极管是好的，且阻值小的那一次黑表笔所接一端为二极管的正极，红表笔所接一端为负极。若两次测得的均为大阻值，则说明管子内部断路；若两次测得的均为较小的阻值，则说明管子内部短路，这些都说明二极管已坏。

正向电阻越小越好，反向电阻越大越好。二极管正、反向电阻阻值相差越悬殊，说明二极管的单向导电性越好。若正向测量，表针指示 $10k\Omega$ 以下，反向测量表针指示值也较小（远远小于 $500k\Omega$ ），则说明二极管反向漏电流大，不宜使用。

需要注意的是，指针式万用表拨到欧姆挡时，黑表笔接的是表内电源正极，红表笔接的是表内电源负极。

(2) 用数字万用表测试二极管的方法。将数字万用表拨到二极管挡，用两个表笔分别接



（微课视频：如何检测二极管的极性与好坏）

触二极管的两个电极，若显示值在 1V 以下，则说明管子处于正向导通状态，显示器显示出二极管正向压降的电压值，红表笔接的是二极管的正极，黑表笔接的是二极管的负极；若显示溢出符号“1”，则说明管子处于反向截止状态，黑表笔接的是二极管的正极，红表笔接的是二极管的负极；若显示为 0，则说明管子已被击穿。

需要注意的是，数字万用表拨到二极管挡时，红表笔接的是表内电源正极，黑表笔接的是表内电源负极。

按以上方法进行二极管极性与性能的判断，完成表 1-5。

表 1-5 二极管的识别与测试

序 列 号	二极管类型	正 向 电 阻	反 向 电 阻	质量判别（优或劣）
例	整流二极管	30Ω	500kΩ	优
1				
2				

步骤 4：电路安装与调试

1. 电路安装与焊接

（微课视频：如何安装和焊接简易电路板）

（1）电路手工焊接工具。内热式电烙铁如图 1-26（a）所示，其发热丝绕在一根陶瓷棒上面，外面套上陶瓷管绝缘，使用时烙铁头套在陶瓷管外面，热量从内部传到外部的烙铁头上，故称作内热式。该类电烙铁具有热得快、加热效率高、体积小、质量小、用电少等优点，适合焊接小型的元器件。

外热式电烙铁（又称长寿烙铁）如图 1-26（b）所示，其烙铁芯为螺线管状，烙铁头从烙铁芯中间穿过，故称外热式。该类电烙铁加热效率低，加热速度较慢，体积较大，适合焊接大型器件。

恒温电焊台如图 1-26（c）所示，温度能在 200~480℃ 范围内设定。



（a）内热式电烙铁



（b）外热式电烙铁



（c）恒温电焊台

图 1-26 三种类型的电烙铁

如图 1-27 所示，电路手工焊接辅助工具有烙铁架、螺丝刀、镊子、吸锡器、松香、焊锡丝和高温海绵等。

（2）电路安装与焊接步骤。电路安装与焊接主要有以下四个步骤。

步骤 1：检查电路元器件数量。焊接前对照元器件列表检查元器件是否齐全。

步骤 2：元器件的检测。检测元器件的好坏和极性，并按照元器件明细表排列好。

步骤 3：元器件的加工与成型。元器件成型时，避免将引线齐根弯折，以免损坏元器件。

步骤 4：焊接。焊接时先焊接较小的元器件，再焊接较大的元器件，最后焊接必要的导线。



图 1-27 电路手工焊接辅助工具

2. 电路调试

1) 不通电检查

- (1) 检查接线是否正确，以及焊点有无虚焊、脱焊。
- (2) 检查二极管和电源的极性是否接反。

2) 通电测试

电源接通后不要急于测量，首先要观察有无异常现象，包括有无冒烟，是否闻到异常气味，手摸元器件是否发烫，电源是否有短路现象等。如果出现异常，那么应立即关闭电源，待排除故障后方可重新通电。

3. 故障的诊断与处理

电路故障最有可能是元件极性安装错误或者线路故障。若元件极性安装错误，则需要重新安装；如果是线路故障，那么可采用万用表的蜂鸣挡确定故障位置，方法如下：将万用表挡位拨至蜂鸣挡，将红、黑表笔接在测量线路的两端，如果万用表发出蜂鸣声，那么说明这个线路是通的；如果没有蜂鸣声，那么说明线路是断开的。

项目总结

- (1) 本征半导体中电子、空穴成对出现，数量少，故导电能力弱，并与光照和温度有关。
- (2) N 型半导体中加入了五价元素，电子为多子，空穴为少子；P 型半导体中加入了三价元素，空穴为多子，电子为少子。
- (3) 在 PN 结形成过程中，半导体的载流子有两种有序的运动，因浓度差而产生的多子运动为扩散运动，因电场力产生的少子运动为漂移运动。
- (4) PN 结在正偏时导通，反偏时截止，这种特性称为单向导电性。
- (5) 二极管为非线性器件，在工程上常采用理想模型、恒压降模型等近似手段进行处理。理想二极管可等效为一个开关，正偏时开关闭合，反偏时开关打开；二极管恒压降模型在正向导通时等效为 0.7V（硅管）的直流电压源，反向截止时等效为断路。
- (6) 常见的特殊二极管有稳压二极管、发光二极管、光敏二极管和变容二极管等。

思考与练习

一、判断题

1. 如果在 N 型半导体中掺入足够量的三价元素, 可将其改型为 P 型半导体。()
2. 因为 N 型半导体的多子是自由电子, 所以它带负电。()
3. PN 结在无光照、无外加电压时, 结电流为零。()

二、选择题

1. 在本征半导体中加入 () 元素可形成 N 型半导体。
A. 五价 B. 四价 C. 三价 D. 二价
2. 在本征半导体中加入 () 元素可形成 P 型半导体。
A. 五价 B. 四价 C. 三价 D. 二价
3. PN 结加正向电压时, 空间电荷区将 ()。
A. 变窄 B. 基本不变 C. 变宽 D. 变宽再变窄
4. 设二极管的端电压为 U , 则二极管的电流方程是 ()。
A. $I_s e^U$ B. $I_s e^{U/U_T}$ C. $I_s (e^{U/U_T} - 1)$ D. $I_s (e^U - 1)$
5. 稳压管的稳压区是其工作在 ()。
A. 正向导通 B. 反向截止 C. 反向击穿 D. 死区
6. 当温度升高时, 二极管的反向饱和电流将 ()。
A. 增大 B. 不变 C. 减小 D. 死区
7. () 能将光信号转换成电信号。
A. 稳压二极管 B. 光敏二极管 C. 发光二极管 D. 变容二极管

三、计算题

1. 如图 1-28 所示, 请分析各电路二极管的工作状态, 并写出输出电压值, 设二极管导通电压 $U_D = 0.7V$ 。

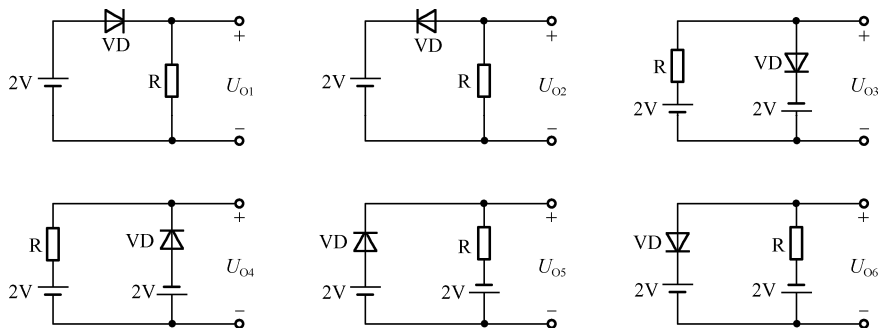


图 1-28 计算题第 1 题

2. 二极管限幅电路如图 1-29 所示, 将二极管等效为理想模型, 若 $u_i = 5\sin(\omega t)\text{V}$, 试画出 u_o 的波形。

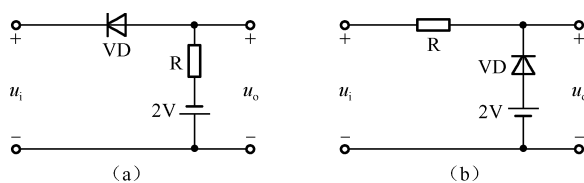


图 1-29 计算题第 2 题

电子工业出版社版权所有
盗版必究