



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



西安交通大学国家精品课程“电工电子技术（电工学）”主教材

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

# 电子技术

## (电工学Ⅱ)

西安交通大学电工学教研室 编  
王建华 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

TM1/192

:2

2010

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

西安交通大学国家精品课程“电工电子技术(电工学)”主教材

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

# 电子技术

## (电工学Ⅱ)

西安交通大学电工学教研室

王建华 陈国联 夏建生

编

王建华 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,也是西安交通大学国家精品课程“电工电子技术(电工学)”主教材。

全书共9章,主要内容包括半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、电力电子技术基础、集成逻辑门和组合逻辑电路、集成触发器和时序逻辑电路、波形产生电路、A/D转换器、大规模集成电路。各章配有丰富的例题、习题和思考题,书后提供了部分习题的参考答案,便于教师教学和学生自学。为方便教师教学,本书配有免费电子教学课件。

本书可与我校刘晔主编的《电工技术(电工学I)》配套使用,可作为高等学校工科非电类专业本科生、大专生及成人教育相关专业的教材和教学参考书,也可供工程技术人员参考。

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

电子技术. 电工学. 2/王建华主编. —北京:电子工业出版社, 2010.3

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

ISBN 978-7-121-10369-8

I. 电… II. 王… III. ①电子技术—高等学校—教材②电工学—高等学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第024807号

策划编辑:冯小贝

责任编辑:段丹辉

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

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:787×1092 1/16 印张:22.5 字数:682千字

印 次:2010年3月第1次印刷

印 数:4000册 定价:35.00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。

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

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

随着经济的发展和社会的进步,对高等技术人才知识结构提出了新的要求,“电子技术”也成为各高等学校工科非电类专业的必修课。本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是西安交通大学电工电子教学实验中心在开展国家工科基础课程电工电子教学基地、国家级电工电子教学实验示范中心和国家精品课程“电工电子技术(电工学)”建设工作的基础上,依据教育部制定的工科高校“电工电子技术”课程教学的基本要求,为适应高等学校非电类工科专业“电工电子技术”课程改革的需要而编写的。本书可与我校刘晔主编的《电工技术(电工学 I)》配套使用。

本书编写的指导思想如下:

(1) 体现我校电工电子技术课程教学“保基础、重实践、少而精”的传统。教学内容紧扣教学大纲,在介绍基本概念、基本原理、基本分析方法的基础上加强和突出工程应用,满足较少学时教学的需要。

(2) 重视电子器件和集成电路的外特性,通过具有典型意义的分立元件电路介绍电子电路的基本分析方法。

(3) 加强对集成电路应用的论述。在模拟电路部分,重点讨论了集成运算放大器的分析和应用;在数字电路部分,则直接由小规模集成电路入门,重点讨论了中规模集成电路的应用。

(4) 反映电子技术的新技术和发展方向。介绍了光电耦合器件、可编程逻辑器件等内容,将迅速发展的电力电子技术单独作为一章加以阐述,同时引入了 PSpice 仿真软件,便于学生了解电子技术的新发展。

全书共 9 章,主要内容包括半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、电力电子技术基础、集成逻辑门和组合逻辑电路、集成触发器和时序逻辑电路、波形产生电路、A/D 转换器、大规模集成电路。各章配有丰富的例题、习题和思考题,书后提供了部分习题的参考答案,便于教师教学和学生自学。

本书的参考学时为 60~80 学时。为方便教师教学,本书配有免费电子教学课件。任课教师可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)免费注册下载或发送邮件至 [duandh@phei.com.cn](mailto:duandh@phei.com.cn) 咨询。

王建华任主编,负责本书的定稿和统稿。第 1, 2 章由陈国联编写,第 3, 4, 7 章由王建华编写,第 5, 6, 8, 9 章由夏建生编写。研究生陈浪对部分电路进行了仿真分析。西安交通大学电工学教研室刘晔、刘晓辉、杨振坤、唐胜安和常弘等老师参加了编写大纲的制定。

哈尔滨工业大学吴建强教授仔细审阅了本书的全稿,提出了宝贵的修改意见。本书的编写工作得到了西安交通大学教务处的大力支持。在编写过程中,编者借鉴了有关参考文献。在此,编者表示衷心的感谢!

现代电子技术的发展日新月异,限于编者水平,书中难免存在错误和不妥之处,欢迎使用本书的教师、学生和工程技术人员提出意见和建议,以便改进和提高。作者的联系方式: [jhwjt@mail.xjtu.edu.cn](mailto:jhwjt@mail.xjtu.edu.cn)。

编 者

2009 年 9 月  
于西安交通大学

# 目 录

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 第 1 章 半导体器件 .....               | (1)  |
| 1.1 PN 结与半导体二极管 .....           | (1)  |
| 1.1.1 PN 结的形成及其单向导电性 .....      | (1)  |
| 1.1.2 半导体二极管的结构、伏安特性及主要参数 ..... | (3)  |
| 1.1.3 半导体二极管的应用 .....           | (5)  |
| 1.2 特殊二极管 .....                 | (9)  |
| 1.2.1 硅稳压管 .....                | (9)  |
| 1.2.2 发光二极管 .....               | (10) |
| 1.2.3 光电二极管 .....               | (11) |
| 1.3 半导体三极管 .....                | (11) |
| 1.3.1 半导体三极管的结构和类型 .....        | (11) |
| 1.3.2 半导体三极管的电流放大作用 .....       | (12) |
| 1.3.3 半导体三极管的特性曲线 .....         | (14) |
| 1.3.4 半导体三极管的主要参数 .....         | (16) |
| 1.3.5 光电三极管和光电耦合器件 .....        | (18) |
| 1.4 绝缘栅场效应管 .....               | (19) |
| 1.4.1 N 沟道增强型绝缘栅场效应管 .....      | (20) |
| 1.4.2 N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管 .....      | (22) |
| 1.4.3 场效应管的主要参数 .....           | (24) |
| 1.5 PSice 例题分析 .....            | (25) |
| 本章小结 .....                      | (30) |
| 习题 1 .....                      | (30) |
| 第 2 章 基本放大电路 .....              | (35) |
| 2.1 放大电路的基本概念及其性能指标 .....       | (35) |
| 2.1.1 放大电路的基本概念 .....           | (35) |
| 2.1.2 放大电路的主要性能指标 .....         | (36) |
| 2.2 共发射极放大电路 .....              | (38) |
| 2.2.1 共发射极放大电路的组成及工作原理 .....    | (38) |
| 2.2.2 放大电路的静态分析 .....           | (41) |
| 2.2.3 放大电路的动态分析 .....           | (43) |
| 2.2.4 静态工作点的稳定 .....            | (51) |
| 2.3 共集电极和共基极放大电路 .....          | (56) |
| 2.3.1 共集电极放大电路 .....            | (56) |
| 2.3.2 共基极放大电路 .....             | (59) |
| 2.4 MOS 场效应管放大电路 .....          | (61) |

|       |                       |      |
|-------|-----------------------|------|
| 2.4.1 | 直流偏置电路和静态估算           | (62) |
| 2.4.2 | 动态分析                  | (63) |
| 2.5   | 多级放大电路                | (65) |
| 2.5.1 | 多级放大电路的耦合方式           | (65) |
| 2.5.2 | 多级放大电路的分析             | (66) |
| 2.5.3 | 阻容耦合放大电路的频率特性         | (68) |
| 2.6   | 差分放大电路                | (70) |
| 2.6.1 | 静态分析                  | (70) |
| 2.6.2 | 动态分析                  | (71) |
| 2.6.3 | 单端输入的差分放大电路           | (74) |
| 2.7   | 互补对称功率放大电路            | (77) |
| 2.7.1 | 功率放大电路的特点             | (77) |
| 2.7.2 | 双电源互补对称功率放大电路(OCL 电路) | (78) |
| 2.7.3 | 单电源互补对称功率放大电路(OTL 电路) | (80) |
| 2.8   | PSpice 例题分析           | (81) |
|       | 本章小结                  | (83) |
|       | 习题 2                  | (83) |

|              |                |             |
|--------------|----------------|-------------|
| <b>第 3 章</b> | <b>集成运算放大器</b> | <b>(90)</b> |
| 3.1          | 集成运算放大器简介      | (90)        |
| 3.1.1        | 集成运算放大器电路简介    | (90)        |
| 3.1.2        | 集成运算放大器的符号、引脚  | (91)        |
| 3.1.3        | 集成运算放大器的主要参数   | (92)        |
| 3.1.4        | 电路模型和电压传输特性    | (93)        |
| 3.2          | 放大电路中的负反馈      | (94)        |
| 3.2.1        | 反馈的基本概念        | (94)        |
| 3.2.2        | 负反馈的类型及其判别方法   | (97)        |
| 3.2.3        | 负反馈对放大器性能的影响   | (100)       |
| 3.3          | 集成运算放大器的线性应用   | (103)       |
| 3.3.1        | 理想运算放大器及其分析方法  | (104)       |
| 3.3.2        | 运算放大器的三种组态     | (105)       |
| 3.3.3        | 信号运算电路         | (109)       |
| 3.3.4        | 运算放大器在测量技术中的应用 | (116)       |
| 3.3.5        | 有源滤波器          | (119)       |
| 3.4          | 集成运算放大器的非线性应用  | (121)       |
| 3.4.1        | 电压比较器          | (122)       |
| 3.4.2        | 精密整流电路         | (127)       |
| 3.5          | 集成运算放大器的选择和使用  | (128)       |
| 3.5.1        | 选型             | (128)       |
| 3.5.2        | 调零             | (128)       |
| 3.5.3        | 消除自激振荡         | (129)       |
| 3.5.4        | 保护措施           | (129)       |

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| 3.6 PSpice 例题分析 .....           | (130)        |
| 本章小结 .....                      | (132)        |
| 习题 3 .....                      | (133)        |
| <b>第 4 章 电力电子技术基础 .....</b>     | <b>(142)</b> |
| 4.1 电力电子器件 .....                | (142)        |
| 4.1.1 晶闸管 .....                 | (142)        |
| 4.1.2 派生晶闸管 .....               | (146)        |
| 4.1.3 典型的全控型器件 .....            | (147)        |
| 4.2 整流与滤波电路 .....               | (148)        |
| 4.2.1 不可控整流电路 .....             | (148)        |
| 4.2.2 可控整流电路 .....              | (152)        |
| 4.2.3 滤波电路 .....                | (162)        |
| 4.3 直流稳压(DC-DC)电路 .....         | (166)        |
| 4.3.1 硅稳压管稳压电路 .....            | (166)        |
| 4.3.2 串联型线性稳压电路 .....           | (167)        |
| 4.3.3 集成稳压电路 .....              | (168)        |
| 4.3.4 开关型稳压电路 .....             | (170)        |
| 4.4 逆变(DC/AC)电路 .....           | (172)        |
| 4.5 交流变换(AC/AC)电路 .....         | (174)        |
| 4.5.1 单相交流调压电路 .....            | (174)        |
| 4.5.2 单相交-交变频电路 .....           | (174)        |
| 4.6 PSpice 例题分析 .....           | (175)        |
| 本章小结 .....                      | (176)        |
| 习题 4 .....                      | (177)        |
| <b>第 5 章 集成逻辑门和组合逻辑电路 .....</b> | <b>(181)</b> |
| 5.1 数字电路的基础知识 .....             | (181)        |
| 5.1.1 数字电路及其特点 .....            | (181)        |
| 5.1.2 数制和码制 .....               | (181)        |
| 5.1.3 脉冲波形及其主要参数 .....          | (185)        |
| 5.2 基本逻辑关系和逻辑门电路 .....          | (186)        |
| 5.2.1 与门电路 .....                | (186)        |
| 5.2.2 或门电路 .....                | (187)        |
| 5.2.3 非门电路 .....                | (187)        |
| 5.3 集成门电路 .....                 | (189)        |
| 5.3.1 TTL 与非门电路 .....           | (189)        |
| 5.3.2 其他类型的 TTL 门电路 .....       | (196)        |
| 5.3.3 集成 COMS 门电路 .....         | (200)        |
| 5.4 逻辑代数及其应用 .....              | (204)        |
| 5.4.1 逻辑代数的运算规则 .....           | (204)        |
| 5.4.2 逻辑函数的化简法 .....            | (205)        |

|              |                           |              |
|--------------|---------------------------|--------------|
| 5.5          | 组合逻辑电路的分析和设计 .....        | (212)        |
| 5.5.1        | 组合逻辑电路的分析 .....           | (212)        |
| 5.5.2        | 组合逻辑电路的设计 .....           | (213)        |
| 5.6          | 典型的集成组合逻辑电路 .....         | (215)        |
| 5.6.1        | 加法器 .....                 | (215)        |
| 5.6.2        | 编码器 .....                 | (217)        |
| 5.6.3        | 译码器及数字显示电路 .....          | (220)        |
| 5.6.4        | 数码比较器 .....               | (225)        |
| 5.6.5        | 数据选择器 .....               | (226)        |
| 5.6.6        | 数据分配器 .....               | (229)        |
|              | 本章小结 .....                | (230)        |
|              | 习题 5 .....                | (231)        |
| <b>第 6 章</b> | <b>集成触发器和时序逻辑电路 .....</b> | <b>(237)</b> |
| 6.1          | 双稳态触发器 .....              | (237)        |
| 6.1.1        | RS 触发器 .....              | (237)        |
| 6.1.2        | JK 触发器 .....              | (240)        |
| 6.1.3        | D 触发器(边沿触发器) .....        | (242)        |
| 6.2          | 寄存器 .....                 | (244)        |
| 6.2.1        | 数码寄存器 .....               | (245)        |
| 6.2.2        | 移位寄存器 .....               | (245)        |
| 6.3          | 计数器 .....                 | (248)        |
| 6.3.1        | 时序逻辑电路的分析方法 .....         | (249)        |
| 6.3.2        | 二进制计数器 .....              | (249)        |
| 6.3.3        | 十进制计数器 .....              | (253)        |
| 6.3.4        | $N$ 进制计数器 .....           | (254)        |
| 6.3.5        | 集成计数器 .....               | (258)        |
| 6.4          | 顺序脉冲分配器 .....             | (263)        |
|              | 本章小结 .....                | (264)        |
|              | 习题 6 .....                | (265)        |
| <b>第 7 章</b> | <b>信号的产生和变换电路 .....</b>   | <b>(273)</b> |
| 7.1          | 正弦波振荡电路 .....             | (273)        |
| 7.1.1        | 正弦波振荡电路的基本工作原理 .....      | (273)        |
| 7.1.2        | RC 正弦波振荡电路 .....          | (275)        |
| 7.1.3        | LC 正弦振荡电路 .....           | (278)        |
| 7.1.4        | 石英晶体振荡电路 .....            | (283)        |
| 7.2          | 非正弦波信号发生器 .....           | (286)        |
| 7.2.1        | 方波信号发生器 .....             | (286)        |
| 7.2.2        | 门电路构成的多谐振荡器 .....         | (288)        |
| 7.2.3        | 三角波和锯齿波信号发生器 .....        | (290)        |
| 7.3          | 脉冲信号变换电路 .....            | (292)        |

|              |                           |              |
|--------------|---------------------------|--------------|
| 7.3.1        | 单稳态触发器 .....              | (292)        |
| 7.3.2        | 施密特触发器 .....              | (295)        |
| 7.3.3        | 压控振荡器 .....               | (296)        |
| 7.4          | 555 集成定时器及其应用 .....       | (298)        |
| 7.4.1        | 555 集成定时器 .....           | (298)        |
| 7.4.2        | 单稳态触发器 .....              | (299)        |
| 7.4.3        | 无稳态触发器 .....              | (301)        |
| 7.4.4        | 施密特触发器 .....              | (302)        |
| 7.5          | PSpice 例题分析 .....         | (303)        |
|              | 本章小结 .....                | (304)        |
|              | 习题 7 .....                | (305)        |
| <b>第 8 章</b> | <b>数模和模数转换器 .....</b>     | <b>(310)</b> |
| 8.1          | 数模转换器 (DAC) .....         | (310)        |
| 8.1.1        | R-2R 梯形电阻网络 D/A 转换器 ..... | (310)        |
| 8.1.2        | R-2R 倒梯形网络 D/A 转换器 .....  | (311)        |
| 8.1.3        | 集成 D/A 转换器 .....          | (312)        |
| 8.1.4        | D/A 转换器的主要技术参数 .....      | (313)        |
| 8.2          | 模数转换器 (ADC) .....         | (314)        |
| 8.2.1        | 采样-保持 .....               | (314)        |
| 8.2.2        | 量化-编码 .....               | (315)        |
| 8.2.3        | 逐次逼近型 A/D 转换器 .....       | (315)        |
| 8.2.4        | 集成 A/D 转换器 .....          | (318)        |
| 8.2.5        | A/D 转换器的主要技术参数 .....      | (320)        |
|              | 本章小结 .....                | (321)        |
|              | 习题 8 .....                | (321)        |
| <b>第 9 章</b> | <b>存储器与可编程逻辑器件 .....</b>  | <b>(323)</b> |
| 9.1          | 存储器 .....                 | (323)        |
| 9.1.1        | 只读存储器 (ROM) .....         | (323)        |
| 9.1.2        | 随机存取存储器 (RAM) .....       | (325)        |
| 9.2          | 可编程逻辑器件 (PLD) .....       | (328)        |
| 9.2.1        | 可编程只读存储器 (PROM) .....     | (329)        |
| 9.2.2        | 可编程逻辑阵列 (PLA) .....       | (329)        |
| 9.2.3        | 可编程阵列逻辑 (PAL) .....       | (331)        |
| 9.2.4        | 通用阵列逻辑 (GAL) .....        | (333)        |
| 9.2.5        | 高密度可编程逻辑器件 (HDPLD) .....  | (334)        |
|              | 本章小结 .....                | (338)        |
|              | 习题 9 .....                | (339)        |
|              | 部分习题参考答案 .....            | (340)        |
|              | 主要参考文献 .....              | (347)        |

# 第1章 半导体器件

半导体器件具有质量轻、体积小、寿命长以及工作可靠等特点，是构成各种电子电路的核心元件。因此，学习掌握二极管、稳压管、晶体三极管和绝缘栅场效应管等常用半导体器件的结构、工作原理、特性曲线和主要参数是学习电子技术和分析电子电路必不可少的基础。

对于半导体器件内部的微观物理过程只需简单地了解，重点应掌握其外部特性和具体应用。

## 1.1 PN 结与半导体二极管

### 1.1.1 PN 结的形成及其单向导电性

根据物质导电能力的大小，可以把物质分为导体、半导体和绝缘体三大类。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。常用的半导体材料是硅和锗，它们的外层电子数目都是四个。当纯净的半导体材料经过适当的加工，使所有的原子按一定规则整齐排列而形成晶体结构时，每一个原子的四个外层电子就会与周围其他四个原子的外层电子相结合而形成共价键，这就是本征半导体。当本征半导体被加热或受到光照时，共价键中的价电子将获得能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子，同时在共价键中留下一个空位，称为空穴。本征激发产生的自由电子带负电，具有空穴的原子因失去一个价电子而带正电，它可以吸引相邻原子中的价电子来填补这个空穴，因此，在相邻原子的共价键中形成了一个新的空穴，这样就随着价电子的迁移而形成了空穴的移动，空穴的移动实际上反映的是价电子的反方向移动。由于空穴移动到哪里，哪里的原子就因失去电子而带正电，所以可以等效地看做空穴带有正电荷。在半导体中存在着自由电子和空穴两种带电粒子，这是半导体导电机理的特殊之处，通常把这两种带电粒子统称为载流子。

本征激发的自由电子和空穴总是成对地出现，同时也在不断地复合消失。在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，半导体中的载流子数量保持不变。当温度升高时，由于本征激发加强，半导体中的载流子数目便增加，其导电性能会显著地提高，这一特性称为半导体的热敏性。在实际工作中，常利用半导体的热敏性制成热敏电阻等热敏元件作为温度检测元件。同样，当有光照射到半导体时，半导体的本征激发也会加强，这时不仅半导体的导电能力会增强，而且还会产生电动势，这一特性称为半导体的光敏性，利用光敏效应可以制成光敏电阻和光电池。

本征半导体的导电能力还随着掺入微量的其他杂质元素而发生明显的改变。例如，在纯净的硅半导体中掺入百万分之一的硼后，硅的电阻率就从大约  $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$  减小到约为  $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 。这一特性称为半导体的掺杂性。利用半导体的掺杂性可以制成各种不同用途的半导体器件。

如果在本征半导体材料（主要是硅或锗）中掺入微量的三价杂质元素硼，因硼原子外层只有三个价电子，在形成共价键结构时，将因缺少一个价电子而形成空位，硼原子就会吸引周围共价键上的价电子来填补这个空位，硼原子得到一个价电子而成为负离子，同时在失去价电子的共价键上形成了一个带正电的空穴。虽然掺入的三价杂质相对数量很少，但绝对原子数却很多。在这种掺杂半导体中空穴是多数载流子（多子），自由电子是少数载流子（少子），因此称为空穴型半导体或 P 型半导体。如果在本征半导体材料中掺入微量的五价杂质元素磷，因磷原子外层有五个价电子，在形成共价键结构时只需四个价电子，这样多余的第五个价电子就很容易挣脱磷原子的束缚而成为自由电子，同时磷

原子因失去一个价电子而成为正离子。在这种掺杂半导体中自由电子是多数载流子,空穴是少数载流子,因此称为电子型半导体或 N 型半导体。多子是由掺杂产生的,多子的数目取决于掺杂浓度;少子是由本征激发所产生的,少数数目的多少与环境温度有很大关系。

无论是 P 型半导体还是 N 型半导体,从整体上看,其中的正电荷量和负电荷量总是相等的,对外保持电中性。

### 1. PN 结的形成

如果在 N 型(或 P 型)半导体基片上,采用离子注入工艺在局部区域掺入高浓度的三价(或五价)元素作为补偿杂质,使该区域形成 P 型(或 N 型)区,则在 P 区和 N 区之间的交界面附近,将形成一个很薄的空间电荷区(其厚度的典型值约为  $0.5\ \mu\text{m}$ ),称为 PN 结。

PN 结的形成可解释如下:因为 P 型和 N 型半导体之间存在着多子浓度上的显著差异, P 区内有大量的空穴,而电子数目很少, N 区内有大量的电子,而空穴数目很少。因此, P 区的空穴要向 N 区扩散; N 区的电子要向 P 区扩散,如图 1.1.1(a) 所示。扩散到对方的载流子便与该区的多子相遇而复合,这样,在 P 区一侧留下不能移动的负离子,在 N 区一侧留下不能移动的正离子,如图 1.1.1(b) 所示。这个由正、负离子组成的空间电荷区就是 PN 结,也称为耗尽层。

随着 PN 结的形成,产生了由 N 区指向 P 区的内建电场。一方面,内建电场会阻止多子的进一步扩散;另一方面,它会吸引少子(P 区的电子和 N 区的空穴)越过空间电荷区而进入对方区域,这称为少子的漂移,少子的漂移将使内建电场减小。实际上,在 PN 结开始形成时,多子的扩散运动占优势,随着扩散运动的进行,空间电荷区逐渐加宽,内建电场也越来越大,于是多子的扩散运动减弱而少子的漂移运动加强,直到多子的扩散运动与少子的漂移运动达到动态平衡以后,空间电荷区的宽度才相对稳定下来,此时多子的扩散电流与少子的漂移电流相等,通过 PN 结的净电流为零。

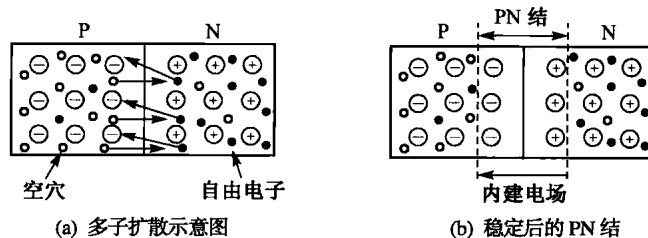


图 1.1.1 PN 结的形成

### 2. PN 结的单向导电性

如果给 PN 结外加电压,则会打破 PN 结内多子扩散运动和少子漂移运动之间的平衡状态,从而使 PN 结的导电性能发生改变。

在图 1.1.2(a) 中 PN 结外加正向电压,此时 P 区电位高于 N 区电位,称为正向偏置(简称正偏)。外加电场方向与 PN 结内建电场方向相反, P 区内的多子空穴和 N 区内的多子电子将在外电场的作用下向 PN 结内移动,当 P 区的空穴进入 PN 结后,就要和负离子中和,使 PN 结内 P 区一侧的负电荷量减少。同样,当 N 区的电子进入 PN 结后也会使 PN 结内 N 区一侧的正电荷量减少。结果空间电荷区变窄,内建电场被削弱。多数载流子易于通过 PN 结,形成较大的正向电流  $I_F$ , 此时 PN 结呈现低阻导通状态。

在图 1.1.2(b) 中 PN 结外加反向电压,此时 N 区电位高于 P 区电位,称为反向偏置(简称反偏)。外加电场方向与 PN 结内建电场方向相同,在外加电场的作用下, P 区的空穴和 N 区的电子将进一步远离 PN 结,使空间电荷区加宽,内电场加强,多数载流子很难通过 PN 结。但是,内建电场的增加,

却有利于少子的漂移运动,因此少子的漂移形成了反向电流  $I_R$ 。由于少数子数量很少,所以反向电流  $I_R$  数值很小,并且受环境温度影响较大。此时可以认为 PN 结基本上不导通,呈现高阻截止状态。

由以上分析可知,正向偏置时,PN 结导通;反向偏置时,PN 结截止。这就是 PN 结的单向导电性。

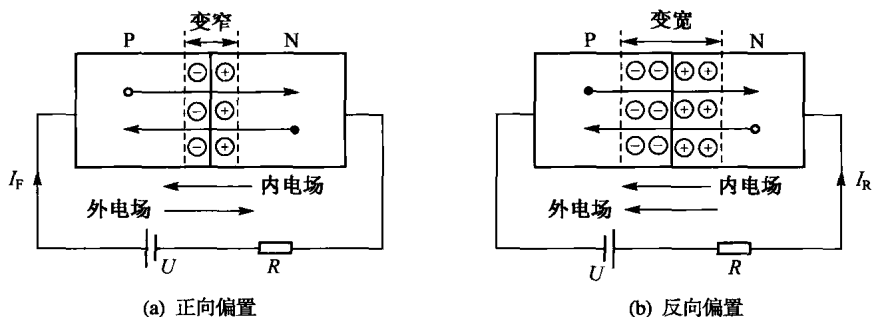


图 1.1.2 PN 结的单向导电性

## 1.1.2 半导体二极管的结构、伏安特性及主要参数

### 1. 半导体二极管的结构

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,由 P 区引出的电极称为阳极或正极,由 N 区引出的电极称为阴极或负极,电路符号如图 1.1.3 (a) 所示。

根据内部结构的不同,二极管可分为点接触型、面接触型和平面型三种。

图 1.1.3 (b) 为点接触型二极管的结构示意图,由一根金属丝经过特殊工艺与半导体表面相接形成 PN 结,因而结面积较小,不能通过较大的电流,但其结电容也小,一般在  $1\text{ pF}$  以下,所以适用于高频场合。

图 1.1.3 (c) 是面接触型二极管的结构示意图,采用合金法工艺制成,结面积大,能够通过较大的电流,但其结电容也大,因而适用于低频、大电流场合,一般仅作为整流管。

图 1.1.3 (d) 是平面型二极管的结构示意图,采用扩散法工艺制成。结面积大的适宜用于大功率整流,结面积小的适宜用做数字电路中的开关。

根据半导体材料的不同,二极管可分为硅管和锗管。

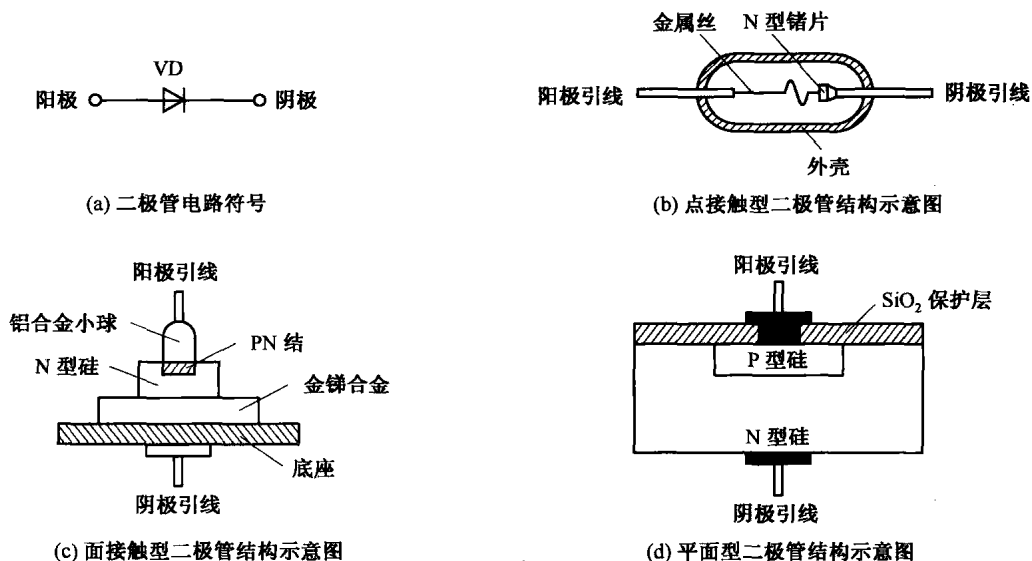


图 1.1.3 半导体二极管电路符号与结构

## 2. 半导体二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指二极管两端电压与其中电流的关系。图 1.1.4 所示为 2AP15(锗管)和 2CZ52(硅管)的伏安特性。

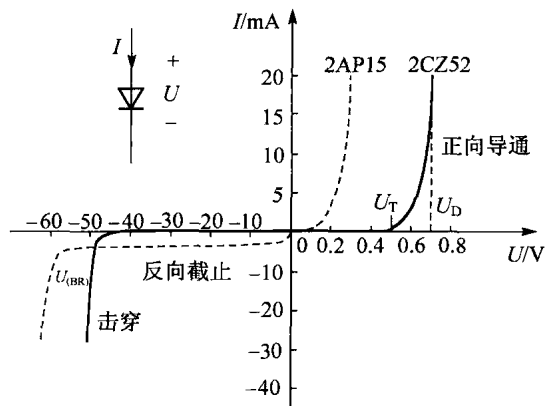


图 1.1.4 二极管的伏安特性曲线

当二极管承受的正向电压较小时,外电场较小,不足以克服 PN 内电场对多子扩散运动的阻碍作用,所以几乎没有电流通过二极管。当正向电压超过一定数值  $U_T$  后,内电场被大大削弱,这时才有电流流过二极管,  $U_T$  称为死区电压或阈值电压。硅管的死区电压  $U_T$  约为 0.5 V, 锗管约为 0.1 V。二极管一旦导通后,其正向电流随电压的增大而迅速增大。当正向电流大到一定数值后,二极管的端电压几乎维持不变,这个电压称为二极管的正向电压  $U_D$ 。对于硅管,正向电压  $U_D$  约为 0.6~0.8 V, 对于锗管,约为 0.2~0.3 V。

当二极管承受反向电压时,只有很小的反向电流流过二极管,二极管处于截止状态。在反向电压不超过某一范围时,反向电流的大小基本上不随反向电压变化而呈饱和状态,故又称为反向饱和电流。反向电流是由少子的漂移运动所形成的,其大小受温度影响较大。

当二极管承受的反向电压增大到一定数值  $U_{(BR)}$  时,反向电流急剧增大,这种现象称为反向电击穿,击穿时的反向电压  $U_{(BR)}$  称为反向击穿电压。发生电击穿后,二极管将失去单向导电性。电击穿后二极管不一定损坏,在撤除外加反向电压后,其性能仍可恢复。但如果发生电击穿后,没有采取适当的限流措施限制流过二极管的反向电流,就会使二极管因电流过大引起内部温度过高而损坏,这种现象称为热击穿。电击穿是可逆的,而热击穿是不可逆的,将造成二极管的永久损坏。

由于二极管伏安特性的非线性给其分析带来不便,所以在工程实际中常将二极管的伏安特性在一定条件下近似线性化后,用其简化模型来分析二极管电路,常用的有理想模型和恒压降模型。

所谓理想模型,是指当二极管正向偏置时,二极管导通,认为其管压降为零,二极管相当于短路;当二极管反向偏置时,二极管截止,认为其反向电流为零,二极管相当于开路,如图 1.1.5 所示。具有这种理想特性的二极管称为理想二极管。在实际电路中,当电源电压远大于二极管的正向电压  $U_D$  时,利用其理想模型来近似分析二极管在工程上是可行的。

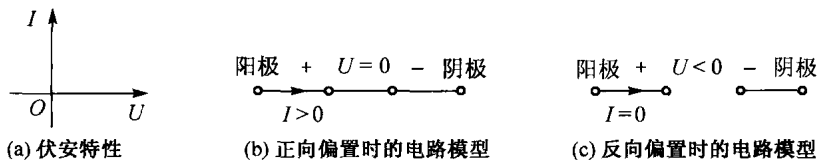


图 1.1.5 二极管的理想模型

所谓恒压降模型,是指当二极管正向导通时,认为其管压降等于正向电压  $U_D$ ,且不随电流变化。硅管  $U_D$  的典型值为 0.7 V, 锗管为 0.3 V, 如图 1.1.6 所示。在实际电路中,只有当二极管中的正向电流超过 1 mA 时,使用此模型才能获得较准确的结果。

## 3. 半导体二极管的主要参数

为了简单明了地表示半导体器件的性能和极限运用条件,每一种半导体器件都有一些相应的参数。生产厂家将这些参数汇编成手册,供用户选择器件时参考。半导体二极管的主要参数有以下 4 个。

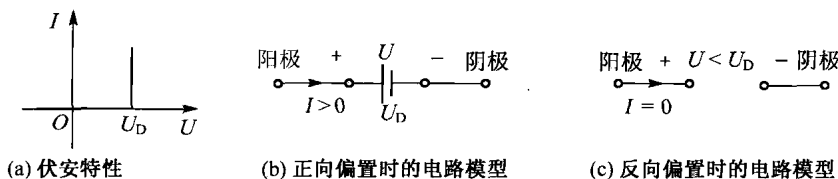


图 1.1.6 二极管的恒压降模型

### (1) 最大整流电流 $I_F$

最大整流电流是指二极管长期运行时允许通过的最大半波整流电流的平均值, 由 PN 结的面积和散热条件以及半导体材料来决定。超过此值时, 可能导致二极管因过热而损坏。

### (2) 最高反向工作电压 $U_R$

为保证二极管不被反向击穿而规定的最大反向工作电压。一般规定为反向击穿电压  $U_{(BR)}$  的一半或三分之二, 以保证使用时有一定的安全裕度。

### (3) 反向电流 $I_R$

反向电流  $I_R$  是指在室温条件下, 在二极管两端加上规定的反向电压时, 流过二极管中的反向电流。反向电流值越小, 说明二极管的单向导电性越好。温度增加时, 反向电流也增加。小功率硅管的反向电流较小, 一般在几个  $\mu A$  以下。锗管的反向电流较大, 为硅管的几十到几百倍, 且受温度的影响比硅管大。

### (4) 最高工作频率 $f_M$

二极管在高频下应用时, 由于 PN 结具有电容效应, 当频率大到一定程度时, 二极管的单向导电性将明显地变差, 这一频率就是二极管的最高工作频率。

## 1.1.3 半导体二极管的应用

二极管虽然是最简单的半导体器件, 但它的应用却很广泛, 可用来进行整流、限幅、钳位、检波以及在数字电路中作为开关元件等。

在分析二极管的应用电路时, 常将二极管理想化。为了判断二极管在电路中的工作状态, 可先求出二极管阳极和阴极之间的开路电压和极性。若阳极与阴极之间的开路电压为正, 说明阳极电位高于阴极电位, 二极管接入后必导通; 否则, 二极管将处于截止状态。

### 1. 整流电路

整流电路的作用是把交流电压变换为直流电压。在图 1.1.7(a) 中, 设  $u_i = U_m \sin \omega t$ 。当  $u_i$  为正半周时, a 端电位高于 b 端电位, 二极管承受正向电压而导通, 忽略二极管的正向压降,  $u_o = u_i$ 。若  $u_i$  为负半周时, b 端电位高于 a 端电位, 二极管承受反向电压而截止, 忽略二极管的反向电流, 负载上的电压为零。可见, 利用二极管的单向导电性, 可以把交流电压变换成单向脉动的直流电压, 其波形如图 1.1.7(b) 所示。

### 2. 限幅电路

限幅电路的作用是把输出电压的幅度限制在一定范围之内。在图 1.1.8(a) 中, 设  $u_i = U_m \sin \omega t$ , 且  $U_m > E_1 > E_2$ 。当  $u_i > E_1$  时,  $VD_1$  因承受正向电压而导通,  $VD_2$  因承受反向电压而截止,  $u_o = E_1$ 。当  $u_i < -E_2$  时,  $VD_2$  因承受正向电压而导通,  $VD_1$  因承受反向电压而截止,  $u_o = -E_2$ 。当  $-E_2 < u_i < E_1$  时,

$VD_1$  和  $VD_2$  均因承受反向电压而截止,  $u_o = u_i$ 。  $u_o$  波形如图 1.1.8 (b) 所示。  $u_o$  的幅值被限制在  $-E_2$  到  $E_1$  之间, 所以是双向限幅。 限幅电路也称为削波电路。

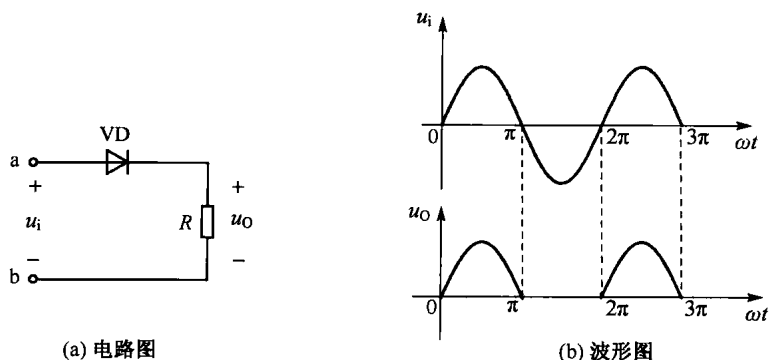


图 1.1.7 单相半波整流电路

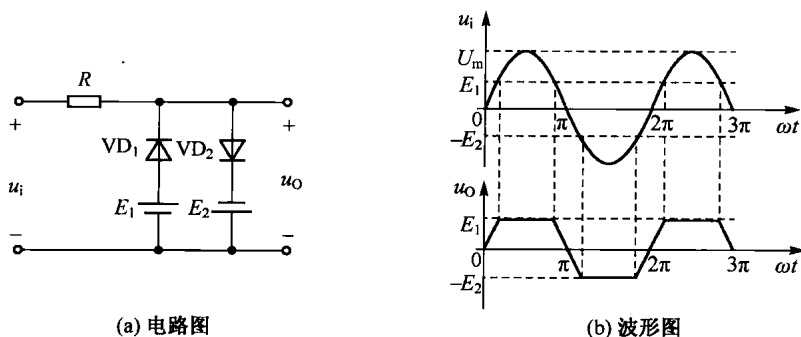


图 1.1.8 双向限幅电路及其波形

### 3. 钳位电路

钳位电路能把输出电压信号的最大值或最小值固定在一定的值上。图 1.1.9 (a) 中设  $u_i = U_m \sin \omega t$ , 且  $U_m > E$ , 电容初始电压为零。当  $0 < \omega t < \alpha$  时,  $u_i < E$ , 二极管 VD 截止,  $u_o = u_i$ ; 当  $\alpha < \omega t < \pi/2$  时,  $u_i > E$ , 二极管 VD 导通, 电容  $C$ <sup>①</sup> 充电,  $u_o = E$ ; 当  $\omega t = \pi/2$  时, 电容 C 两端电压达到最大值, 此时  $u_C = U_m - E$ ; 当  $\omega t > \pi/2$  以后, 二极管 VD 因承受反向电压而截止, 电容 C 因无放电回路其两端电压保持不变,  $u_o = u_i - u_C = u_i - (U_m - E)$ ; 所以  $u_o$  的波形如图 1.1.9 (b) 所示。

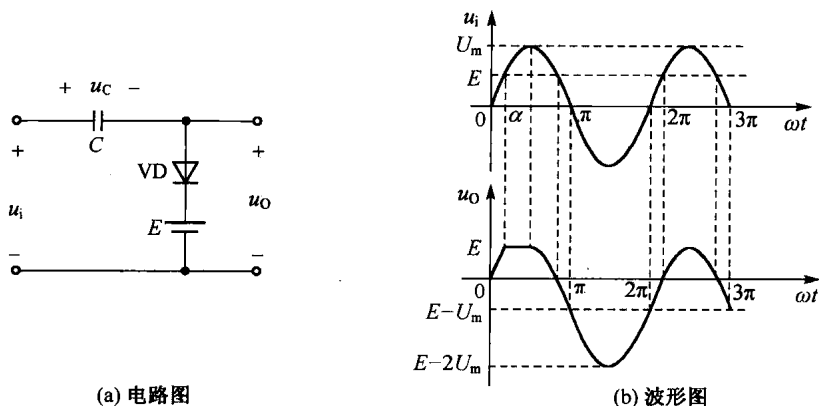


图 1.1.9 钳位电路及其波形

① 根据出版规范, 当 R, L, C 等元器件符号在正文中表示元器件本身时, 是一个名称(常量), 应使用正体。全书同——编者注。

**例 1.1.1** 在图 1.1.10 中设二极管的正向压降为  $0.7\text{ V}$ ，其余参数如图中所示，试分析电路中各二极管的工作状态并求出  $U_O$  的值。

**解：**为了判断二极管在电路中的工作状态，关键是要计算出二极管阳极与阴极之间的开路电压，如果开路电压大于零(对于理想二极管)或者大于其正向压降  $U_D$ (考虑二极管正向压降时)，则说明该二极管实际处于正向偏置而导通；如果开路电压小于零(对于理想二极管)或者小于其正向压降  $U_D$ (考虑二极管正向压降时)，则说明该二极管实际处于反向偏置而截止。

在图 1.1.10(a)所示电路中，先将二极管  $VD_1$  断开，则  $VD_2$  因承受正向电压而导通，此时可计算出  $VD_1$  阳极与阴极之间的开路电压为  $3 - 0.7 = 2.3\text{ V}$ ，所以  $VD_1$  处于导通状态；同理，如将二极管  $VD_2$  断开， $VD_1$  将因承受反向电压而截止，此时可计算出  $VD_2$  阳极与阴极之间的开路电压为  $10 - (-3) = 13\text{ V}$ ，所以  $VD_2$  也处于导通状态。综上所述，该电路中  $VD_1$  和  $VD_2$  均处于导通状态，因而  $U_O = 0.7 - 3 = -2.3\text{ V}$ 。

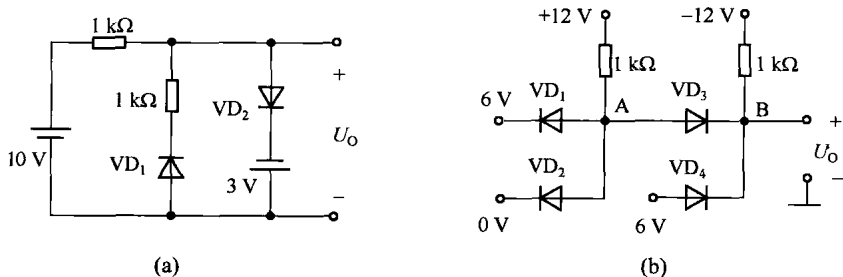


图 1.1.10 例 1.1.1 的图

在图 1.1.10(b)所示电路中，先将二极管  $VD_3$  断开，此时  $VD_1$  阳极与阴极之间的开路电压为  $0.7 - 6 = -5.3\text{ V}$ ， $VD_2$  阳极与阴极之间的开路电压为  $6 + 0.7 - 0 = 6.7\text{ V}$ ， $VD_4$  阳极与阴极之间的开路电压为  $6 - (-12) = 18\text{ V}$ ，所以  $VD_1$  截止， $VD_2$  和  $VD_4$  导通。 $VD_2$  导通后 A 点电位  $U_A = 0.7\text{ V}$ ， $VD_4$  导通后 B 点电位  $U_B = 6 - 0.7 = 5.3\text{ V}$ ，因此  $VD_3$  阳极与阴极之间的开路电压为  $U_A - U_B = 0.7 - 5.3 = -4.6\text{ V}$ ，所以  $VD_3$  实际处于截止状态。由于  $VD_3$  处于截止状态，以上对于  $VD_1$ ， $VD_2$  和  $VD_4$  工作状态的 analysis 正确， $U_O = U_B = 5.3\text{ V}$ 。该电路中  $VD_2$  和  $VD_4$  起钳位作用， $VD_1$  和  $VD_3$  起隔离作用。

**例 1.1.2** 在图 1.1.11 所示电路中，二极管为理想元件，试画出该电路的电压传输特性(输出电压  $u_O$  与输入电压  $u_i$  的函数关系)；如果  $u_i = 10\sin\omega t\text{ V}$ ，试画出  $u_O$  的波形。

**解：**先将二极管  $VD_1$  和  $VD_3$  断开，如图 1.1.12(a)所示，由该图可知， $VD_2$  处于导通状态， $U_b = U_c = -5\text{ V}$ 。如果  $u_i < 10\text{ V}$ ， $VD_4$  导通， $U_a = U_d = u_i$ ；如果  $u_i > 10\text{ V}$ ， $VD_4$  截止， $U_a = 10\text{ V}$ ， $U_d = u_i$ 。所以，二极管  $VD_1$  和  $VD_3$  的开路电压分别为

$$u_{ab} = \begin{cases} u_i + 5 & u_i < 10\text{ V} \\ 15\text{ V} & u_i > 10\text{ V} \end{cases}, \quad u_{dc} = u_i + 5$$

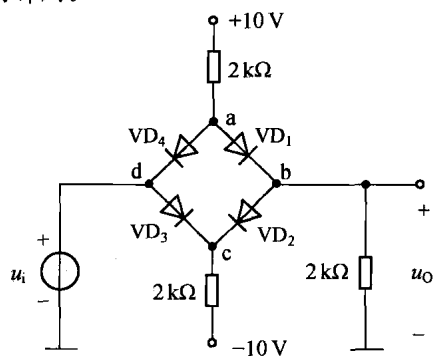


图 1.1.11 例 1.1.2 的图

由上式可知，当  $u_i < -5\text{ V}$  时， $u_{ab} = u_{dc} < 0\text{ V}$ ，二极管  $VD_1$  和  $VD_3$  实际处于截止状态；当  $u_i > -5\text{ V}$  时， $u_{ab} > 0\text{ V}$ ， $u_{dc} > 0\text{ V}$ ，二极管  $VD_1$  和  $VD_3$  实际处于导通状态。

再将二极管  $VD_2$  和  $VD_4$  断开，如图 1.1.12(b)所示，由该图可知， $VD_1$  处于导通状态， $U_a = U_b = 5\text{ V}$ 。如果  $u_i > -10\text{ V}$ ，则  $VD_3$  导通， $U_d = U_c = u_i$ ；如果  $u_i < -10\text{ V}$ ，则  $VD_3$  截止， $U_d = u_i$ ， $U_c = -10\text{ V}$ 。所以，二极管  $VD_2$  和  $VD_4$  的开路电压分别为

$$u_{bc} = \begin{cases} 5 - u_i & u_i > -10 \text{ V} \\ 15 \text{ V} & u_i < -10 \text{ V} \end{cases}, \quad u_{ad} = 5 - u_i$$

由上式可知, 当  $u_i > 5 \text{ V}$  时,  $u_{bc} = u_{ad} < 0 \text{ V}$ , 二极管  $VD_2$  和  $VD_4$  实际处于截止状态; 当  $u_i < 5 \text{ V}$  时,  $u_{bc} > 0 \text{ V}$ ,  $u_{ad} > 0 \text{ V}$ , 二极管  $VD_2$  和  $VD_4$  实际处于导通状态。

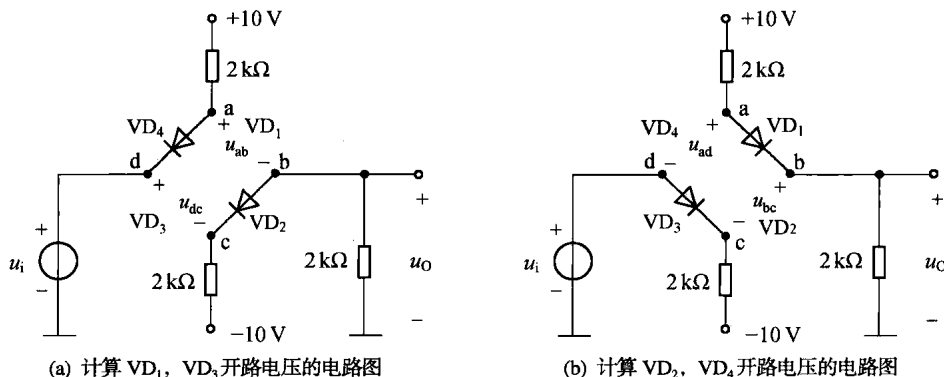


图 1.1.12 例 1.1.2 的分析用图

综上所述, 当  $u_i < -5 \text{ V}$  时,  $VD_1$  和  $VD_3$  截止,  $VD_2$  和  $VD_4$  导通; 当  $-5 \text{ V} < u_i < 5 \text{ V}$  时,  $VD_1$ ,  $VD_2$ ,  $VD_3$  和  $VD_4$  均导通; 当  $u_i > 5 \text{ V}$  时,  $VD_1$  和  $VD_3$  导通,  $VD_2$  和  $VD_4$  截止。所以输出电压  $u_O$  的大小为

$$u_O = \begin{cases} -5 \text{ V} & u_i < -5 \text{ V} \\ u_i & -5 \text{ V} < u_i < 5 \text{ V} \\ 5 \text{ V} & u_i > 5 \text{ V} \end{cases}$$

根据上式, 可画出该电路的电压传输特性和输入-输出电压波形如图 1.1.13 所示。

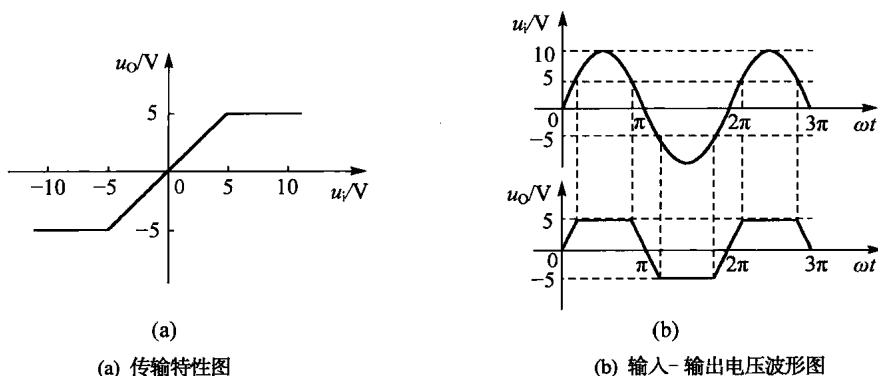


图 1.1.13 例 1.1.2 的结果图

### 思考题

1.1.1 硅管和锗管的伏安特性 ( $U_{BE}$ ,  $I_R$ ) 有何不同之处?

1.1.2 为什么二极管的反向饱和电流与外加反向电压大小基本无关, 而受环境温度的影响比较大? 硅管和锗管相比较, 哪种二极管的反向电流受温度影响较大?

1.1.3 怎样用万用表来识别二极管的阳极和阴极并判断二极管的好坏?

1.1.4 用万用表  $R \times 100 \Omega$  挡和  $R \times 1 \text{ k}\Omega$  挡分别测量某二极管的正向电阻, 所测得的阻值是否相同? 为什么?

1.1.5 硅二极管的正向压降约为  $0.7 \text{ V}$ , 如果把一节  $1.5 \text{ V}$  的电池按正向接法直接接于硅二极管两端, 会有什么后果?