



普通高等教育“十一五”规划教材

电子技术

电工学 Ⅱ

王黎明 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”规划教材

电子技术（电工学Ⅱ）

主 编	王黎明	
副主编	常晓丽	沈国伟
参 编	陈媛媛	任爱芝
主 审	毕满清	



机械工业出版社

本书是以教育部颁发的“高等学校工科本科电子技术（电工学Ⅱ）课程教学基本要求”为依据，结合多年的教学实践经验编写的，以适应不同专业的教学需要。

全书分为模拟电子技术和数字电子技术两大部分，包括半导体器件、基本放大电路、反馈及负反馈放大电路、集成运算放大器的应用、直流电源、电力电子技术、逻辑门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、脉冲波形的产生和变换、数模和模数转换器、存储器和可编程逻辑器件等内容。大部分章前都写有内容提要 and 讨论问题，章后附有小结、自测题和习题，有利于学习自学。

本书结构合理，重点突出，内容阐述深入浅出、简洁易懂。

本书可作为高等学校工科非电类各专业本科生、大专生以及成人教育的教学参考书，也可供相关工程技术人员阅读。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载或发邮件到 Edmondyan@sina.com 索取。
Edmondyan@hotmail.com

图书在版编目（CIP）数据

电子技术（电工学Ⅱ）/王黎明主编. —北京：机械工业出版社，2009.8

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-111-27465-0

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. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 105619 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：贡克勤 版式设计：霍永明 责任校对：姚培新

封面设计：姚毅 责任印制：乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2009 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·18.75 印张·463 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-27465-0

定价：34.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：（010）68326294

购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：（010）88379711

封面无防伪标均为盗版

前 言

当代电子技术的飞速发展和广泛应用,对本科生的教学提出了越来越高的要求,电子技术也成为非电类专业的必修课。

电工学是非电类专业学生进行电气工程教育的一门非常重要的技术基础课,它的主要任务是为非电类专业学生学习相关专业知识和从事工程技术工作打好理论基础,并培养基本实践技能。本书包括模拟电子技术和数字电子技术两部分,其中第1~6章介绍的是模拟电子技术,主要介绍常用半导体器件特性和模拟电子电路的基本电路构成、性能特点及基本分析方法,第7~11章介绍的是数字电子技术,主要介绍门电路、触发器及常用的中规模器件的原理、特性和数字电路的分析、设计方法。

本书是在分析和总结了以往的教学经验以后,结合多年来电子技术课程教学实践和经验,为适应电子技术发展的新形势和教学改革不断深入的需要,针对加强学生基础理论和实践能力培养而编写的。在编写过程中,贯穿扩大知识面,加强工程应用,强调以学生为本的指导思想,力求做到深入浅出,注重培养学生的自学能力和创新能力,因此,本书的编写具有以下特点:

1. 内容力求精,不贪多,注重基础,文字简练,说理透彻,便于学生的入门学习。
2. 注重理论联系实际,注意培养学生的分析问题、解决问题的能力。
3. 为使学生能循序渐进的进行学习,本书大部分章的开头有内容提要、讨论问题,后面附有小结,每一节配有思考题,便于学生有目的的学习,以达到更好的学习效果。
4. 在章末配有一定的自测题和习题,其中自测题以概念为主,考查学生对基本内容的掌握。习题部分以巩固和提高为主,使学生对所学内容在掌握基本分析方法的基础上融会贯通,加深理解。题目的选配和数量上,有较强的针对性与实用性。

参加本书编写的有中北大学王黎明(第3章)、常晓丽(第1、2章)、陈媛媛(第4、6章)、沈国伟(第5、9、10、11章)、任爱芝(第7、8章),并由王黎明任主编,负责全书的组织、修改和定稿,常晓丽、沈国伟任副主编。

本书由全国高等学校电子技术研究会常务理事、华北地区高等学校电子技术教学研究学会副理事长、山西省高等学校电子技术教学研究学会理事长、中北大学毕满清教授担任主审,对书稿进行了认真的审查,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免会有疏漏和错误之处,恳请使用本书的广大读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

前言

第1章 半导体器件	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.2 半导体二极管及其应用	6
1.3 特殊二极管	10
1.4 晶体管	13
1.5 场效应晶体管	21
本章小结	24
自测题	25
习题	27
第2章 基本放大电路	30
2.1 基本放大电路的组成	30
2.2 放大电路的图解分析法	34
2.3 放大电路的微变等效电路分析法	40
2.4 分压式稳定静态工作点电路	44
2.5 射极输出器	49
2.6 场效应晶体管放大电路	52
2.7 多级放大电路	55
2.8 差动放大电路	59
2.9 集成运算放大器	63
2.10 互补对称功率放大电路	66
本章小结	68
自测题	69
习题	70
第3章 反馈及负反馈放大电路	75
3.1 反馈的基本概念	75
3.2 负反馈对放大电路性能的影响及负反馈的正确引入	84
3.3 负反馈放大电路的分析计算	90
3.4 负反馈放大电路的自激振荡	94
本章小结	97
自测题	98
习题	99
第4章 集成运算放大器的应用	103
4.1 集成运算放大器在信号运算电路中的应用	103
4.2 测量放大器	111

4.3 集成运算放大器在信号处理方面的应用	113
4.4 集成运算放大器在信号产生方面的应用	122
本章小结	130
自测题	130
习题	132
第5章 直流电源	137
5.1 整流电路	138
5.2 滤波电路	142
5.3 直流稳压电路	145
本章小结	149
自测题	150
习题	151
第6章 电力电子技术	152
6.1 电力电子器件	152
6.2 可控整流电路	161
6.3 逆变电路	167
本章小结	170
自测题	171
习题	171
第7章 逻辑门电路和组合逻辑电路	173
7.1 数字电路概述	173
7.2 基本逻辑关系和逻辑门电路	178
7.3 集成门电路	181
7.4 逻辑函数的表示与化简	190
7.5 组合逻辑电路的分析与设计	198
7.6 常用的组合逻辑电路	200
本章小结	209
自测题	210
习题	212
第8章 触发器和时序逻辑电路	215
8.1 双稳态触发器	215
8.2 时序逻辑电路的组成及分析	219
8.3 集成时序逻辑电路及应用	226
本章小结	235
自测题	235

习题	237	本章小结	269
第 9 章 脉冲波形的产生与变换	241	自测题	269
9.1 无稳态触发器	241	习题	270
9.2 单稳态触发器	243	第 11 章 存储器和可编程逻辑器件	271
9.3 555 定时器及其应用	247	11.1 只读存储器	271
本章小结	251	11.2 随机存储器	275
自测题	251	11.3 可编程逻辑器件	278
习题	252	本章小结	283
第 10 章 数模与模数转换器	255	自测题	283
10.1 D/A 转换器	256	习题	284
10.2 A/D 转换器	262	部分习题参考答案	285
10.3 数据采集系统简介	268	参考文献	292

第1章 半导体器件

内 容 提 要

本章首先介绍了半导体的基础知识，然后重点阐述了半导体二极管的单向导电性、伏安特性、主要参数及其应用，以及在电子电路中广泛应用的几种特殊二极管，晶体管的结构、工作原理、输入输出特性和主要参数，最后介绍了场效应晶体管的结构和工作原理。

讨 论 问 题

- 杂质半导体为什么有两种载流子？
- PN 结是怎样形成的？其特性是什么？
- 二极管的伏安特性是如何的？
- 晶体管起放大作用时载流子的传输规律如何？电流分配规律如何？
- 晶体管放大电路的实质是什么？晶体管能够起到放大作用的内部结构条件和外部条件是什么？
- 晶体管的输入和输出特性如何？
- 稳压管的稳压原理是什么？

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体及其特性

自然界中的物质按照其导电能力的强弱可以分为导体、半导体和绝缘体三种类型。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质叫半导体。

半导体之所以被用来制造电子元器件是因为它具有不同于其他物质的特性。

1. 光敏特性 半导体的导电能力随光照变化而有明显改变，利用这种特性可以做成各种光敏器件，如光敏电阻、光电耦合器等。

2. 热敏特性 半导体的导电能力随温度变化而有明显改变，利用这种特性可以做成各种热敏元件。

3. 掺杂特性 在纯净的半导体中掺入少量特定的杂质元素时，它的导电能力可以大大提高，并且通过控制掺入杂质元素的浓度，就可控制它的导电性能。利用这一特性可以制成各种性能的半导体器件。

半导体之所以具有上述特性，主要是因为其原子结构和导电机理。

1.1.2 本征半导体

1. 什么是本征半导体 纯净的、结构完整的半导体晶体叫做本征半导体。纯净的硅呈现一种晶体结构, 也称单晶硅。

2. 本征半导体的结构 常用的半导体材料是硅 (Si) 和锗 (Ge)。硅和锗都是四价元素, 每个原子的最外层电子数是 4 个, 物理学中将最外层电子叫价电子。元素的很多物理和化学性质都由这些价电子决定。价电子受核的束缚力最小。内层电子和原子核两部分合在一起叫惯性核, 由此可得硅和锗的原子结构的简化模型, 如图 1-1a 所示。外层表示价电子数, “ $\oplus 4$ ” 表示惯性核, 其电荷量 (+4) 是原子核和除价电子以外的内层电子电荷量的总和。

硅和锗在使用时都要做成本征半导体。在组成本征半导体时, 硅 (锗) 原子按一定规律整齐排列, 组成规则的空间点阵, 原子间距离很近, 价电子还将受到相邻原子的原子核的吸引, 为两个原子核共有。这样每一个硅 (锗) 原子最外层的 4 个价电子与相邻的 4 个硅 (锗) 原子的各一个价电子组成 4 对共价键结构。共价键中的电子受两个原子核引力的束缚, 使得每个硅 (锗) 原子最外层形成拥有 8 个共有电子的稳定结构。如图 1-1b 所示是晶体共价键结构的平面示意图。

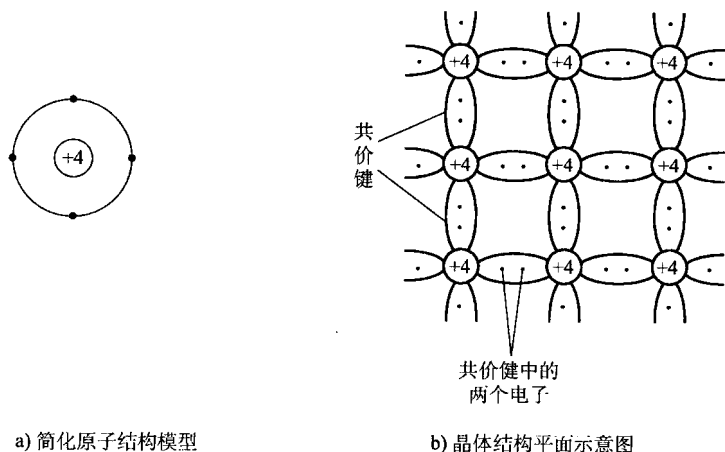


图 1-1 硅和锗的简化原子结构模型和晶体结构

3. 本征半导体中的导电机理

(1) 在绝对零度和无外界激发时, 本征半导体中无载流子 硅原子的所有价电子都被共价键束缚, 共价键内的两个电子称为束缚电子, 如果没有足够的能量, 价电子不能挣脱原子核的束缚成为自由电子。此时在本征半导体中, 没有可以自由运动的带电粒子——载流子, 在外电场作用时不会产生电流。在这种条件下, 本征半导体不能导电。

(2) 本征半导体受激发产生载流子——自由电子和空穴 在获得一定的能量 (热、光等) 后, 少量价电子即可挣脱共价键的束缚成为自由电子, 带负电。同时在共价键中留下一个空位, 称为空穴, 带正电。它们是成对出现的, 通常称为电子空穴对。

本征半导体受外界能量的激发产生电子空穴对, 这种现象称为本征激发。自由电子在无规则的热运动中如果与空穴相遇就会填补空穴, 使电子空穴对消失, 这种现象称为复合。当温度一定时, 由本征激发产生的电子空穴对, 与复合的电子空穴对数目相等, 使激发和复合

达到动态平衡。此时，本征半导体中自由电子和空穴的数目是一定的，并且相等。由于两者电荷量相等，极性相反，所以本征半导体呈电中性。

(3) 外电场作用下，载流子定向移动形成电流 价电子挣脱共价键后成为自由电子，自由电子带负电，在外电场的作用下，自由电子将逆着电场方向定向运动，形成电子电流。

由于空穴的存在，在外加电场的作用下，处于共价键上的价电子也按一定方向依次填补空穴。如图 1-2 所示，如果在 A 处出现一个空穴，B 处的电子填补 A 处的空穴，从而使空穴由 A 移到 B，如果 C 处电子再填补 B 处空穴，这样空穴又从 B 移到 C。这样，在半导体中出现了价电子填补空穴的运动。

空穴是一个带正电的粒子，它所带的电量与电子相等，极性相反。人们把这种运动形成的电流叫做“空穴电流”。

由此可见，在本征半导体中有两种载流子：带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。其导电能力是由载流子的浓度决定。而本征半导体的载流子浓度受温度的影响很大，随着温度的升高，载流子的浓度基本按指数规律增加。所以温度是影响半导体导电性能的重要因素。

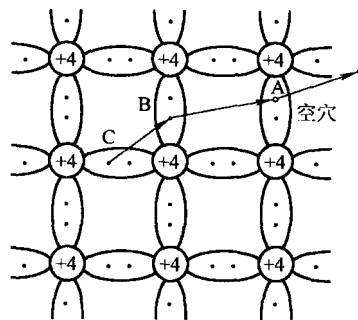


图 1-2 电子和空穴的移动

1.1.3 杂质半导体

本征半导体由本征激发形成的自由电子和空穴两种载流子其数量很少，导电能力很低。如果在本征半导体中掺入微量的某种元素，就会使半导体的导电性能大大增强。所掺微量元素称为杂质，掺入杂质的半导体称作“杂质半导体”。按掺入杂质元素的不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

1. N 型半导体 在本征半导体中掺入微量的五价元素，如磷 (P)、砷 (As) 等，由于杂质原子的最外层有 5 个价电子，则在晶体点阵中某些位置上，杂质原子取代硅 (锗) 原子，有 4 个价电子与相邻的硅 (锗) 原子的 4 个价电子组成共价键，多余的一个价电子处于共价键之外，如图 1-3 所示。这个多余的电子受原子核束缚很弱，只需很少的能量，就能成为自由电子。但在产生自由电子的同时并不产生新的空穴。这样，每掺一个杂质原子都能多出一个自由电子，从而使半导体中的自由电子数量大大增加。因此，杂质半导体的导电能力也大大增强。

除了杂质原子提供的自由电子外，在半导体中还有少量的由本征激发产生的电子空穴对。由于增加了许多额外的自由电子，因此在 N 型半导体中自由电子数远大于空穴数，这种半导体主要靠自由电子导电，所以自由电子叫做“多数载流子”，简称“多子”，而空穴叫做“少数载流子”，简称“少子”。N 型半导体也被称为电子半导体。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。

2. P 型半导体 在本征半导体中掺入少量的三价元素，如硼 (B)、镓 (Ga) 等，由于杂质原子的最外层只有 3 个价电子，在与周围硅 (锗) 原子组成共价键时，因缺少一个电子而产生一个空位，如图 1-4 所示。当受能量激发时，相邻共价键上的电子就可能填补这个空位，在电子原来所处的位置上产生一个空穴。在常温下，每个杂质原子都能引起一个空穴，从而使半导体中的空穴数量大大增加。

在 P 型半导体中, 尽管有本征激发产生的电子空穴对, 由于掺入的每个杂质原子都能引起一个空穴, 空穴数远大于自由电子数, 空穴导电成为这种半导体的主要导电方式, 故空穴为多数载流子, 而电子为少数载流子。P 型半导体也称为空穴半导体。控制掺入杂质的浓度, 便可控制多数载流子空穴的数目。

从以上分析可知, 在杂质半导体中, 多子浓度主要取决于掺入杂质的浓度, 掺入杂质越多, 多子浓度就越大。而少子由本征激发产生, 其浓度主要取决于温度, 温度越高, 少子浓度越大。

在杂质半导体中, 载流子数目比本征半导体多很多, 所以相同温度下, 它的导电能力也比本征半导体强很多。掺杂半导体中多子数目要比少子数目多很多, 所以导电主要靠多子, 少子导电几乎可以忽略不计。

而且, 对于杂质半导体, 它既没有失去电子, 也没有获得电子, 所以呈电中性, 对外不带电。

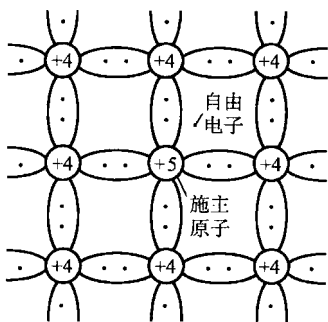


图 1-3 N 型半导体

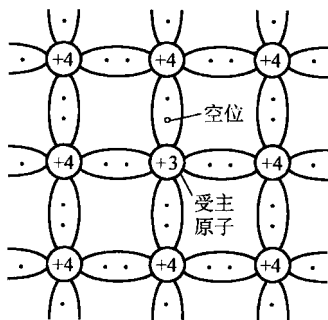


图 1-4 P 型半导体

1.1.4 PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成 如果在一块本征半导体上, 通过一定的掺杂工艺使其一边形成 N 型半导体, 另一边形成 P 型半导体, 那么在 P 型区和 N 型区的交界处就会形成一个特殊的带电薄层, 称为 PN 结。PN 结是构成其他半导体器件的基础。

(1) 内电场的建立——扩散运动建立了空间电荷区和内电场 当 P 型半导体和 N 型半导体结合到一起时, 在它们的交界面, 两种载流子存在很大的浓度差。这时载流子便会从浓度高的区域向浓度低的区域运动。这种由于浓度差而引起的定向运动称为扩散运动, 由载流子扩散运动形成的电流叫扩散电流。P 区空穴的浓度远高于 N 区空穴的浓度, 而 N 型半导体电子的浓度又远大于 P 区电子的浓度。这种浓度差使 P 区的多子空穴向 N 区扩散, 与 N 区的电子复合, 在 P 区一侧留下不能移动的负离子薄层; N 区的多子自由电子向 P 区扩散, 与 P 区的空穴复合, 在 N 区一侧留下不能移动的正离子薄层。如图 1-5a 所示。交界面两侧的这些不能移动的带电离子薄层通常称为空间电荷区, 扩散作用越强, 空间电荷区就越宽。

在空间电荷区中, 一侧带正电, 一侧带负电, 由于正、负电荷相互作用, 在空间电荷区中形成一个电场, 称为内电场。用 $e_{\text{内}}$ 表示。随着扩散运动的进行, 空间电荷区加宽, 内电场增强, 其方向由带正电的 N 区指向带负电的 P 区。

(2) 内电场对载流子的作用——阻止多子扩散，促使少子漂移 多子的扩散形成内电场，这个内电场的方向与多子扩散方向相反，因此它阻碍多子扩散运动的进行。另一方面，在内电场作用下，P区和N区的少数载流子将做定向运动，这种运动称为漂移运动，由此引起的电流叫漂移电流。P区的少子自由电子向N区漂移，从而补充了原来交界面上N区所失去的电子，使正离子减少；而N区的少子空穴向P区漂移，从而补充了原来交界面上P区所失去的空穴，使负离子减少。因此，漂移运动的结果是使空间电荷区变窄，内电场减弱，其作用正好与扩散运动相反。

(3) PN结形成 扩散运动和漂移运动是互相联系又互相矛盾的，多子的扩散使空间电荷区加宽，内电场增强，内电场的建立和增强又阻止多子扩散，促使少子漂移；而少子漂移又使空间电荷区变窄，内电场减弱，又使扩散容易进行。当漂移运动与扩散运动达到动态平衡时，通过空间电荷区的净电流为零。这时空间电荷区的宽度和内电场的强度不再变化，至此，PN结形成，如图1-5b所示。

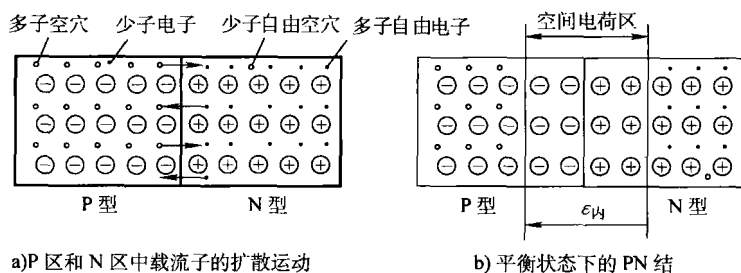


图 1-5 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电性 上面讨论的 PN 结处于平衡状态，扩散电流和漂移电流处于动态平衡，通过空间电荷区的净电流为零。如果在 PN 结两端外加电压，将打破原来的平衡状态。

(1) PN 结外加正向电压 PN 结外加正向电压是指：外加电源的正极接到 PN 结的 P 端，负极接到 PN 结的 N 端，也称正向偏置，如图 1-6a 所示。此时外加电场与 PN 结内电场方向相反。在外加电场作用下，PN 结的平衡状态被打破，P 区的多子空穴向 N 区移动，与空间电荷区的负离子中和。同时 N 区的多子自由电子向 P 区移动，与空间电荷区的正离子中和。这样使空间电荷数目减少，空间电荷区变窄，内电场减弱，多数载流子的扩散运动加剧，漂移运动减弱，扩散电流大于漂移电流。PN 结内的电流主要由扩散电流决定，在外电路上形成一个从 P 区流向 N 区的正向电流。当外加正向电压增大时，内电场进一步减弱，扩散电流随之增加，形成较大的 PN 结正向电流。

在正常工作范围内，外电场越强，正向电流越大。这样，正偏的 PN 结表现为一个很小的电阻。

(2) PN 结外加反向电压 PN 结外加反向电压是指：外加电源的正极接到 PN 结的 N 端，负极接到 PN 结的 P 端，也称反向偏置，如图 1-6b 所示。此时外加电场与 PN 结内电场方向相同，PN 结的平衡状态被打破，这将促使 P 区的多子空穴和 N 区的多子自由电子背离 PN 结运动，空间电荷区变宽，内电场增强，多子的扩散运动减弱，少子的漂移运动增强并

占优势。流过 PN 结内的电流主要由少子的漂移电流决定，表现在外电路上为从 N 区流向 P 区的反向电流。由于少子数量很小，因此 PN 结的反向电流很小，所以 PN 结在反向偏置时，表现为一个很大的电阻。在一定温度下，少子的浓度基本不变，PN 结反向电流几乎与外加反向电压的大小无关。

通过分析可以看出，PN 结具有单向导电性。外加正向电压时，正向电流是多子的扩散电流，数值很大，PN 结导通；外加反向电压时，反向电流是少子的漂移电流，数值很小，PN 结几乎截止。

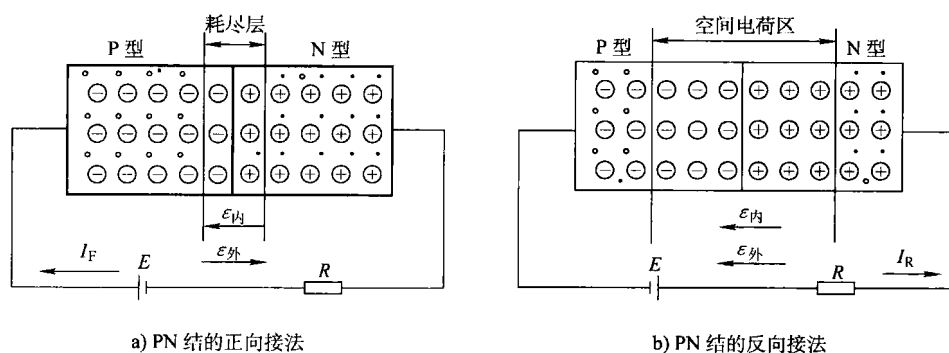


图 1-6 PN 结的单向导电性

思考题

1. PN 结是如何形成的？
2. PN 结为什么会有单向导电性？温度对 PN 结的正向特性、反向特性有何影响？

1.2 半导体二极管及其应用

1.2.1 半导体二极管的结构

在 PN 结加上电极引线和管壳组成半导体二极管，其符号如图 1-7a 所示，由 P 区引出的电极为阳极（或称正极），由 N 区引出的电极为阴极（或称负极），箭头表示正向电流的方向。

二极管常见的几种外形如图 1-7b 所示。二极管种类很多，按材料来分，最常用的有硅管和锗管两种；按结构形式来分，有点接触型、面接触型和硅平面型几种。

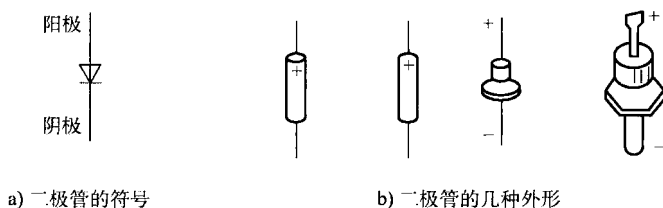


图 1-7 二极管的符号及几种外形

1.2.2 半导体二极管的伏安特性

半导体器件的伏安特性指流过的电流与两端的电压的关系曲线。半导体二极管其实就是一个 PN 结,具有单向导电性,其伏安特性曲线如图 1-8 所示,可分为正向特性、反向特性和反向击穿特性三部分进行分析。

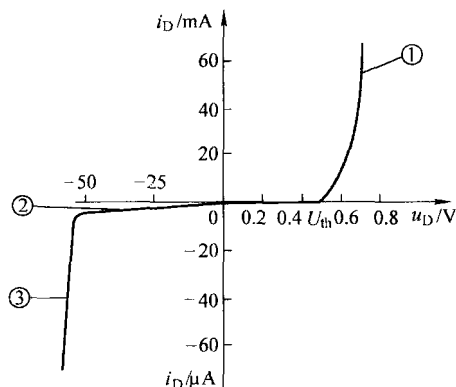
1. 正向特性 对应于图 1-8 的第①段称为正向特性。这时二极管外加正向电压。

当正向电压较小时,外电场还不足以克服 PN 结的内电场,载流子的扩散运动尚未明显增强,因此这时的正向电流很小,近似为零。只有当正向电压大于一定数值后,才有明显的正向电流。使正向电流从零开始明显增长的外加电压叫开启电压或死区电压,记作 U_{th} 。在室温下,硅二极管的开启电压约为 0.5V,锗二极管的开启电压约为 0.2V。

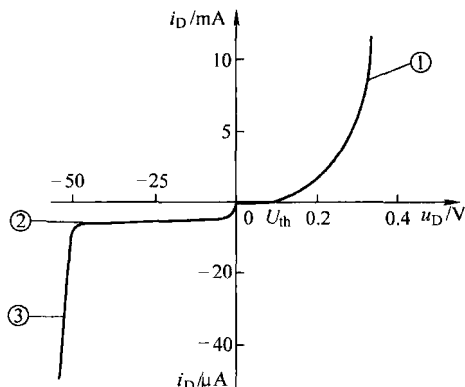
当正向电压大于开启电压后,正向电流增长很快。在伏安特性曲线的这一部分,当电流增加很大时,二极管的正向压降却变化很小。硅二极管的正向导通压降为 0.6~0.8V,锗二极管的正向导通压降为 0.1~0.3V。

2. 反向特性 图 1-8 的第②段称为反向特性。这时二极管外加反向电压,少数载流子漂移运动形成很小的反向电流。当反向电压在一定范围内时,反向电流大小基本恒定。当温度升高时,反向电流上升很快。一般小功率锗管的反向电流可达几十微安,而小功率硅管的反向电流要小得多,一般小于 $0.1\mu\text{A}$ 。

3. 反向击穿特性 图 1-8 的第③段称为反向击穿特性。当二极管承受的反向电压大于击穿电压时,二极管的反向电流将急剧增加,二极管失去单向导电性,称为二极管反向击穿。反向击穿包括电击穿和热击穿两种,电击穿可恢复原来性能,而热击穿不能再恢复原来性能。一般情况下,只要在电路中采取适当的限压措施,就可使得二极管发生电击穿而不是热击穿。



a) 2CP33 硅二极管的伏安特性曲线



b) 2AP2 锗二极管的伏安特性曲线

图 1-8 二极管的伏安特性曲线

1.2.3 温度对二极管伏安特性的影响

环境温度的变化对二极管的伏安特性影响较大,其规律与 PN 结的温度特性相似。当环

境温度升高时,二极管的正向特性曲线将左移,这说明产生同样大小的正向电流,正向压降随温度的升高而减小。

另外,由于二极管的反向电流是由少子漂移形成的,当温度升高时,半导体中本征激发增强,少子浓度升高,故反向电流增大,所以二极管的反向特性曲线随温度的升高将向下移动。温度对二极管伏安特性的影响曲线如图 1-9 所示。

1.2.4 半导体二极管的主要参数

半导体器件的参数是对其特性和极限运用条件的定量描述,是设计电路时正确选择和合理使用器件的依据。各种器件的参数由生产厂家的产品手册给出。由于制造工艺所限,即使同一型号的管子,参数也存在一定的分散性,因此手册上往往给出的是参数的上限值、下限值或范围。半导体二极管的主要参数有以下几种:

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正向平均电流,其大小与 PN 结的面积和散热条件等有关。实际使用时,应注意通过二极管的电流平均值不能大于这一数值,并要满足规定的散热条件,否则会使二极管中 PN 结的温度超过允许值而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_R 最高反向工作电压是指二极管运行时允许施加的最大反向电压。为避免二极管反向击穿,通常 U_R 取反向击穿电压 U_{BR} 的一半。

3. 反向电流 I_R 反向电流是指在室温和最大反向电压(或其他测试条件)下的反向电流。反向电流越小,管子的单向导电性越好。反向电流对环境温度影响非常敏感,使用时应特别注意。

4. 最高工作频率 f_M 最高工作频率是指二极管工作的上限频率。它主要取决于 PN 结的结电容的大小,使用时,如果信号频率超过此值,二极管的单向导电性将变差,甚至不复存在。

在实际使用时,应特别注意手册上每个参数的测试条件,当使用条件与测试条件不同时,参数也会发生变化。

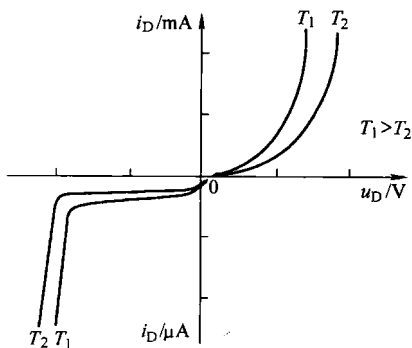


图 1-9 温度对二极管伏安特性的影响曲线

1.2.5 半导体二极管的应用举例

利用其单向导电性,二极管经常应用于限幅电路、整流电路和开关电路等,现举例说明。

【例 1-1】 在图 1-10a、b 所示电路中,已知 $u_i = 10\sin\omega t\text{V}$ 、 $E = 6\text{V}$ 、 $R = 1\text{k}\Omega$,二极管为理想二极管,试分别画出传输特性曲线 $u_o = f(u_i)$ 和输出电压 u_o 的波形。

解: 在图 1-10a 电路中,当二极管开路时,二极管两端的电压 $u_D = u_i - E = u_i - 6\text{V}$,当 $u_D > 0$ 、即 $u_i > 6\text{V}$ 时,二极管正偏导通,二极管两端的电压 $u_D = 0$,输出电压 $u_o = E = 6\text{V}$;当 $u_D = 0$ 、即 $u_i = 6\text{V}$ 时,二极管反偏截止,流过二极管的电流 $i_D = 0$,输出电压 $u_o = u_i$ 。输出电压的波形如图 1-10c 所示。

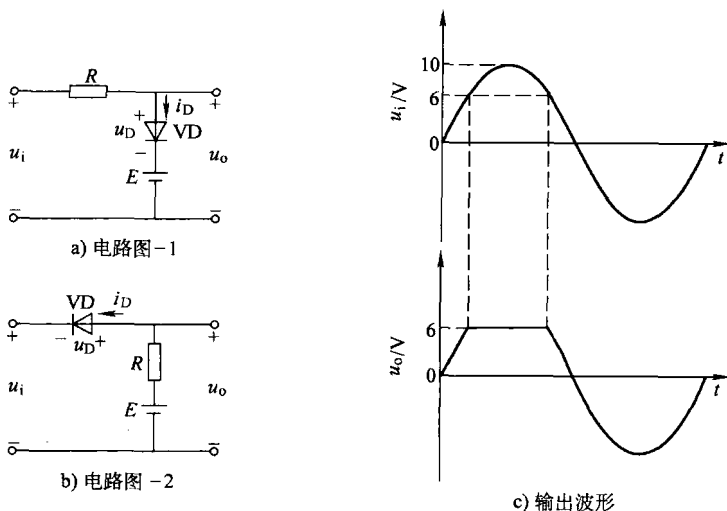


图 1-10 例 1-1 图

在图 1-10b 电路中, 当二极管开路时, 二极管两端的电压 $u_D = -u_i + E = -u_i + 6V$, 当 $u_D > 0$, 即 $u_i < 6V$ 时, 二极管正偏导通, 二极管两端的电压 $u_D = 0$, 输出电压 $u_o = u_i$; 当 $u_D = 0$, 即 $u_i = 6V$ 时, 二极管反偏截止, 流过二极管的电流 $i_D = 0$, 输出电压 $u_o = E = 6V$ 。输出电压的波形同图 1-10c。

【例 1-2】 电路如图 1-11 所示, 当输入电压是 $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, 试画出输出波形。

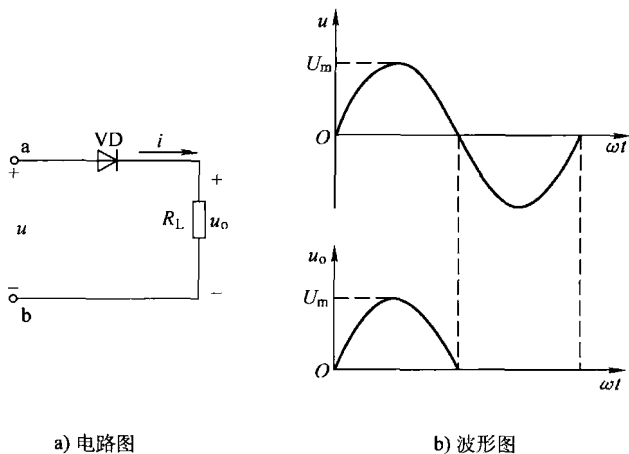


图 1-11 例 1-2 图

在输入电压 u 的正半周, a 点高电位, b 点低电位, 二极管正向导通, 有电流 i 从 a 经过二极管 VD 和负载 R_L 流入 b 点, 因此输出电压 $u_o = u$ 。而在电压 u 的负半周, 电压 u 的极性为上负下正, 即 b 点的高电位, a 点的低电位, 二极管反向截止, 相当于开关断开, 此时电路中电流 $i = 0$, 输出电压 $u_o = 0$ 。输出电压波形如图 1-11b 所示, 为半波整流电路。

【例 1-3】 电路如图 1-12 所示, 二极管 VD_1 和 VD_2 为理想二极管, 当输入端 A、B 的电位分别为 +1V 和 +3V 时, 判断图中各二极管是导通还是截止, 并求输出端 Y 点的电位。

解: 二极管导通或截止的判定方法是: 先将二极管断开, 然后计算二极管两端的电压, 如果外加的是正向电压则二极管导通, 外加的是反向电压则二极管截止。

先假设两个二极管都截止, 电阻无电流流过, 则 Y 端的电位为 +10V, 如果先考虑 VD_1 , 因为 A 端电位为 +1V, 所以理想二极管 VD_1 正向导通, 此时 Y 端电位与 A 端相等, 为 +1V; 而 B 端电位为 +3V, 所以理想二极管 VD_2 反向截止。

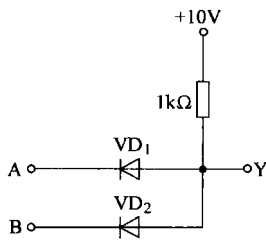


图 1-12 例 1-3 图

还是先假设两个二极管都截止, 则 Y 端的电位为 +10V, 如果先考虑 VD_2 , 因为 B 端电位为 +3V, 所以理想二极管 VD_2 正向导通, 此时 Y 端电位与 B 端相等, 为 +3V; 而 A 端电位为 +1V, 所以理想二极管 VD_1 正向导通, 则 Y 端电位与 A 端相等, 为 +1V。而此时理想二极管 VD_2 反向截止, Y 端电位最终被钳制在 +1V。

所以二极管 VD_1 导通, VD_2 截止, Y 端输出电位为 +1V。

从这个例题可以看出, 当多个二极管并联时, 如果是阳极接在一起, 那么阴极电位最低的二极管导通; 同理, 如果阴极接在一起, 阳极电位最高的二极管导通。

【例 1-4】 电路如图 1-13 所示, 判断图中各二极管是导通还是截止, 并计算 A、B 两点之间的电压 U_{AB} 。设二极管的正向压降和反向电流均可忽略。

解: 在图 1-13a 所示电路中, 二极管 VD_1 、 VD_2 开路时, VD_1 端电压 $U_{AB} = 10V$, VD_2 端电压 $U_{AC} = 10V + 6V = 16V$, 故 VD_2 优先导通, 输出电压 $U_{AB} = -6V$, 将二极管 VD_1 钳制在截止状态。

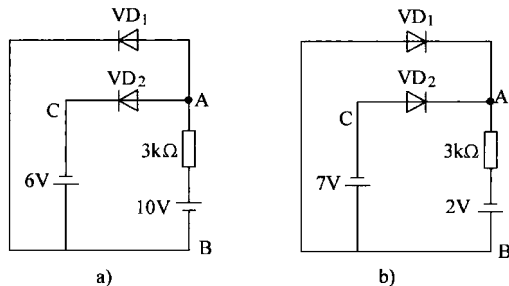


图 1-13 例 1-4 图

在图 1-13b 所示电路中, 二极管 VD_1 、 VD_2 开路时, VD_1 端电压 $U_{BA} = 2V$, VD_2 端电压 $U_{CA} = -7V + 2V = -5V$, 故 VD_1 导通, 输出电压 $U_{AB} = 0V$, VD_2 截止。

思考题

怎样用万用表判断二极管的正负极与好坏?

1.3 特殊二极管

1.3.1 稳压二极管

稳压二极管 (简称稳压管) 是一种特殊工艺制造的面接触型晶体二极管。它的符号如图 1-14a 所示。稳压管是利用 PN 结的反向击穿特性, 在电路中与适当数值的电阻配合后来实现稳定电压的作用。稳压二极管广泛用于稳压电源与限幅电路中。

1. 稳压管的稳压作用 稳压管的伏安特性如图 1-14b 所示, 与普通二极管类似, 只是它

的反向击穿特性更陡一些。当反向电压达到击穿电压 U_Z (也是稳压管的稳定电压) 后, 流过管子的反向电流会急剧增加, 稳压二极管反向击穿。此后通过稳压管的反向电流在较大范围内变化, 而管子两端的反向击穿电压几乎不变, 表现出很好的稳压特性。

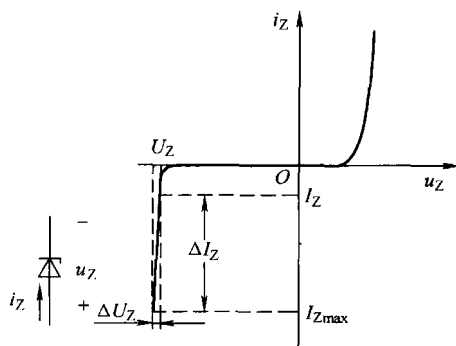
稳压管正常使用时工作在反向击穿状态, 只要控制反向电流不超过一定值, 管子就不会因过热而损坏, 当外加反向电压撤除后, 管子依旧能正常工作, 并未损坏。其击穿特性曲线越陡, 稳压管的稳压性能越好。

2. 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z 稳定电压是指流过稳压管的反向电流为规定值时, 稳压管两端的电压值。由于制造工艺方面的原因, 即使同一型号的稳压管, U_Z 也存在一定的差别, 即 U_Z 分散性较大。例如, 型号为 2CW55 稳压管的稳定电压在 6 ~ 7.5V 之间。但对某一只管子来说, U_Z 应为确定值。

(2) 稳定电流 I_Z (或叫最小稳定电流 I_{Zmin})

稳定电流是指稳压管工作在稳压状态的参考电流, 电流低于此值时, 稳压效果变坏, 甚至根本不能稳压; 高于此值时, 只要不超过额定功耗都可以正常工作, 且电流越大, 稳压效果越好, 但管子的功耗要增加。



a) 图形符号

b) 伏安特性

图 1-14 稳压管的图形符号和伏安特性

(3) 最大耗散功率 P_{CM} 和最大工作电流 I_{Zmax} 最大耗散功率和最大工作电压是指稳压管不致于产生过热而损坏时的最大功率损耗值。

$$P_{CM} = U_Z I_{Zmax} \quad (1-1)$$

对于一只具体的稳压管, 可通过其 P_{CM} 值, 求出 I_{Zmax} 的值。使用时, 应限制管子的工作电流使之不超过最大工作电流 I_{Zmax} 。

(4) 动态电阻 r_Z 动态电阻指稳压管工作在稳压区时, 端电压变化量与其电流变化量之比, 即

$$r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z \quad (1-2)$$

r_Z 的大小与工作电流的大小有关, 电流越大, r_Z 越小, 稳压性能越好。

(5) 稳定电压的温度系数 α 稳定电压的温度系数指流过稳压管的电流是稳定电流 I_Z 时, 温度每变化 1°C , 稳定电压的相对变化量 (用百分数表示)

$$\alpha = \frac{\Delta U_Z}{U_Z \Delta T} \times 100\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (1-3)$$

稳定电压的温度系数越小, 稳压管的温度稳定性越好。稳定电压大于 7V 的稳压管具有正的温度系数, 即温度升高时, 稳定电压值上升; 稳定电压小于 4V 的稳压管具有负的温度系数, 即温度升高时, 稳定电压值下降; 稳定电压在 4 ~ 7V 的稳压管, 温度系数很小。要使用温度稳定性好的稳压管, 可采用稳定电压在 4 ~ 7V 的管子。

3. 稳压管稳压电路 图 1-15 是由稳压管 VS 和限流电阻 R 组成的最简单的稳压电路。输入 U_1 为未经稳定的直流电压, 稳

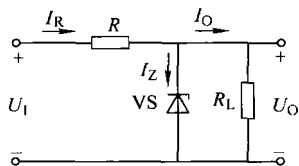


图 1-15 稳压管稳压电路