

职业教育电工电子技术仿真学习法系列教材
电工电子中高职衔接示范教材

◎ 主编 牛百齐 梁海霞 贾玉凤

模拟

电子技术基础与仿真

(Multisim10)



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

职业教育电工电子技术仿真学习法系列教材
电工电子中高职衔接示范教材

模拟电子技术基础与仿真 (Multisim10)

牛百齐 梁海霞 贾玉凤 主 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本教材以项目为单元，工作任务为引领，操作为主线，技能为核心，将仿真技术知识融入教学中；将虚拟仿真技术与真实实验结合，采用“教学做一体化”模式，培养学生分析和解决问题的能力，形成职业技能。

全书共分9个项目，分别是认知晶体二极管及 Multisim 10 仿真、认知半导体晶体管、基本放大电路的分析及应用、集成运算放大器的分析及应用、负反馈放大电路的分析及应用、波形发生电路的分析及应用、功率放大电路的分析及应用、直流稳压电源的分析及应用和综合训练项目：晶体管收音机的安装调试。

本书可作为职业院校电子、通信、自动化、电气、信息等专业的教材，也可供从事电工工作的技术人员参考。

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

模拟电子技术基础与仿真：Multisim10/牛百齐，梁海霞，贾玉凤主编. —北京：电子工业出版社，2016.7
ISBN 978-7-121-29490-7

I. ①模… II. ①牛… ②梁… ③贾… III. ①模拟电路—电子技术—高等职业教育—教材②电子电路—计算机仿真—应用软件—高等职业教育—教材 IV. ①TN710②TN702

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 173656 号

策划编辑：白楠

责任编辑：白楠 特约编辑：王纲

印刷：三河市双峰印刷装订有限公司

装订：三河市双峰印刷装订有限公司

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：15.75 字数：403.2 千字

版次：2016 年 7 月第 1 版

印次：2016 年 7 月第 1 次印刷

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）88254888，88258888。

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）88254592，bain@phei.com.cn。



为了更好地满足职业教育改革的需要,结合办学定位、岗位需求、学生学业水平等情况,贯彻项目驱动教学理念,以培养学生的综合工作能力为出发点,实现技能型人才的培养目标,在总结多年的教学改革实践中的成功经验下,编写了这本《模拟电子技术基础与仿真(Multisim 10)》教材。

本教材以项目为单位组织教学活动,打破传统知识传授方式,变书本知识传授为动手能力培养,体现职业能力为本位的职业教育思想。全书贯穿了 Multisim 10 仿真,为课程教学提供了一种先进的教学手段和方法,使得模拟电子技术课程的教学更加生动活泼,实验更加灵活方便。主要特点如下:

(1) 将仿真技术融入电子技术课程的教学过程中,仿真软件采用 NI Multisim 10 版本,该软件为用户提供了丰富的元件库和功能齐全的各类虚拟仪器,可以对各种电路进行全面的仿真分析和设计,可方便地对电路参数进行测试和分析;操作中不消耗实际的元器件,所需元器件的种类和数量不受限制,且具有界面直观、操作方便、易学易用的特点。引入仿真技术,丰富了教学手段,大大改进了电子技术课程学习方法,可有效提高学习效率。

(2) 以项目任务来构建完整的教学组织形式。教材以项目为单元,工作任务为引领,操作为主线,技能为核心,将仿真技术知识点分解到项目教学中,项目由易到难,循序渐进,符合认知规律。

(3) 采用“学中做,做中学,教学做一体化”模式,将虚拟仿真技术与真实实验结合,在动手操作实践过程中,全面掌握知识,形成技能。同时,仿真软件借助计算机,可以随时随地,不受限制地学习,特别适合学生自学,使学习过程变得轻松愉快。

(4) 教材适用面广,书中“*”内容,可供不同层次、不同专业的教学需要选择。

全书共分 9 个项目,分别是认知晶体二极管及 Multisim 10 仿真、认知半导体晶体管、基本放大电路的分析及应用、集成运算放大器的分析及应用、负反馈放大电路的分析及应用、波形发生电路的分析及应用、功率放大电路的分析及应用、直流稳压电源的分析及应用和综合训练项目:晶体管收音机的安装调试。

本教材建议教学学时为 60~90 学时,教学时可结合具体专业实际,对教学内容和教学时数进行适当调整。

本书由牛百齐、梁海霞、贾玉凤担任主编,参与编写的还有江文莉、李风、潘谈、常淑英、李汉挺、孙尧、马艳霞、孙盟。

本教材在编写过程中,参考了大量的专家著作和资料,得到许多专家和学者的支持,在此对他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不妥、疏漏或错误之处在所难免,恳请专家、同行批评指正,也希望得到读者的意见和建议。

目 录

| | |
|------------------------------|------|
| 项目 1 认知晶体二极管及 Multisim 10 仿真 | (1) |
| 1.1 任务 1 认知晶体二极管 | (1) |
| 1.1.1 半导体及其特性 | (1) |
| 1.1.2 本征半导体 | (2) |
| 1.1.3 PN 结的形成 | (3) |
| 1.1.4 半导体二极管 | (6) |
| 1.1.5 特殊二极管 | (10) |
| 操作训练 1 万用表的使用 | (12) |
| 操作训练 2 二极管的识别与检测 | (17) |
| 1.2 任务 2 认知 Multisim 10 仿真软件 | (18) |
| 操作训练 3 Multisim 10 仿真软件基本操作 | (23) |
| 操作训练 4 虚拟仪器、仪表的使用 | (31) |
| 习题 1 | (40) |
| 项目 2 认知半导体晶体管 | (43) |
| 2.1 任务 1 认知双极型晶体管 | (43) |
| 2.1.1 双极型晶体管的结构和类型 | (43) |
| 2.1.2 晶体管的放大作用 | (44) |
| 操作训练 1 晶体管的检测 | (49) |
| 2.2 任务 2 认知单极型晶体管 | (51) |
| 2.2.1 结型场效应管 | (51) |
| 2.2.2 绝缘栅场效应管 | (56) |
| 2.2.3 场效应管的使用 | (60) |
| 操作训练 2 场效应管的测试 | (62) |
| 操作训练 3 双极型晶体管和场效应管特性曲线测试 | (63) |
| 习题 2 | (65) |
| 项目 3 基本放大电路的分析及应用 | (68) |
| 3.1 任务 1 单级放大电路的分析与测试 | (68) |
| 3.1.1 放大电路概述 | (68) |
| 3.1.2 基本放大电路 | (69) |
| 3.1.3 共发射极放大电路的分析 | (72) |
| 3.1.4 分压式偏置放大电路 | (79) |
| *3.1.5 共集电极放大电路 | (81) |
| *3.1.6 共基极放大电路 | (83) |
| 操作训练 1 示波器的使用 | (85) |

| | |
|---------------------------|-------|
| 操作训练 2 单管共射极放大电路测试 | (90) |
| 3.2 任务 2 多级放大电路 | (94) |
| 3.2.1 放大电路的级间耦合方式 | (94) |
| 3.2.2 多级放大电路的分析 | (96) |
| 3.2.3 放大电路的频率特性 | (98) |
| *3.3 任务 3 场效应管放大电路 | (100) |
| 3.3.1 场效应管的偏置电路及静态分析 | (100) |
| 3.3.2 场效应管放大电路的动态分析 | (102) |
| 操作训练 3 场效应晶体管放大电路的仿真与测试 | (106) |
| 习题 3 | (108) |
| 项目 4 集成运算放大器的分析及应用 | (111) |
| 4.1 任务 1 集成运算放大器的认知 | (111) |
| 4.1.1 集成运放的组成 | (111) |
| 4.1.2 差动放大电路 | (113) |
| 4.1.3 集成运算放大器的主要参数 | (115) |
| 4.1.4 集成运放的分析 | (115) |
| 4.2 任务 2 集成运算放大器的应用 | (117) |
| 4.2.1 比例运算放大电路 | (117) |
| 4.2.2 加减运算电路 | (119) |
| 4.2.3 微分和积分电路 | (121) |
| 4.2.4 电压比较器 | (122) |
| 4.2.5 滞回比较器 | (124) |
| 操作训练 基本运算放大电路功能测试 | (125) |
| 习题 4 | (129) |
| 项目 5 负反馈放大电路的分析及应用 | (132) |
| 5.1 任务 1 放大电路中反馈的分析 | (132) |
| 5.1.1 反馈的概念及类型 | (132) |
| 5.1.2 反馈类型的分析与判断 | (134) |
| 5.2 任务 2 负反馈的应用 | (137) |
| 5.2.1 负反馈的四种组态 | (137) |
| 5.2.2 负反馈对放大电路的影响 | (139) |
| 操作训练 负反馈对放大电路性能影响测试 | (141) |
| 习题 5 | (144) |
| 项目 6 波形发生电路的分析及应用 | (147) |
| 6.1 任务 1 RC 正弦波振荡电路的分析 | (147) |
| 6.1.1 正弦波振荡电路的组成与振荡条件 | (147) |
| 6.1.2 RC 正弦波振荡器 | (150) |
| 操作训练 1 RC 正弦波振荡器测试 | (152) |
| 6.2 任务 2 LC 正弦波振荡电路 | (154) |

| | | |
|-------------|---------------------|-------|
| 6.2.1 | LC 并联电路的频率特性 | (154) |
| 6.2.2 | 变压器反馈式 LC 振荡电路 | (156) |
| 6.2.3 | 三点式 LC 振荡电路 | (157) |
| | 操作训练 2 LC 正弦波振荡电路测试 | (159) |
| 6.3 | 任务 3 石英晶体正弦波振荡电路 | (160) |
| 6.3.1 | 石英晶体的基本特性与等效电路 | (161) |
| 6.3.2 | 石英晶体振荡电路 | (162) |
| 6.4 | 任务 4 非正弦波形发生电路的分析 | (163) |
| 6.4.1 | 方波发生器 | (163) |
| 6.4.2 | 三角波发生电路 | (166) |
| 6.4.3 | 锯齿波发生电路 | (167) |
| 6.4.4 | 8038 集成函数发生器 | (168) |
| | 操作训练 3 非正弦波形发生电路测试 | (170) |
| | 习题 6 | (174) |
| 项目 7 | 功率放大电路的分析及应用 | (178) |
| 7.1 | 任务 1 互补对称式功率放大电路分析 | (178) |
| 7.1.1 | 功率放大电路的基本要求 | (178) |
| 7.1.2 | 功率放大电路的分类 | (179) |
| 7.1.3 | OCL 互补对称功率放大电路 | (179) |
| 7.1.4 | OTL 互补对称功率放大电路 | (184) |
| 7.1.5 | 带前置放大级的功率放大器 | (185) |
| | 操作训练 功率放大电路测试 | (188) |
| 7.2 | 任务 2 集成功率放大器分析 | (190) |
| 7.2.1 | LM386 集成功率放大电路 | (190) |
| 7.2.2 | TDA2030A 音频功率放大电路 | (191) |
| | 习题 7 | (193) |
| 项目 8 | 直流稳压电源的分析及应用 | (195) |
| 8.1 | 任务 1 整流与滤波电路分析 | (195) |
| 8.1.1 | 单相半波整流电路 | (196) |
| 8.1.2 | 单相桥式整流电路 | (197) |
| 8.1.3 | 滤波电路 | (198) |
| | 操作训练 1 桥式整流滤波仿真实验 | (201) |
| 8.2 | 任务 2 稳压电路分析 | (202) |
| 8.2.1 | 稳压管稳压电路 | (203) |
| 8.2.2 | 串联稳压电路 | (205) |
| 8.2.3 | 集成稳压电路 | (206) |
| | 操作训练 2 直流稳压电路性能测试 | (208) |
| | 习题 8 | (209) |

| | |
|-----------------------|-------|
| 项目 9 综合训练 晶体管收音机的安装调试 | (211) |
| 9.1 训练 1 晶体管收音机电路分析 | (211) |
| 9.2 训练 2 收音机元器件的识别与检测 | (214) |
| 9.3 训练 3 收音机元器件的焊接 | (221) |
| 9.4 训练 4 收音机元器件的安装 | (227) |
| 9.5 训练 5 收音机电路的调试与检修 | (235) |
| 参考文献 | (241) |

认知晶体二极管及Multisim 10仿真

知识目标

- ① 熟悉半导体的概念及其特点。
- ② 理解 PN 结的形成及特性。
- ③ 熟悉半导体二极管的伏安特性、主要参数。
- ④ 熟悉稳压二极管的伏安特性、稳压原理及主要参数。

技能目标

- ① 掌握万用表的结构及使用。
- ② 掌握二极管的识别与检测方法。
- ③ 熟悉 Multisim 10 仿真软件的使用。
- ④ 熟悉虚拟仪器仪表的使用方法。

1.1 任务1 认知晶体二极管

半导体器件是构成各种电子电路的基础，而半导体器件是由半导体材料制成的，所以在学习电子电路之前了解半导体的一些基本知识非常必要。

本任务首先介绍半导体的特性、PN 结的形成和特性，在此基础上介绍半导体二极管的结构、伏安特性及参数，讨论二极管的特点及应用，为合理选择和使用二极管打下基础。

1.1.1 半导体及其特性

自然界的各种物质根据其导电性的不同可分为导体、绝缘体和半导体三大类。导体中有大量的自由电子，外加电场后，自由电子可以定向运动，形成电流。在外电场作用下，物质内部能形成电流的粒子称为载流子，导体如铜、铁等金属内部有大量载流子——自由电子，因此导电性能很好，而绝缘体内部几乎没有可以自由移动的电荷——载流子很少，因此导电性能很差。由于半导体物质内部的特殊结构，载流子数量比导体的少，比绝缘体的多，因此半导体的导电性能居于两者之间，由此可见，导电性能取决于内部载流子的多少。

通常情况下纯净半导体的导电能力很差，随着外界条件改变，其导电能力会有较大改变。半导体具有以下特性。



(1) 热敏特性：当半导体受热时，电阻率会发生变化，利用这个特性制成热敏电阻。热敏电阻可分为正温度系数 (PTC) 和负温度系数 (NTC) 两种，如 MF58 属于负温度系数的热敏电阻，即其电阻率随着温度的升高而降低。

(2) 光敏特性：当半导体受到光照时，电阻率会发生改变，利用这个特性制成光敏器件，如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管等。光敏电阻随着光的照射，其电阻值下降；在光照条件下光敏二极管和光敏三极管的反向电流增加。

(3) 杂敏特性：当纯净的半导体中掺入微量的其他杂质元素（如磷、硼等）时，其导电能力会显著增加，利用这个特性制成半导体器件，如半导体二极管、半导体三极管、场效应管、晶闸管等。

1.1.2 本征半导体

根据所含杂质的多少，半导体分为纯净半导体和杂质半导体。纯净半导体几乎不含杂质，它是通过一定的工艺过程将半导体提纯制成的晶体。完全纯净的、具有晶体结构的半导体又称为本征半导体，如单晶硅和单晶锗。

本征半导体的原子结构与其他元素的原子结构一样，绕原子核旋转的电子是分层排布的，最外层的电子叫价电子。硅和锗最外层都有 4 个价电子，被称为 4 价元素，当原子最外层达到 8 个价电子时，物质的结构最稳定。在硅和锗的原子中，除去价电子后的其余部分称为惯性核。硅和锗的原子均可表示为由一个带 4 个基本正电荷的惯性核和周围的 4 个价电子组成，如图 1-1 所示。

在本征半导体内部，每个原子与其相邻的 4 个原子，利用共用电子对的方式，形成共价键结构，如图 1-2 所示。

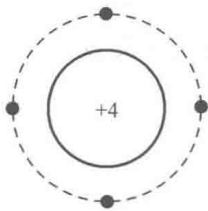


图 1-1 硅（锗）原子结构简图

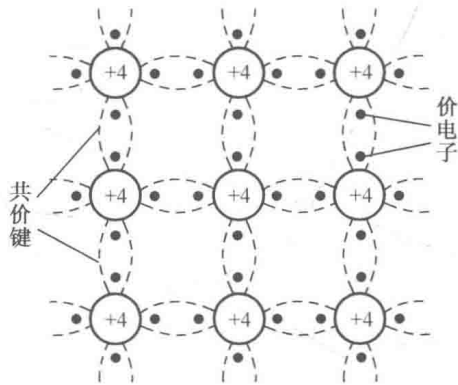


图 1-2 硅（锗）晶体共价键结构

共价键中的价电子由于热运动而获得一定的能量，其中少数能够摆脱共价键的束缚而成为自由电子，同时必然在共价键中留下空位，称为空穴。空穴带正电，如图 1-3 所示。

在一定的温度下，由于热运动转化为价电子的动能，少数价电子由于热激发获得足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子，并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。自由电子和空穴都是运载电荷的粒子，称为载流子。同时，自由电子在运动过程中也会填补空位，称为复合。在一定温度下，激发和复合处于动态平衡，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 1-3 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,价电子将沿一定的方向移动,形成空穴电流。

由于自由电子和空穴所带电荷极性不同,所以它们的运动方向相反,本征半导体中的电流是由电子电流和空穴电流两部分组成的。

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。

本征半导体受热或光照后产生电子空穴对的物理现象称为本征激发。由于常温下本征激发所产生的电子空穴对数目很少,所以本征半导体导电性能很差。当温度升高或光照增强,本征半导体内原子运动加剧,本征激发的电子空穴对增多,与此同时,又使复合的机会相应增多,最后达到一个新的相对平衡,这时电子空穴对的数目自然比常温时多,所以电子空穴对的数目与温度或光照有密切关系。温度越高或光照越强,本征半导体内载流子数目越多,导电性能越好,这就是本征半导体的热敏性和光敏性。

本征半导体的导电能力会随温度或光照的变化而变化,但是它的导电能力是很弱的。如果在本征半导体中掺入其他微量元素(这些微量元素的原子称为杂质),可使半导体的导电能力大大加强,掺入的杂质越多,半导体的导电能力越强,这就是半导体的掺杂特性。

1.1.3 PN 结的形成

在本征半导体中掺入微量的杂质就形成杂质半导体,根据掺入的元素的价电子不同,杂质半导体又分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中,用特殊的工艺方法,有目的地掺入微量的五价元素,如磷(P)元素,就形成了 N 型半导体。

如图 1-4 所示,掺入的磷原子取代了晶格中某些硅原子,仍然与周围的 4 个硅原子利用共用电子对形成共价键结构。由于磷是五价元素,原子最外层有 5 个价电子。用 4 个价电子与周围的硅原子形成共价键结构后,还剩余 1 个价电子,该价电子受磷原子核的束缚很微弱,在一般温度下,均可脱离原子核的束缚而成为自由电子。磷原子失去 1 个价电子后,就成了带正电的离子,通常将其称为施主离子。综上所述,在本征半导体中,每掺入 1 个磷原子,就会产生 1 个自由电子和 1 个施主离子。

在 N 型半导体中,除了因掺杂产生的大量自由电子和相同数量的带正电的施主离子外,还有少量的、本征激发产生的电子空穴对。施主离子牢牢地束缚在晶格中,不能定向移动形成电流,所以它不是载流子。因此,在 N 型半导体中有两种载流子——自由电子和空穴,自由电子的数量多,被称为多数载流子,简称多子;而空穴的数量少,故被称为少数载流子,简称少子。N 型半导体中,载流子的分布情况示意图如图 1-5 所示。

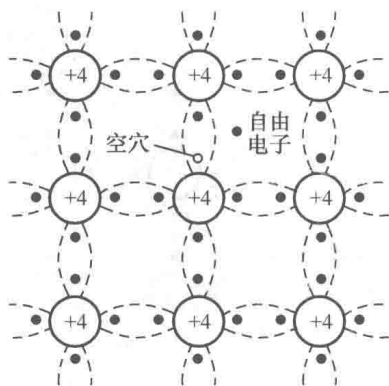


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

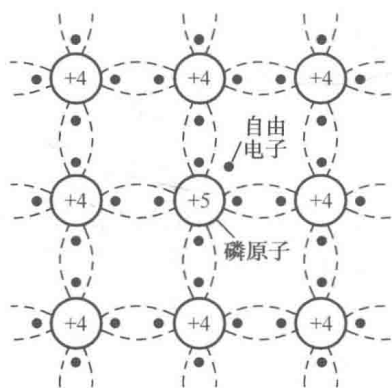


图 1-4 N 型半导体的晶体结构

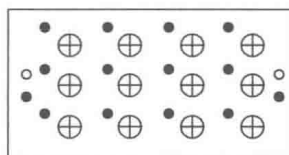


图 1-5 N 型半导体中的载流子

在外加电场作用下，N 型半导体中的载流子都能定向移动形成电流，所以 N 型半导体的导电性能大大好于本征半导体。N 型半导体主要是靠其中的多子——自由电子导电的，所以 N 型半导体又称为电子型半导体。

在 N 型半导体中，正电荷和负电荷的电量相等，所以 N 型半导体是电中性的。

2. P 型半导体

在本征半导体硅（或锗）中，用特殊的工艺方法，有目的地掺入微量的三价元素，如硼（B）元素，就形成了 P 型半导体。

硼是三价元素，当硼原子与周围的 4 个硅原子形成共价键结构时，还缺少一个价电子，这样，就在共价键中产生了 1 个空位，这个空位就是空穴。由于空穴带正电，所以硼原子去除一个基本正电荷，就变成了带负电的离子，通常称其为受主离子。P 型半导体的晶体结构如图 1-6 所示。

在本征半导体中，每加入一个硼原子，就会产生一个空穴和一个受主离子。在 P 型半导体中仍然有空穴和自由电子（本征激发产生的）两种载流子。但是与 N 型半导体不同的是 P 型半导体主要靠多子空穴导电。所以 P 型半导体又称为空穴型半导体。P 型半导体也是电中性的。P 型半导体的载流子分布情况如图 1-7 所示。

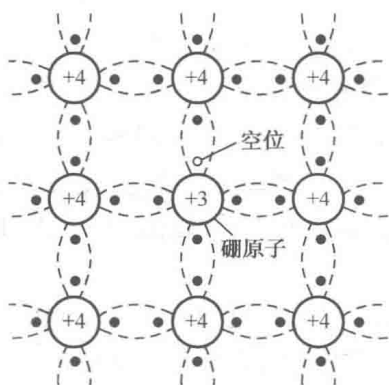


图 1-6 P 型半导体的晶体结构

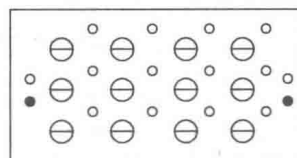


图 1-7 P 型半导体中的载流子



3. PN 结的形成

如果采用特定的工艺方法，使一块半导体的一边形成 P 型半导体，另一边形成 N 型半导体，那么在 P 型半导体和 N 型半导体分界面的附近就会形成一个具有特殊物理性质的区域。

在这个特殊区域的一侧是 P 型半导体，简称 P 区；另一侧是 N 型半导体，简称 N 区。单位体积（每立方厘米）半导体中含有的自由电子或空穴的数目，分别称为电子浓度或空穴浓度。显然，P 区的空穴浓度远大于 N 区的空穴浓度。而 N 区的电子浓度远大于 P 区的电子浓度。这样，空穴和自由电子都要从浓度高的地方向浓度低的地方运动（载流子由浓度高的地方向浓度低的地方运动称为扩散），如图 1-8 所示。

当 P 区的空穴扩散到 N 区后，便与 N 区的自由电子相遇复合掉了。同理，N 区的自由电子扩散到 P 区，又与 P 区的空穴复合了。这样，P 区一侧因为失去空穴而剩下受主离子，带负电；N 区一侧因为失去自由电子而剩下不能移动的施主离子，带正电。于是，形成了一个空间电荷区，产生了一个方向由 N 区指向 P 区的电场，通常称其为内电场。内电场的作用，一是阻碍多子的扩散运动；二是有助于少子向对方运动。在内电场作用下，P 区的少子（自由电子）要向 N 区运动，N 区的少子（空穴）要向 P 区运动（见图 1-8）。少子的上述运动称为漂移。载流子的扩散和漂移是相反的运动。开始时空间电荷较少，内电场较弱，扩散运动占优势；随着扩散运动的进行，空间电荷区不断加宽，内电场不断加强，对多数载流子扩散运动的阻力不断增大，但使少数载流子的漂移运动不断增强，最后扩散运动和漂移运动达到动态平衡。即在相同的时间内由 N 区扩散到 P 区的自由电子和由 P 区漂移到 N 区的自由电子数量相等，由 P 区扩散到 N 区的空穴和由 N 区漂移到 P 区的空穴数量相等。这时，空间电荷区的宽度相对稳定。这个稳定的空间电荷区就称为 PN 结，如图 1-9 所示。

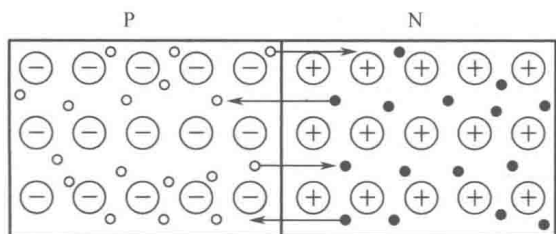


图 1-8 载流子的扩散

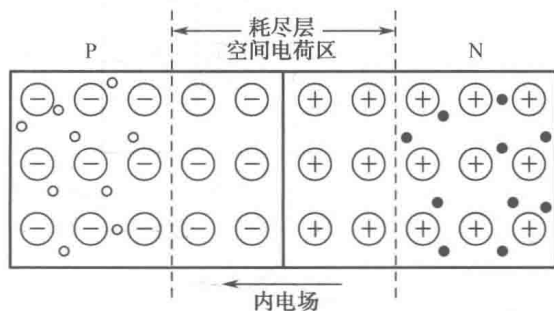


图 1-9 PN 结

4. PN 结的主要物理特性

(1) 在 PN 结中没有载流子，所以 PN 结也称为耗尽层。

(2) PN 结有内电场，其方向由 N 区指向 P 区，即 PN 结的 N 区一侧电位高，P 区一侧电位低。PN 结两端的电压称为接触电压，其值约为零点几伏。内电场阻碍多子的扩散，所以 PN 结也称为阻挡层。

(3) 在 PN 结中，载流子的扩散运动和漂移运动达到动态平衡，所以在没有外加电场的条件下，流过 PN 结的电流为零。

值得指出的是, PN 结除了具有上述物理特性外, 还有其他特性, 其中最为重要的是 PN 结具有单向导电性。

5. PN 结的单向导电性

在 PN 结的 P 区接电源正极, N 区接电源负极, 如图 1-10 (a) 所示, 这时称为给 PN 结加正向电压, 也称为使 PN 结正向偏置, 简称正偏。由于正向电压产生的电场称为外电场, 正偏时外电场方向与 PN 结的内电场方向相反, 削弱了内电场。当外电场足够强时, 综合电场的方向与外电场的方向相同。这样 P 区的多子空穴和 N 区的多子自由电子就会在上述综合电场的作用下向对方扩散, 形成同一方向的电流, 这种电流的方向是由 P 区流向 N 区, 即与外加电压的方向相同, 故称为 PN 结导通了。显然, PN 结导通的条件是正偏。

另一方面, 当 PN 结的 P 区接电源的负极, N 区接电源的正极时, 如图 1-10 (b) 所示, 即给 PN 结外加反向电压, 称为 PN 结反向偏置, 简称反偏。这时外加电场的方向与 PN 结内电场的方向相同, 使得内电场加强, 综合电场的方向与内电场方向相同。在这样的电场作用下, P 区和 N 区的多子不可能向对方扩散, 而 P 区和 N 区的少子可能向对方漂移而形成同一方向的电流, 该电流的方向是由 N 区流向 P 区, 方向与所加的反向电压方向相同, 称为反向电流。但是, 值得指出的是, 由于 P 区和 N 区的少子数量很少, 所以反向电流一定很小, 常为几微安, 通常忽略不计, 认为反向电流的值为零。若通过 PN 结的反向电流为零, 则称 PN 结截止。可见, PN 结反偏截止。

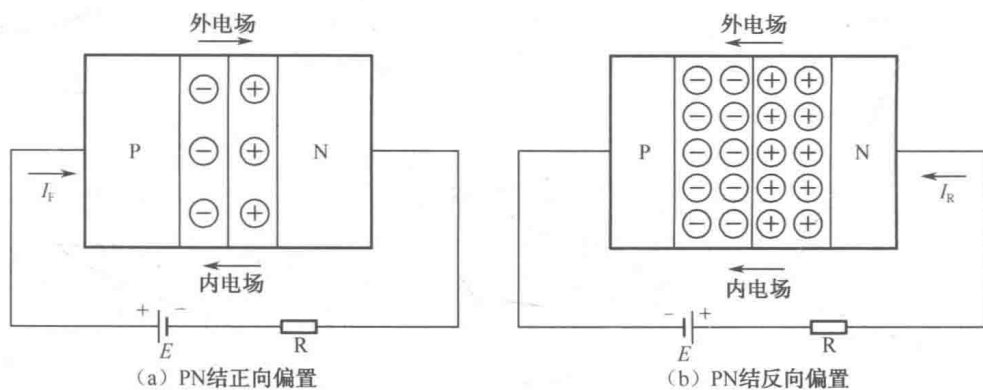


图 1-10 PN 结单向导电特性

综上所述, PN 结加正向偏压时导通, 加反向偏压时截止, 即 PN 结具有单向导电性。

1.1.4 半导体二极管

1. 二极管的分类及特性

若用管壳将一个 PN 结封装起来, 并由 P 区和 N 区分别引出一条引线, 就构成了一只二极管。由 P 区引出的引线称为正极 (也称阳极); 由 N 区引出的引线称为负极 (也称阴极), 如图 1-11 (a) 所示, 二极管的符号如图 1-11 (b) 所示。

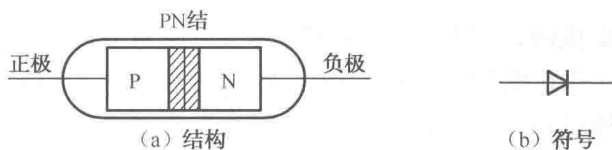


图 1-11 二极管的结构与符号

(1) 半导体二极管的分类

二极管按材料不同可分为硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管等；按结构不同可分为点接触型二极管和面接触型二极管；按用途不同可分为整流管二极管、稳压管二极管、检波管二极管和开关二极管等。

二极管实物外形如图 1-12 所示。

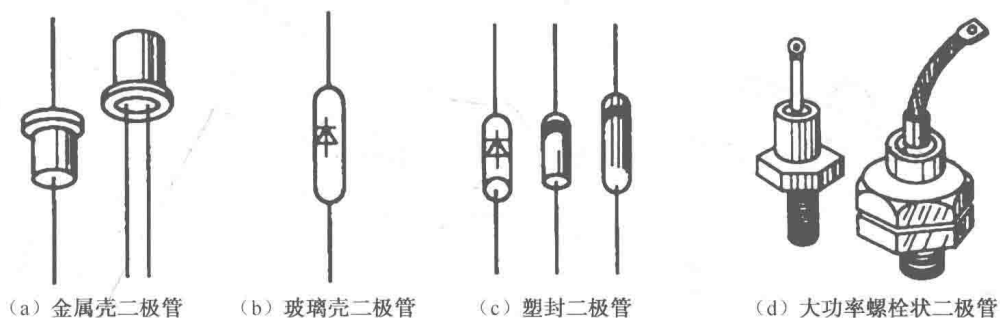


图 1-12 二极管实物外形

点接触型二极管的 PN 结是由一根很细的金属丝和一块半导体通过瞬间大电流熔接在一起形成的，其结面积很小，如图 1-13 (a) 所示，故不能承受大电流和较高的反向电压，一般用于高频检波和开关电路。

面接触型二极管的 PN 结采用合金法或扩散法形成，其结面积比较大，如图 1-13 (b) 所示，可以承受大电流。但由于结面积大，其结电容也比较大，故工作频率低，一般用于低频整流电路。

平面型二极管是一种特制的硅二极管，如图 1-13 (c) 所示，它不仅能通过较大的电流，而且性能稳定可靠，多用于开关、脉冲及高频电路中。

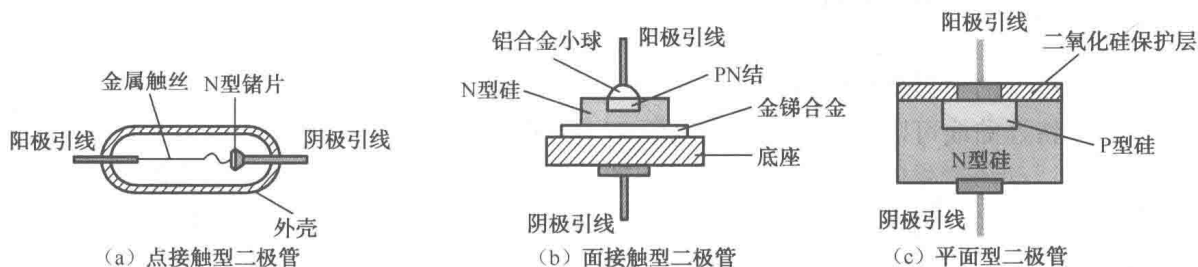


图 1-13 二极管几种常用类型的结构

(2) 半导体二极管的特性

半导体二极管具有单向导电性。在二极管内部有一个 PN 结，当二极管的正极接电源正极，负极接电源负极时，二极管正向偏置导通，有正向电流流过二极管。反之，当二极管正极接



电源负极，负极接电源正极时，二极管反向偏置截止，没有电流流过二极管。二极管的单向导电性也可以这样理解，即正偏时二极管的电阻很小；反偏时二极管的电阻极大。

二极管的单向导电性可用下面的演示实验说明。当二极管正向偏置导通时，指示灯亮，当二极管反向偏置截止时，指示灯灭，如图 1-14 所示。

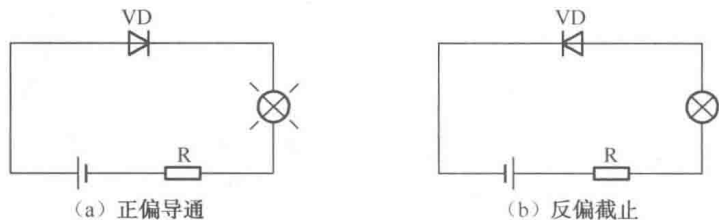


图 1-14 二极管的单向导电性

2. 二极管的伏安特性曲线

在二极管两端加电压，可以测得其电流。将电压和电流的关系绘制成函数图线，即可得到二极管的伏安特性曲线。

二极管正偏时的伏安特性曲线称为正向特性曲线；二极管反偏时的伏安特性曲线称为反向特性曲线。由实验得二极管特性曲线如图 1-15 所示。

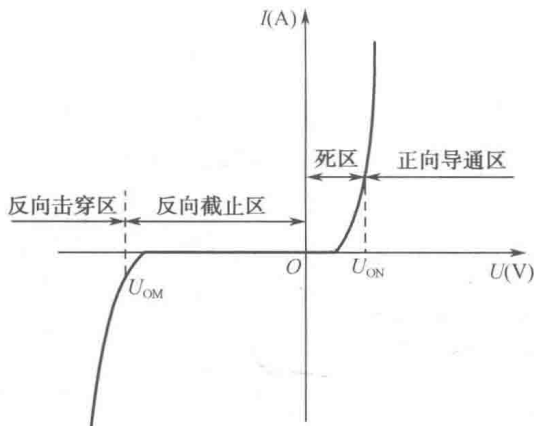


图 1-15 二极管的伏安特性曲线

(1) 二极管的正向特性曲线

由正向特性曲线可以看到，当正向电压 U 较小时，由于外电场不足以克服 PN 结内电场对多子扩散运动所产生的阻力，二极管呈现的正向电阻较大，这时的正向电流很小，近似为零，称为死区。当二极管两端的正向电压达到某一数值后，内电场大大被削弱，二极管正向电阻变得很小，正向电流增加很快，这时二极管导通。二极管导通后，尽管正向电流在较大范围内变化，但二极管两端的正向电压变化很小，此电压称为正向导通电压，用 U_{ON} 表示。硅管的正向导通电压为 $0.5 \sim 0.7V$ ，锗管的正向导通电压为 $0.1 \sim 0.3V$ 。在近似计算中，对于硅管取 $0.7V$ ，对于锗管取 $0.3V$ 。

(2) 二极管的反向特性曲线

当二极管反偏时，外加电场方向与内电场方向相同，内电场被加强，多子的扩散完全受



阻，二极管呈现的反向电阻极大。多子扩散运动形成的正向电流为零，而少子漂移形成的反向电流也很小，近似为零，这时二极管截止。但当反向电压增加到某一数值后，反向电流会突然急剧增加，这种现象称为二极管的反向击穿。此时的电压称为二极管的反向击穿电压，用 U_{OM} 表示。在二极管的反向特性曲线中，电压小于 U_{OM} 的部分称为反向截止区，电压大于 U_{OM} 的部分称为反向击穿区。

3. 主要技术参数

(1) 最大正向工作电流 I_F ：指二极管在长期工作时，允许通过的最大正向平均电流。使用时通过二极管的平均电流不能大于这个值，否则将导致二极管损坏。

(2) 最大反向工作电压 U_{RM} ：指正常工作时，二极管所能承受的反向电压的最大值。一般手册上给出的最大反向工作电压约为击穿电压的一半，以确保管子安全运行。

(3) 最高工作频率 f_M ：指晶体二极管能保持良好工作性能条件下的最高工作频率。

(4) 反向饱和电流 I_S ：指二极管未击穿时流过二极管的最大反向电流。反向饱和电流越小，二极管的单向导电性能越好。

4. 二极管的应用

(1) 限幅电路

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。

通常，将输出电压 u_o 开始不变的电压阈值称为限幅电平。当输入电压高于限幅电平时，输出电压保持不变的限幅称为上限幅。当输入电压低于限幅电平时，输出电压保持不变的限幅称为下限幅。

上限幅电路如图 1-16 (a) 所示。当 $u_i \geq 2.7V$ 时，二极管 VD 导通， $u_o = 2.7V$ ，即将 u_i 的最大电压限制在 $2.7V$ 上；当 $u_i < 2.7V$ 时，二极管 VD 截止，二极管支路开路， $u_o = u_i$ 。图 1-16 (b) 画出了输入 $-5V$ 的正弦波时，该电路的输入、输出波形。

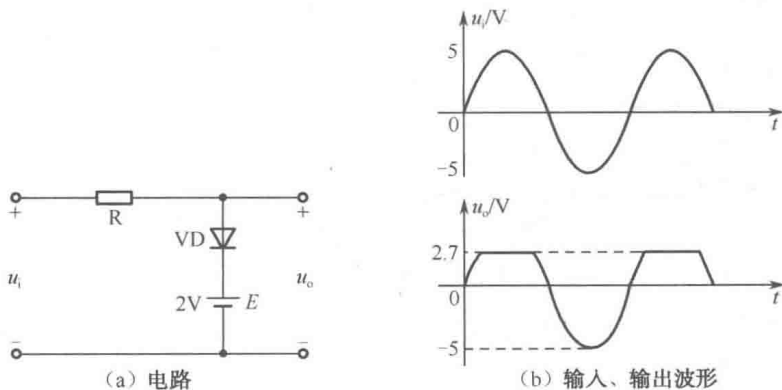


图 1-16 二极管上限幅电路及波形

(2) 二极管整流电路

把交流电变为直流电，称为整流。一个简单的二极管半波整流电路如图 1-17 (a) 所示。若二极管为理想二极管，当输入一正弦波时，由图可知：正半周时，二极管导通（相当开关