

普通高等教育规划教材

电工学II (电子技术)

常文秀 主 编
王汇平 副 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

电 工 学 II

(电 子 技 术)

主 编	常文秀
副主编	王汇平
主 审	王 鼎

机 械 工 业 出 版 社

本书是根据教育部“电工学”课程指导组拟定的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革并结合电工学教学实践而编写的。全书共分十一章,即常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源、晶闸管电路及其应用、数字电路基础、组合逻辑电路、双稳态触发器和时序逻辑电路、脉冲信号的产生和整形、模拟量和数字量的转换、存储器与可编程逻辑器件。每章后配有习题、大部分节后配有练习与思考。

本书可作为高等工科院校非电类专业大学本科的教材及参考书,也可供有关工程技术人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

电工学Ⅱ(电子技术)/常文秀主编. —北京:机械工业出版社,2004.1
普通高等教育规划教材
ISBN 7-111-13778-7

I. 电… II. 常… III. ①电工学—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第126047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:卢若薇 版式设计:冉晓华 责任校对:程俊巧
封面设计:陈沛 责任印制:闫焱
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2004年2月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm $1/16$ ·17印张·418千字
定价:24.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

近几年,随着电子技术的迅猛发展和新器件、新技术及新成果的不断涌现,吉林大学电工学教研室对面向 21 世纪电工学的教学体系、教学内容和教学方法进行了一系列的改革、研究和实践。本书的主要编者参与了上述教学改革和课程建设的所有活动及全部过程。为适应 21 世纪科技发展和教学的需要,编者结合教学实践的体会、根据教学中的具体问题,认真学习并吸收了兄弟院校的宝贵经验,编写了本书——《电工学Ⅱ(电子技术)》。

《电工学Ⅱ(电子技术)》是一门重要的技术基础课。该书符合教育部“电工学”课程指导小组拟定的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求。总学时为 50~70 学时,教师在讲授时可根据不同的专业进行适当的取舍。它的使用对象为非电专业的本科生,也可供工程技术人员学习参考。

编者在原吉林工业大学常文秀和王桂琴分别主编的《模拟电子技术基础》、《数字电子技术基础》两本书的基础上,考虑到《电工学Ⅱ》的课程性质和特点,在保证讲授基本理论、传授基本知识和培养基本技能的前提下,适当地删去了陈旧和偏深的内容,增加了对新器件的应用、新成果的推广等新内容的介绍。编写时力求做到:概念准确、深入浅出、拓宽基础、侧重应用。把教材的重点放在基本概念、基本理论、基本分析方法和器件的外部特性及应用上,适当提高了起点,并用一定的篇幅介绍了新器件及新集成电路,精选了实用性强的例题及习题。

全书由吉林大学常文秀任主编,吉林大学王汇平任副主编。常文秀编写第一章(除第五节)、第二章(除第六节)、第三章(除第一、二节)、第四章、第五章(除第一、二节)及第十章(除第二节);王芳荣编写第六章及第七章;王汇平编写第八章及第九章;詹迪妮编写第十一章;张淑琴编写第一章的第五节及第二章的第六节;雷治林编写第五章的第一、二节;郎淑芬编写第三章的第一、二节;王桂琴编写第十章的第二节。本书由吉林大学王鼎教授担任主审。

在本书的编写过程中,得到了吉林大学通信学院的有关领导及电工教研室的王幼林、尹程秋二位老师的支持和帮助,在这里向他们表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,敬请读者,特别是使用本书的老师和同学批评指正。

编 者

目 录

前言

第一章 常用半导体器件 1

- 第一节 PN 结及其单向导电性 1
- 第二节 半导体二极管 4
- 第三节 特殊二极管 7
- 第四节 晶体管（双极型三极管） 10
- 第五节 场效应晶体管（单极型三极管） 18
- 习题 22

第二章 基本放大电路 26

- 第一节 基本交流放大电路的组成 26
- 第二节 放大电路的图解法 28
- 第三节 静态工作点的稳定 36
- 第四节 微变等效电路法 38
- 第五节 共集电极放大电路（射极输出器） 44
- 第六节 场效应晶体管放大电路 47
- 第七节 阻容耦合多级放大电路 50
- 第八节 功率放大电路 54
- 习题 60

第三章 集成运算放大器及其应用 66

- 第一节 直接耦合放大器 66
- 第二节 差动放大电路 67
- 第三节 集成运算放大器简介 74
- 第四节 集成运放在信号运算电路中的应用 79
- 第五节 放大电路中的负反馈 86
- 第六节 集成运放在信号处理方面的应用 93
- 第七节 集成运放在信号产生方面的应用 100
- 习题 107

第四章 直流稳压电源 114

- 第一节 整流电路 114

- 第二节 滤波电路 120

- 第三节 分立元件稳压电路 124

- 第四节 集成稳压电路 126

- 习题 129

第五章 晶闸管电路及其应用 132

- 第一节 晶闸管 132

- 第二节 单相桥式半控整流电路 135

- 第三节 触发电路 139

- 第四节 晶闸管的串并联及其保护 145

- 习题 147

第六章 数字电路基础 150

- 第一节 数字电路概述 150

- 第二节 数制和编码 154

- 第三节 基本逻辑关系及其门电路 158

- 第四节 TTL 集成门电路 162

- 第五节 MOS 门电路 167

- 第六节 电平转换及接口电路 171

- 第七节 逻辑代数的基本公式和定律 174

- 第八节 逻辑函数的标准形式和化简方法 176

- 习题 182

第七章 组合逻辑电路 186

- 第一节 组合逻辑电路的分析 186

- 第二节 组合逻辑电路的设计 187

- 第三节 编码器和译码器 191

- 第四节 数据分配器和选择器 197

- 第五节 运算器 199

- 习题 202

第八章 双稳态触发器和时序逻辑电路 205

- 第一节 基本双稳态触发器 205

- 第二节 钟控双稳态触发器 206

第三节 寄存器	215	第一节 数字-模拟转换器 (DAC)	241
第四节 计数器	217	第二节 模拟-数字转换器 (ADC)	244
第五节 集成计数器	222	习题	249
习题	226	第十一章 存储器与可编程逻辑器件	251
第九章 脉冲信号的产生和整形	231	第一节 存储器的概念	251
第一节 555 定时器的基本结构及工作 原理	231	第二节 只读存储器 (ROM)	251
第二节 单稳态触发器	232	第三节 随机存取存储器 (RAM)	256
第三节 多谐振荡器	235	第四节 可编程逻辑器件 (PLD)	259
第四节 施密特触发器	237	习题	263
习题	238	参考文献	265
第十章 模拟量和数字量的转换	241		

第一章 常用半导体器件

随着半导体技术突飞猛进的发展，半导体器件已是近代电子学的重要组成部分。由于半导体器件具有体积小、重量轻、寿命长、耗电少、工作可靠等诸多优点，因此在现代科技领域里获得了极为广泛的应用。

PN 结是构成各种半导体器件的共同基础。本章首先介绍半导体的特性，阐明 PN 结的基本特点，然后介绍半导体二极管、稳压管、晶体管和场效应晶体管的基本结构、工作原理、特性曲线以及主要参数，为后续各章的学习提供必要的基础知识。

第一节 PN 结及其单向导电性

一、半导体的导电特点

1. 半导体

所谓半导体，顾名思义，就是它的导电能力介于导体和绝缘体之间。硅、锗、硒以及砷化镓、碳化硅等化合物都是半导体材料。目前用得最多的是锗和硅，它们都是 4 价元素，在原子最外层轨道上有 4 个价电子。纯净的单晶半导体最外层价电子形成共价键结构。如图 1-1-1 所示。

半导体之所以获得广泛应用，是因为它的导电能力容易受热、光、电、磁和杂质等外界影响而显著变化。半导体的这些特点是由它内部的导电机理所决定的。

2. 本征半导体

本征半导体就是完全纯净的、具有晶体结构的半导体。在常温下，少数的价电子受到热（或光照等）的作用时，获得足够的能量而挣脱共价键的

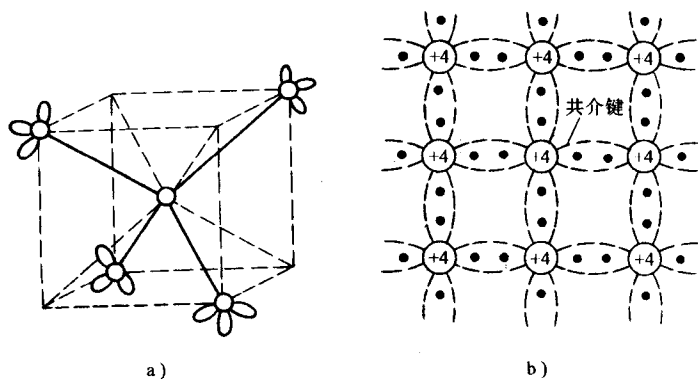


图 1-1-1 硅和锗的晶体结构

a) 点阵结构 b) 共价键结构

束缚，跳出价外形成自由电子（这种现象称为本征激发），同时在原来的共价键中留下一个空位子，称为空穴。本征半导体中的自由电子和空穴是成对出现的。晶体中某处出现一个空穴，附近具有较高能量的价电子就可以较容易地填补这个空穴，这样就在邻近原子处留下一个新的空穴，这相当于空穴的移动。半导体中的自由电子和空穴都是运载电流的粒子，简称为载流子或载子。自由电子（简称电子）带负电荷。而空穴带正电荷。在电场的作用下，自由电子和空穴分别形成电子流和空穴流，二者之代数和即为半导体中的电流。

在纯净的半导体中，电子与空穴是成对出现的，在运动过程中，如果自由电子填补了空

穴，则电子和空穴就成对消失，这种现象称为复合。

本征半导体的特点：

1) 本征半导体具有一定的导电能力，但因常温下自由电子和空穴的数量很少，因此它的导电能力比较微弱。

2) 本征半导体中载流子的浓度，除与半导体材料本身的性质有关以外，还与温度密切相关。在一定的温度下，电子、空穴对的产生与复合都是不停地进行的，最终处于一种平衡状态，使半导体中载流子的浓度保持一定，但随着温度的升高，电子、空穴对的浓度增加，一般说来，温度每升高 10°C ，载流子浓度约增加一倍。

3. 杂质半导体

为了提高半导体的导电能力，人为地在本征半导体中掺入有用的微量杂质，就会使半导体的导电性能发生显著改变。因掺入杂质的不同，分为 N 型半导体和 P 型半导体两类。

(1) N 型半导体 如果在 4 价硅（或锗）的晶体中掺入少量的 5 价杂质元素，如磷、砷等，则原来晶格中的某些硅原子将被杂质原子代替。由于杂质原子的外层有 5 个价电子，因此它与周围 4 个硅原子组成共价键时，多余一个电子，如图 1-1-2a 所示，这个电子不受共价键的束缚，而只受自身原子核的吸引，这个吸引力较小，因而在室温下即可成为自由电子。于是半导体中的自由电子数目大量增加，自由电子导电成为这种半导体导电的主要方式，故称它为电子半导体或 N 型半导体。这种半导体中磷原子因失去电子而成为带正电的离子。因此 N 型半导体具有如下特点：

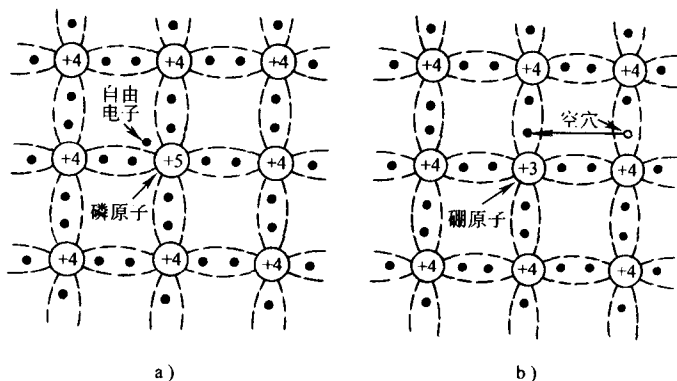


图 1-1-2 杂质半导体
a) N 型半导体 b) P 型半导体

1) 自由电子（主要由掺杂形成）为它的多数载流子（简称多子）。

2) 空穴（本征激发而形成）为它的少数载流子（简称少子）。

(2) P 型半导体 在硅（或锗）的晶体中掺入少量 3 价杂质元素，如硼、镓等，此时杂质原子的最外层只有 3 个价电子，它和周围的硅原子组成共价键时，由于缺少一个电子而留下一个空位，与其相邻的硅原子的价电子很容易填补这个空位，于是就产生了一个空穴，如图 1-1-2b 所示。这种半导体中空穴的浓度将比自由电子的浓度高得多。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体称为空穴半导体或 P 型半导体。这种半导体中，硼原子因得到一个电子而成为带负电的离子。因此，P 型半导体具有如下特点：

1) 空穴（主要由掺杂形成）为它的多子。

2) 自由电子（本征激发而形成）为它的少子。

在杂质半导体中，多数载流子的数量取决于掺杂浓度，少数载流子的数量取决于温度。

二、PN 结

在一块半导体晶片上，通过不同的掺杂工艺，使其一边成为 N 型半导体，另一边成为 P

型半导体,则在这两种半导体的交界面附近将形成一个PN结,它是构成各种半导体器件的基础。

1. PN结的形成

由于P型半导体中空穴多于电子,N型半导体中电子多于空穴,在交界面处就出现了电子和空穴的浓度差别。这样,电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。于是在两种半导体交界面附近,P区的空穴扩散到N区,且与N区的电子复合,在P区一侧留下不能移动的负离子空间电荷区,

⊖代表P型半导体中的三价杂质原子因接受了一个价电子而变成了不能移动的负离子。同样N区的电子扩散到P区,且与P区的空穴复合,在N区一侧留下不能移动的正离子空间电荷区,⊕表示N型半导体中的五价杂质原子因失去一个电子而变成了不能移动的正离子。如图1-1-3所示。

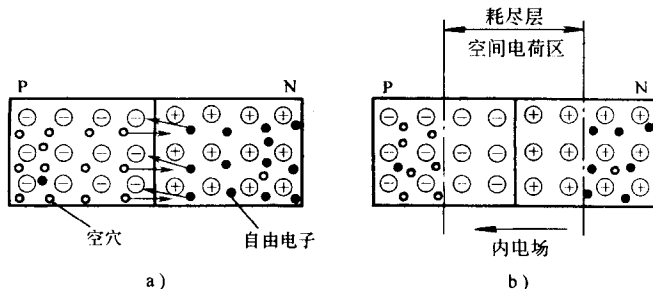


图 1-1-3 PN结的形成

a) 多数载流子的扩散运动 b) 形成空间电荷区

这样在两种半导体交界面的两侧形成了一个空间电荷区,这个空间电荷区就是PN结。空间电荷区形成了一个方向由N区指向P区的内电场。内电场的作用是阻碍多子的扩散,故也称空间电荷区为阻挡层。但内电场却有利于P区和N区的少子越过空间电荷区进入对方区内。少子在电场作用下的这种有规则的运动称为漂移运动。因此,N区的空穴向P区漂移,P区的电子向N区漂移,其结果使空间电荷区变窄,内电场被削弱,这又将引起多子扩散并增强内电场,从而使之达到动态平衡。可以想象,在平衡状态下,电子从N区到P区的扩散电流必然等于它从P区到N区的漂移电流。同样,空穴的扩散电流和漂移电流也必然相等,这时空间电荷区相对稳定,于是PN结形成。由于总的多子扩散电流等于少子漂移电流,且两者方向相反,故PN结中电流为零。由于空间电荷区内载流子已消耗尽了,故它又叫耗尽层。

综上所述,在无外电场或其他因素激发时,PN结处于平衡状态,没有电流通过,空间电荷区宽度是恒定值。

2. PN结的单向导电性

(1) 外加正向电压 当PN结外加正向电压——电源正极接P区、电源负极接N区时,这种连接方式称为正向接法或正向偏置,如图1-1-4所示。

正向偏置(简称正偏)时,外电场与内电场方向相反,因而削弱了内电场,使耗尽层宽度减小,N区的电子和P区的空穴都能顺利地通过PN结,形成较大的扩散电流。至于漂移电流,本来就是少子运动形成的,而少子的数量又很少,故对总电流的影响可忽略。因此,回路中的扩散电流将大大超过漂移电流,最后形成一个较大的正向电流 I_F ,其方向在PN结中是从P区流向N区。如图1-1-4所示。这时称PN结导通。

正向偏置时,只要在PN结两端加上一个很小的正向电压,即可得到较大的正向电流。为了防止回路电流过大,一般接入一个限流电阻 R 。

(2) 外加反向电压 PN结加反向电压——电源正极接N区,负极接P区,这种连接方

式称为反向接法, 又称反向偏置, 如图 1-1-5 所示。反向偏置时, 外电场与内电场方向一致, 耗尽层大大加宽, 因此扩散难以进行, 但有利于少子的漂移, 在回路中产生了由少子漂移所形成的反向电流 I_R 。因少子浓度很低, 并在温度一定时浓度不变, 所以反向电流不仅很小, 而且外加电压超过零点几伏后, 由于少子数量有限, 基本不随外加电压的增加而增加, 故称之为反向饱和电流。

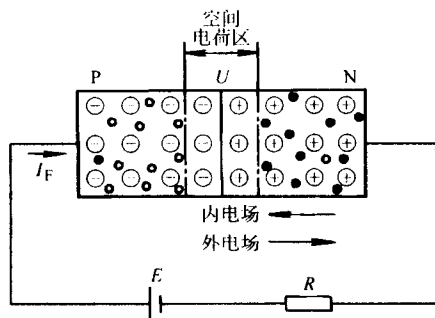


图 1-1-4 正向偏置的 PN 结

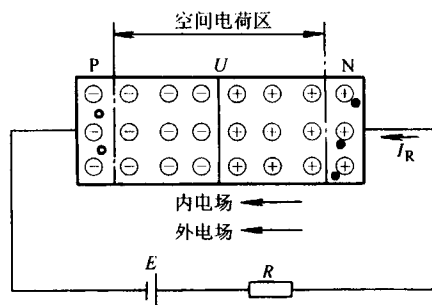


图 1-1-5 反向偏置的 PN 结

由以上分析可知, PN 结具有单向导电性。当外加正向电压时, PN 结导通, 呈现低电阻, 流过较大的正向电流; 当外加反向电压时, PN 结呈现高电阻, 流过一个很小的反向电流, 可认为 PN 结是截止的。

【练习与思考】

1-1-1 PN 结是怎样形成的? 它为什么具有单向导电性?

1-1-2 为什么反向电流的大小与温度有关?

第二节 半导体二极管

一、半导体二极管的结构、特点和符号

半导体二极管的实质就是由一个 PN 结, 加上相应的电极和引线及管壳封装而成的。二极管按其结构的不同可分为点接触型和面结合型两类。由晶片材料不同, 可做成硅二极管和锗二极管。常见的几种二极管的外形如图 1-2-1 所示。

点接触型二极管的结构见图 1-2-2a。它的特点是结面积小, 因而结电容小, 非常适用于高频电路, 常用于高频检波和数字脉冲电路里的开关元件, 但它允许流过的电流很小, 一般为十几毫安或几十毫安以下。面结合型二极管, 结构见图 1-2-2b。它的特点是结面积大, 结电容大, 允许通过的电流也大, 一般为几百毫安到上百安, 适用于作大功率整流器件, 但只能工作在较低的频率下。

二极管的图形符号见图 1-2-2c, 文字符号用 VD 表示。

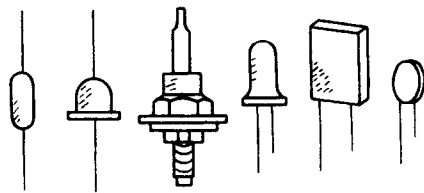


图 1-2-1 常见的几种二极管

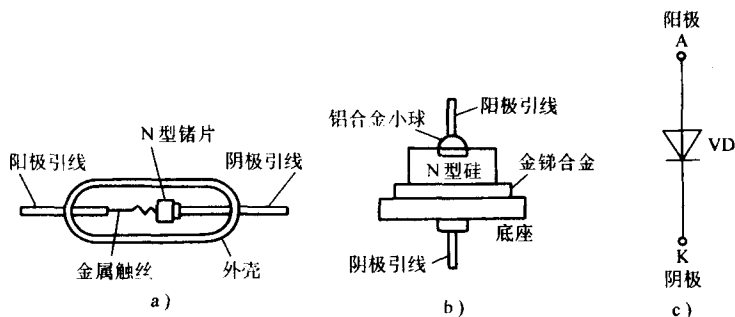


图 1-2-2 二极管的结构及符号

a) 点接触型 b) 面结型 c) 符号

二、半导体二极管的伏安特性

二极管两端的电压 U 与流过管子的电流 I 之间的关系曲线, 叫做二极管的伏安特性曲线。二极管的性能常用伏安特性来反映。伏安特性曲线可以用实验方法获得, 即在二极管的阳极和阴极的两端加上不同极性和不同数值的电压, 同时测量流过二极管的电流值, 就得到该曲线。实际的二极管伏安特性曲线如图 1-2-3 所示, 为非线性, 正向特性和反向特性各有特点。

1. 正向特性

图 1-2-3 中的第①段为正向特性。正向特性的起始部分, 即二极管承受正向电压, 但仍不导通的区间, 称为死区。因为这时外加正向电压太低, 不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻力, 正向电流几乎为零, 故定义二极管仍处于未导通状态时所加的最大正向电压为死区电压。硅管死区电压约为 0.5V , 锗管约为 0.1V 。

当正向电压大于死区电压时, 内电场被大大削弱, 流过二极管的电流随着其两端电压的增加而增长很快, 其值需由外接电阻予以限制。正向导通且电流不太大时, 硅管的压降约为 $(0.6\sim 0.8)\text{V}$, 锗管的约为 $(0.2\sim 0.3)\text{V}$ 。

2. 反向特性

图 1-2-3 中的第②段为反向特性。

外加反向电压不高时, 二极管中只有很小的反向饱和电流流过。因为在反向电压作用下, 少数载流子很容易通过 PN 结, 形成反向饱和电流。但由于少数载流子的数目很少, 所以反向饱和电流极小。其值对于硅管小于 $0.1\mu\text{A}$, 锗管为几十 μA 。

温度升高时, 由于少数载流子增加, 反向电流将明显增加。

3. 反向击穿特性

图 1-2-3 中的第③段为反向击穿特性。

当反向电压超过一定数值后, 反向电流急剧增大, 这时二极管被“反向击穿”, 对应的电压叫做反向击穿电压。这是因为外加电压在 PN 结中形成很强的电场, 并产生大量的电子、空穴对, 引起反向电流急剧增加。使用二极管时, 应避免反向电压超过击穿电压, 防止

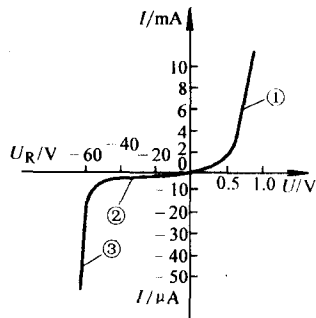


图 1-2-3 二极管的伏安特性

损坏二极管。

三、半导体二极管的主要参数

二极管的特性还可以用参数来定量描述，它们是合理选择和正确使用二极管的依据。各种参数均可由半导体器件手册中查出，现将几个主要参数介绍如下。

1. 最大整流电流 I_F

管子长期工作时，允许通过的最大正向平均电流叫最大整流电流。它是由 PN 结的结面积和外界散热条件所决定的。如果使用中超此值，会引起 PN 结过热而损坏。对于大功率二极管，为了降低结温，提高管子的负载能力，要求管子安装在规定散热面积的散热器上使用。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

保证二极管不被击穿所允许施加的最高反向电压值，叫做最高反向工作电压。超过此值，二极管就有发生反向击穿的危险。 U_{RM} 一般是反向击穿电压的一半左右。

3. 最大反向电流 I_R

在室温条件下，二极管加上最高反向工作电压时的反向电流，叫做最大反向电流。此值越大，二极管的单向导电性越差。且受温度的影响也大。

【例 1-2-1】 在图 1-2-4a 中，已知 $u_i = 20\sin\omega t$ V， $E = 10$ V， $R_1 = R_2 = 10$ k Ω ， VD_1 、 VD_2 为理想二极管，试画出 u_{ab} 及 u_o 的波形。

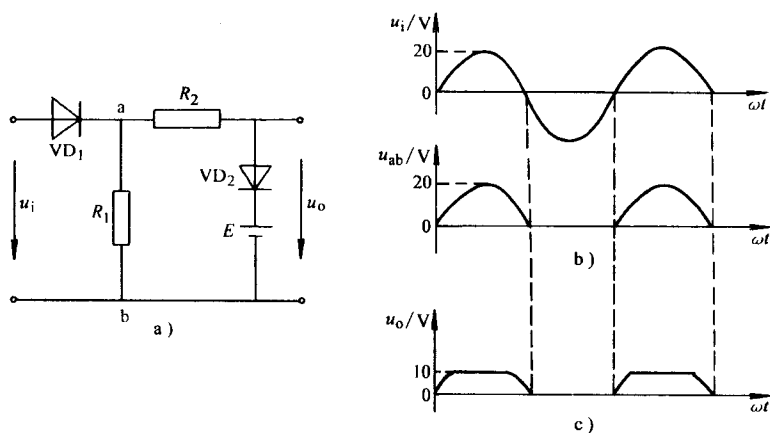


图 1-2-4 例 1-2-1 图

解 ①先求 u_{ab} 。因为 VD_1 、 VD_2 均为理想二极管，即它们的正向压降及反向电流均可忽略不计。故 $u_i > 0$ 时， VD_1 导通， $u_{ab} = u_i$ ； $u_i < 0$ 时， VD_1 截止， $u_{ab} = 0$ 。 u_{ab} 的波形如图 1-2-4b 所示。

②求 u_o 。当 $0 < u_{ab} \leq E$ 时， VD_2 截止， R_2 中无电流流过， $u_o = u_{ab} = u_i$ ；当 $u_{ab} > E$ 时， VD_2 导通， $u_o = E$ ；当 $u_{ab} = 0$ 时， VD_2 截止， $u_o = u_{ab} = 0$ 。 u_o 的波形见图 1-2-4c。

图 1-2-4b 为常见的单相半波整流电路的波形（将在第四章中介绍）；图 1-2-4c 为二极管削波（单相限幅）电路的波形。

【例 1-2-2】 在图 1-2-5 中， VD_1 、 VD_2 为同型号二极管，输入端 A 的电位 $V_A = +3$ V，B 的电位 $V_B = 0$ V，求输出端 F 的电位 V_F 。电阻 R 接负电源 -12 V。

解 因为 A 端电位比 B 端电位高, 所以 VD_1 优先导通。设二极管的正向压降为 $0.3V$, 则 $V_F = 2.7V$ 。当 VD_1 导通后, VD_2 上加的是反向电压, 因而截止。在这里 VD_1 起钳位作用, 把 F 端的电位钳制在 $+2.7V$; VD_2 起隔离作用, 把输入端 B 和输出端 F 隔离开来。

【例 1-2-3】 在图 1-2-6a 所示电路中, 二极管为理想的。当 u_i 为图 1-2-6b 所示波形时, 试画出 u_o 的波形。

解 当二极管 VD 导通时, u_i 对 C 充电, 由于 VD 为理想二极管, 故 C 上充电电压紧随 u_i 。随着 u_i 的变化, 若 u_i 比 C 上电压低时, VD 截止, C 因无放电回路, 其电压保持原值; 若 u_i 超过 C 上电压时, 二极管又导通, u_i 又向 C 充电至另一值, 最后 u_o 固定在 u_i 的最高峰值上。 u_o 波形示于图 1-2-6c, 此电路为峰值耦合电路。

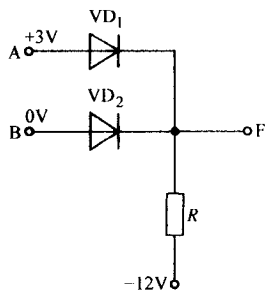


图 1-2-5 例 1-2-2 图

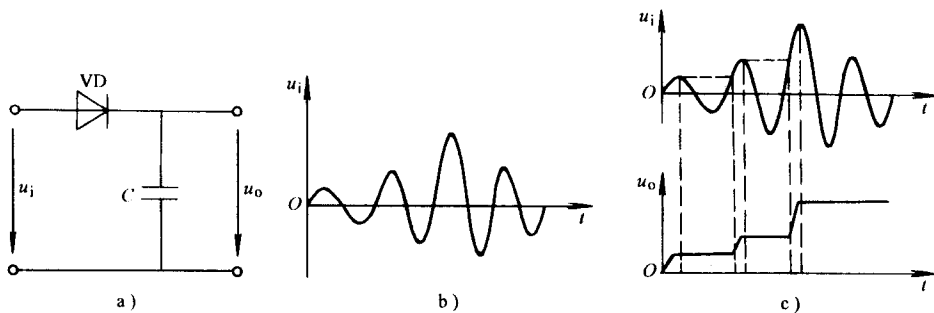


图 1-2-6 例 1-2-3 图

【练习与思考】

1-2-1 既然 PN 结两端存在着内电场, 即有内电位差, 若将二极管短路, 是否有电流流过?

1-2-2 二极管的伏安特性有什么特点? 硅二极管和锗二极管的特性有何不同?

第三节 特殊二极管

除了上述普通二极管外, 还有一些特殊二极管, 如稳压二极管、光电二极管、发光二极管等等, 下面分别介绍它们。

一、稳压二极管

稳压二极管 (简称稳压管) 是一种特殊的面结合型半导体二极管, 外形与普通的二极管相似, 因为它有稳定电压的作用, 故称它为稳压管。

稳压管利用半导体特殊工艺制成。在电子电路中, 稳压管工作于反向击穿状态, 且在外加反向电压撤除后, 管子还是正常的, 并未损坏, 这种性能称为可逆性击穿。但是, 如果反向电流太大, 超过允许的最大值, 则管子会因过热而烧坏, 为此稳压管必须串一个合适的电阻后再接入电路。

图 1-3-1a 表示稳压管在电路中的正确连接方法。图 1-3-1b 是由实验得出的伏安特性。图 1-3-1c 是稳压管的图形符号，其文字符号用 VS 表示。

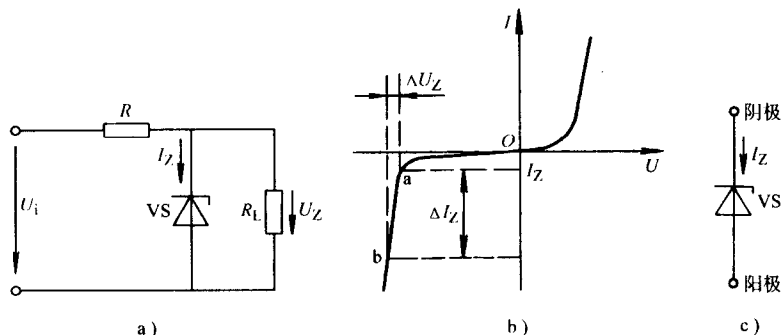


图 1-3-1 稳压管电路、伏安特性及符号

由伏安特性可见，稳压管的正向特性和普通二极管基本相同，但反向击穿特性较陡。当反向电压较低时，反向电流几乎为零，管子尚处于截止状态。当反向电压增大到击穿电压 U_Z （也是稳压管的稳定电压）时，反向电流 I_Z （稳压时的工作电流）急剧增加。稳压管的稳压作用在于：工作在稳压区，即特性曲线的 ab 段，当流过管子的电流 I_Z 在较大范围内变化时，管子两端的电压 U_Z 却基本不变。特性曲线越陡，管子的稳压性能越好。

稳压管的主要参数如下：

1. 稳定电压 U_Z

稳压管中电流为规定值时，稳压管两端的电压值叫做稳定电压。按需要可在半导体器件手册中选用。由于制造工艺上的分散性，同一型号的稳压管其稳压值有所不同。如 2CW55（旧型号为 2CW14）型稳压管的 U_Z 在 6~7.5V 之间（测试电流为 10mA）。

2. 稳定电流 I_Z

稳压管正常工作时的参考电流值叫做稳定电流。电流低于此值，管子两端电压不够稳定；电流高于此值，只要不超过额定功率，稳压管可以正常工作。而且一般来说，工作电流较大时，稳压性能较好。

3. 动态电阻 r_Z

稳压管两端电压的变化量 ΔU_Z 与相应的电流变化量 ΔI_Z 之比叫做动态电阻，即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

稳压管的反向击穿特性曲线越陡， r_Z 越小，稳压性能越好。

4. 电压温度系数 α_u

α_u 表示稳压管的电流值保持不变时，环境温度每变化 1°C 所引起的稳定电压变化的百分比。一般来说，稳压值大于 7V 的稳压管，具有正温度系数；稳压值低于 4V 的稳压管，具有负温度系数。而稳定电压在 4~7V 之间时，温度系数很小。

5. 最大耗散功率 P_{ZM}

管子不至于产生过热损坏时的最大功率损耗值叫做最大耗散功率。稳压管工作时，功耗超过 P_{ZM} ，管子将会因热击穿而损坏。

$$P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$$

【例 1-3-1】图 1-3-2 是稳压管组成的稳压电路。已知 $U_Z = 12V$, $I_{Zmax} = 18mA$, $I_{Zmin} = 5mA$, 负载电阻 $R_L = 2k\Omega$ 。当输入电压由正常值发生 $\pm 20\%$ 波动时, 要求负载两端电压基本不变, 试确定输入电压 U_i 的正常值及限流电阻 R 的数值。

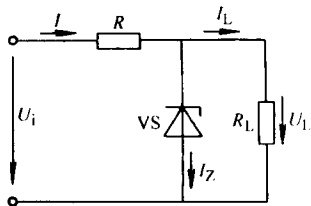


图 1-3-2 例 1-3-1 图

解 负载两端电压 U_L 就是稳压管两端的电压 U_Z 。当 U_i 发生波动时, 必然使限流电阻 R 上的压降和 U_Z 发生变动, 引起了 I_Z 的变动。只要 I_Z 在 $I_{Zmax} \sim I_{Zmin}$ 范围内变动, 就可以认为 U_Z 即 U_L 基本不变, 这就是稳压管的稳压作用。

1) 当 U_i 向上波动 20%, 即 $1.2U_i$ 时, 认为 I_Z 为 I_{Zmax} , 因此有

$$I = I_{Zmax} + I_L = 18mA + \frac{U_L}{R_L} = \left(18 + \frac{12}{2}\right) mA = 24mA$$

$$\text{由 KVL} \quad 1.2U_i = IR + U_L = (24 \times 10^{-3} R + 12)V \quad (1)$$

2) 当 U_i 向下波动 20%, 即 $0.8U_i$ 时, 认为 $I_Z = I_{Zmin}$, 因此有

$$I = I_{Zmin} + \frac{U_L}{R_L} = \left(5 + \frac{12}{2}\right) mA = 11mA$$

$$\text{由 KVL} \quad 0.8U_i = IR + U_L = (11 \times 10^{-3} R + 12)V \quad (2)$$

联立①②两式, 得

$$U_i = 26V \quad R = 800\Omega$$

【例 1-3-2】用稳压管构成的稳压电路如图 1-3-2 所示。已知电源电压 $U_i = 12V$, $R = 1k\Omega$, $R_L = 5k\Omega$, 稳压管的稳定电压 $U_Z = 6V$, 最大稳定电流 $I_{Zmax} = 18mA$, 试求 I_L 、 I_Z 值, 并分析当电源电压变化时, 输出电压的稳定是如何依靠稳压管反向击穿特性与稳压电阻 R 的配合来实现的。

解 首先判断稳压管是否工作? 若断开 VS, 电阻 R_L 上的电压为

$$U_{RL} = \frac{R_L}{R + R_L} U_i = \frac{5}{1+5} \times 12V = 10V$$

由于 $U_{RL} > U_Z$, 故稳压管被击穿, R_L 两端电压被钳位在 6V 上。于是有

$$I_L = \frac{U_Z}{R_L} = \frac{6}{5} mA = 1.2mA$$

回路总电流 I 为

$$I = \frac{U_i - U_Z}{R} = \frac{12 - 6}{1} mA = 6mA$$

所以

$$I_Z = I - I_L = (6 - 1.2) mA = 4.8mA$$

由于 $I_Z < I_{Zmax}$, 说明稳压管处于正常工作状态。当电源电压 U_i 增高时, 稳压管的电压也要随之上升。由稳压管反向击穿特性可知, 稳压管的电流就会大大增加, 于是稳压电阻 R 上的电压 $U_R = R(I_Z + I_L)$ 将增大很多。因此, 输入电压虽然增大, 但稳压电阻 R 上的电压也增大了, 从而使输出电压 (稳压管电压) 基本上维持不变。相反, 当 U_i 下降时, 稳压

管的 I_Z 减小, 稳压电阻 R 上的电压降低, 从而使输出电压基本上维持不变。

二、光敏二极管

光敏二极管 (通常叫光电二极管), 其特点是: 它工作在反向偏置下, 当 PN 结接受光线照射时, 会像热激发一样, 可以成对地产生大量的电子和空穴, 使半导体中少子的浓度提高。这些载流子在反向偏置下可以产生漂移电流, 使反向电流显著增加。所产生的反向电流的大小与光照强度成正比。为使光线能照到 PN 结上, 在它的管壳上设有一个小的通光窗口。

图 1-3-3a 是光敏二极管的符号, 图 b 是它的特性曲线。

光敏二极管应用广泛, 如冲床安全保护装置就是光敏二极管应用的具体例子。把光敏二极管安装在冲床工件夹具前面, 正常时光敏二极管有光电流, 冲头可以起动; 当操作人员的手未离开工件将光路挡住时, 光敏二极管无光电流, 发出禁止起动冲床的信号, 起到安全保护作用。

光敏二极管还可以直接把光能变成电能。当制成大面积的光敏二极管时, 可把它当成一种能源, 称为光电池。

三、发光二极管

发光二极管的结构与普通二极管相似, 只不过不是由硅和锗材料构成, 而是用半导体砷化镓、磷化镓等材料制成的 PN 结构成。当 PN 结被加上正向电压时, 电子与空穴复合过程以光的形式放出能量。因此它是一种将电能转换成光能的半导体器件。不同材料制成的发光二极管会发出不同颜色的光。图 1-3-4 表示发光二极管的符号。发光二极管简称为 LED (Light Emitting Diode 的缩写)。使用时应串联一个限流电阻, 以使流过发光二极管的电流不超过允许值。

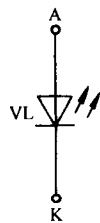


图 1-3-4 发光二极管符号

发光二极管可用于信号指示、数字和字符显示等。发光二极管具有亮度强、清晰度高、反应快、体积小、可靠性高、寿命长等特点。

【练习与思考】

1-3-1 利用稳压管或普通二极管的正向压降是否也可以稳压?

1-3-2 为什么稳压管的动态电阻愈小稳压效果愈好?

第四节 晶体管 (双极型三极管^①)

半导体三极管也叫晶体三极管, 简称晶体管或三极管。它的外部有三个电极, 内部是由两个 PN 结构成的, 由于两者间的相互影响, 晶体管表现出单个 PN 结不具备的功能——电

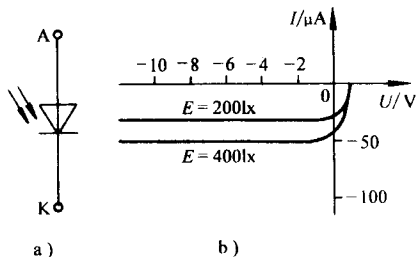


图 1-3-3 光敏二极管

a) 符号 b) 特性曲线

① 双极型三极管中有电子和空穴两种载流子参与导电。双极型三极管的英文缩写是 BJT (Bipolar Junction Transistor)。

流放大作用。晶体管不但可以作为放大元件，还可以作为开关元件，它是电子技术的重要器件之一。本节主要从晶体管的基本结构、内部载流子的运动规律及特性曲线来说明它为什么具有电流放大作用。

一、晶体管的基本结构和类型

晶体管的种类很多，按半导体材料的不同分为硅管和锗管；按功率大小可分为大功率管和小功率管；按电路中的工作频率可分为高频管和低频管等。但从外形来看，各种三极管都有三个电极。图 1-4-1 是几种常见的晶体管的外形，其中 3AD10 功率管的底壳就是管子的集电极。

根据晶体管结构的不同，无论是硅管还是锗管，都有 PNP 型和 NPN 型两种。图 1-4-2 是两类晶体管的结构示意图及图形符号。两种类型的晶体管都是这样制造出来的：

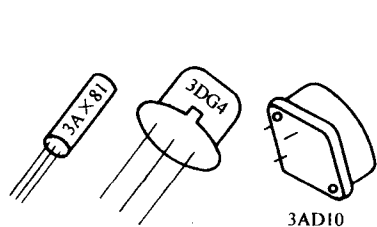


图 1-4-1 晶体管的外形

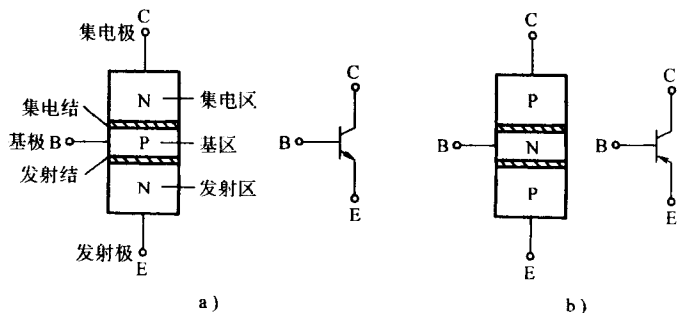


图 1-4-2 晶体管的结构示意图和符号

a) NPN 型 b) PNP 型

在一块半导体基片（硅或锗）上，用特殊的半导体工艺生成两个 PN 结。两个 PN 结将基片分成三个区域：发射区、基区和集电区。每一区域引出一个电极，分别为发射极（E）、基极（B）和集电极（C）。发射区和基区交界处的 PN 结称为发射结，集电区和基区交界处的 PN 结称为集电结。

晶体管的文字符号用 VT 表示。由两个 P 型区中间夹一个 N 型区的晶体管称为 PNP 型管，而两个 N 型区中间夹一个 P 型区的称为 NPN 型管。

晶体管内部结构上的特点是：发射区掺杂浓度最高，即多子浓度最高，体积较大；基区很薄且杂质浓度极低；集电区体积最大，掺杂浓度较发射区低。这是晶体管具有电流放大作用的内部条件。

二、晶体管的电流分配和放大原理

晶体管具有电流放大作用的外部条件是：发射结正向偏置（即加上正向电压），集电结反向偏置（即加上反向电压）。现以 NPN 型管为例来说明晶体管的电流分配和放大原理。这可以由图 1-4-3 所示电路来实现。

在满足上述内部和外部条件的情况下，晶体管内部载流子的运动有以下三个过程：

1. 发射区向基区注入电子

发射结正偏使发射区的多数载流子不断通过发射结扩散到基区，形成电子电流，与此同时，基区的空穴也扩散

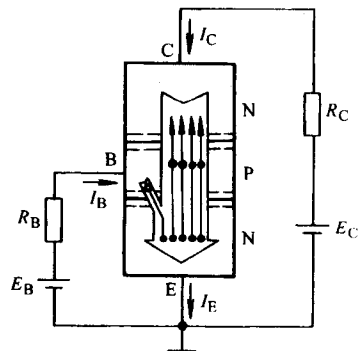


图 1-4-3 NPN 型晶体管内部电流分配