

高 等 学 校 教 材

电 工 学

(电子技术)

下册 李晋生 主编



高等学校教材

电 工 学

下 册

(电子技术)

李晋生 主编

机械工业出版社

本教材是在高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革研究的基础上编写的,是机械工业出版社的“十五”规划教材。

本书根据 10 年来电子技术的新发展和丰富的教学实践,对传统电子技术进行了梳整和拓宽,精选了常规内容,适当拓宽了知识面,突出了新技术和新产品。全书分半导体器件、基本放大电路、负反馈放大器、集成运算放大器、电力电子技术、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形、模拟量和数字量的相互转换、存储器和可编程逻辑器件共十章。书中内容简明,语言流畅,通俗易懂,各章前均有概述,书后附有习题答案。

本书可作为高等院校工科非电类本科生、大专生及成人教育学生多学时的教材或参考书,也可供工程技术人员自学使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学/李晋生,杨新艺主编. —北京:机械工业出版社,2004.2
ISBN 7-111-13906-2

I. 电... II. ①李...②杨... III. 电工学—高等学校—教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 006018 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:牛新国 徐明煜 版式设计:冉晓华 责任校对:王欣

封面设计:鞠杨 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·35.5 印张·869 千字

0 001—5 000 册

定价:56.00 元 (上册 28.00 元,下册 28.00 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

随着科学技术的不断进步，电工技术特别是电子技术也发生了巨大的变化。为了使电工技术课程的教学内容和教学体系不断完善，并能适应日新月异的新技术和社会的需要，特编写了本教材。

与同类的电工学教材相比较，在电工学的电子技术部分主要作了以下改进：

(1) 在电路中，加强了运算放大器和中规模集成电路的应用，适当精简了分立元件电路。

(2) 增强了一些较新的器件的应用，例如晶闸管、MOS管、存储器和可编程逻辑器件。

(3) 特别注意电子器件的应用举例，使学生能更好地联系实际。

本书的编排为先模拟电子技术后数字电子技术，其中第一章～第五章为模拟部分，第六章～第十章为数字部分，打“*”号的为选学内容，可根据专业要求，灵活调节选讲。

本教材与杨新艺主编的《电工学》(上册)作为电工学的一套教材，由李晋生主编。其中，第一～第五章由李晋生编写，第六、七章由楼国红编写，赵永强编写了第八、九、十章。本书的编写还得到了张俊祥、杨广伟等同志的大力支持和帮助，在此表示诚挚的感谢。

由于我们水平有限，电子技术的发展又很快，本书难免有不够完善之处和错误、缺点。殷切希望读者，特别是使用本书的老师和同学们提出批评和改进意见，以便今后修订提高。

编者

目 录

前言

第一章 半导体器件 1

第一节 半导体的导电特性	1
第二节 PN 结的形成及单向导电性	3
第三节 半导体二极管	4
第四节 稳压管	7
第五节 晶体管	9
第六节 场效应晶体管	15
第七节 晶闸管	18
习题	22

第二章 基本放大电路 25

第一节 基本放大电路的组成	25
第二节 放大电路的静态分析	26
第三节 放大电路的动态分析	28
第四节 静态工作点的稳定	35
第五节 共集电极放大电路(射极输出器)	42
第六节 场效应晶体管放大电路	44
第七节 多级放大电路	47
第八节 差动放大电路	51
第九节 功率放大器	57
习题	62

第三章 负反馈放大器 68

第一节 反馈的基本概念	68
第二节 负反馈的类型	69
第三节 负反馈对放大电路工作性能的影响	73
习题	77

第四章 集成运算放大器 80

第一节 集成运算放大器的简单介绍	80
第二节 运算放大器在信号运算方面的应用	84

第三节 运算放大器在信号处理方面的应用	92
第四节 运算放大器在波形产生方面的应用	98
第五节 运算放大器在信号测量方面的应用	101
第六节 RC 正弦波振荡电路	102
第七节 集成功率放大器	105
第八节 运算放大器电路中的负反馈	105
第九节 使用运算放大器应注意的几个问题	108
习题	110

第五章 电力电子技术 115

第一节 电力电子器件	115
第二节 整流电路(AC—DC)	117
第三节 滤波器	130
第四节 直流稳压电路(DC—DC)	133
第五节 逆变电路(DC—AC)	139
习题	140

第六章 门电路和组合逻辑电路 144

第一节 概述	144
第二节 逻辑代数	147
第三节 逻辑门电路	154
第四节 组合逻辑电路的分析和设计方法	166
第五节 常用的组合逻辑电路	169
第六节 应用举例	183
习题	186

第七章 触发器和时序逻辑电路 190

第一节 双稳态触发器	190
第二节 寄存器	197
第三节 计数器	200
第四节 应用举例	209
习题	212

第八章 脉冲波形的产生和整形 217

第一节 多谐振荡器 217

第二节 单稳态触发器和施密特触发器 221

习题 223

第九章 模拟量和数字量的相互转换 226

第一节 D/A 转换器 226

第二节 A/D 转换器 230

第三节 数据采集系统 234

习题 237

第十章 存储器和可编程逻辑器件 ... 238

第一节 只读存储器 238

第二节 随机存取存储器 242

第三节 可编程逻辑器件 244

习题 248

附录 250

附录 A 半导体分立器件型号的命名

方法 250

附录 B 常用半导体分立器件的参数 ... 251

附录 C 半导体集成电路型号命名方

法 255

附录 D 常用半导体集成电路的参数

和符号 256

部分习题答案 258

电工学常用中英文词语对照 265

参考文献 272

第一章 半导体器件

半导体器件是用半导体材料制成的电子器件，常用的有二极管、晶体管、场效应晶体管、晶闸管等，半导体器件是构成各种电子电路最基本的元器件。随着电子技术的飞速发展，各种新型半导体器件层出不穷。学习电子技术首先要了解和掌握各种半导体器件的结构、工作原理、特性和参数，为以后学习各种电子电路奠定基础。

第一节 半导体的导电特性

在自然界中有些很容易导电的物质称为导体，如银、铜、铝等。有些几乎不导电的物质称为绝缘体，如云母、橡胶、塑料等。还有一些物质的导电能力介于导体和绝缘体之间，称为半导体，如硅、锗等。各种物质导电特性的差异其根本原因在于物质内部结构的不同。为了研究半导体的物理性质，我们必须了解半导体的物质结构。

一、本征半导体

在近代电子技术中，使用最多的半导体材料是锗和硅，这些物质的原子受原子核束缚力最小的外层电子称为价电子。锗和硅的价电子都是四个，故称为四价元素。价电子数决定了物质的化学性质，半导体的导电性质也与价电子有关。

纯净的、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。

在本征半导体的晶体结构中，原子在空间排列成很有规律的空间点阵。由于晶体中原子间距离很近，例如，在本征硅中，原子的距离大约为 $2.35 \times 10^{-14} \mu\text{m}$ ，价电子不仅受到自身原子核的吸引而围绕其转动，而且还受到相邻原子核的吸引，而经常出现在相邻原子的价电子轨道上，使得一个价电子为相邻原子核所共有，形成了共价键结构。例如，在本征硅中，每个硅原子的四个价电子与相邻的四个原子的各一个价电子分别组成四对共价键，使得每个硅原子最外层形成拥有八个价电子的较为稳定的结构，如图 1-1 所示。

在共价键结构中的电子在获得一定能量（如光照和热辐射后），少数价电子即可挣脱原子核的束缚成为自由电子（这种现象称为本征激发），这些自由电子称之为电子载流子。同时，在共价键中出现了相应数量的空位，称为空穴，如图 1-2 所示。由于空穴的出现，附近原子中的价电子就很容易移入空穴中，形成价电子的运动。这种运动从现象和效果上看，都好像是一个带正电的电荷在移动，称为空穴运动。可见，空穴也是一种载流子。

因此，当半导体两端加上外加电压时，半导体中

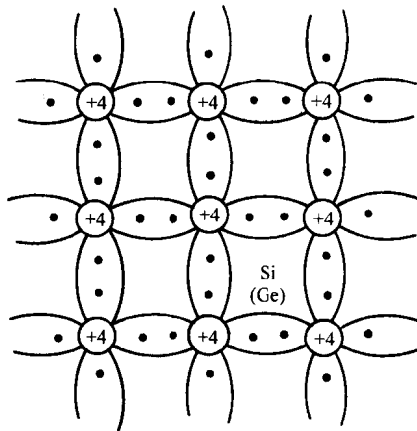


图 1-1 共价键结构

将出现两部分电流。一部分是带负电的自由电子逆电场方向作定向移动形成的电子电流，另一部分是价电子递补空穴形成的空穴电流，即带正电的空穴顺外电场方向作定向运动而形成的空穴电流。在半导体中，由于存在着电子和空穴两种载流子，故有电子导电和空穴导电，这两种导电方式，是半导体导电方式的最大特点。

在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现的（称为电子—空穴对），又不断复合，即自由电子在运动中与空穴重新结合而消失。电子—空穴对的不断产生和复合，在一定温度下达到动态平衡。这时产生与复合过程仍在进行，但电子—空穴对将维持在一定的数目。

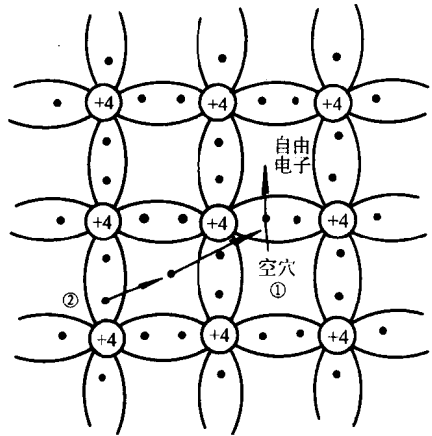


图 1-2 半导体材料的本征激发

二、杂质半导体

本征半导体虽然同时存在自由电子和空穴两种载流子，但数量极少，电阻率很大，导电能力很差。如果在本征半导体中掺入微量纯净的有用杂质元素，其导电性可大大提高，这种掺入杂质后的半导体，称为杂质半导体。

根据掺入杂质的不同，杂质可分为两类。即电子型半导体（N型半导体）和空穴型半导体（P型半导体）。

1. N型半导体

在本征硅或锗半导体中掺入微量的五价元素，如磷等，则晶体点阵中某些位置上的硅或锗原子被磷原子所取代，由于磷原子有五个价电子，它以四个价电子与相邻的硅原子组成共价键后，还多余一个价电子，这个多余的价电子只有磷原子核对它有较小的束缚力，只要有较小的能量作用，它就能挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子。这样每掺入一个磷原子就能多一个自由电子，于是半导体中的自由电子数目大量增加，自由电子导电是这种杂质半导体导电的主要方式，故称为电子型半导体或N型半导体。

例如，在室温 25°C 时，每立方厘米纯净的硅晶体中约有自由电子或空穴 1.5×10^{10} 个，掺入杂质后，成为 N 型半导体，其自由电子数目可增加几十万倍，同时由于自由电子数目增加而导致复合机会增多。空穴数目减少，故在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

2. P型半导体

在本征硅或锗半导体中掺入微量的三价元素杂质，如硼等。由于硼原子只有三个价电子，在它周围硅或锗原子组成共价键时，因缺少一个电子而在晶体中产生一个空穴，这样，每掺入一个硼原子就多出一个空穴，于是半导体中的空穴数目大量增加，空穴导电是这种杂质半导体导电的主要方式，故称为空穴型半导体或P型半导体，在这种半导体中空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

思 考 题

1-1-1 电子导电和空穴导电有什么区别？空穴电流是不是由自由电子递补空穴形成的？

1-1-2 N型半导体中的自由电子多于空穴，而P型半导体中的空穴多于自由电子，是否N型半导体带负电，P型半导体带正电？

第二节 PN 结的形成及单向导电性

采用适当工艺把P型半导体和N型半导体做在同一基片上，使P型半导体与N型半导体之间形成一个交界面，由于两种半导体中载流子种类和浓度的差异，将产生载流子的相对扩散运动，即P区的空穴向N区扩散，在P区界面附近因失去空穴而留下带负电的离子；同时N区的自由电子也向P区扩散，在N区界面附近留下带正电的离子。因两种多数载流子浓度差相互扩散而形成的电流叫做扩散电流。这些不能移动的带电离子在交界面两侧形成空间电荷区，这就是PN结。空间电荷区在N区一侧是正电荷区，在P区一侧是负电荷区，因此在PN结内部存在一个内电场，其方向是从带正电的N区指向带负电的P区，如图1-3所示。内电场一方面会阻碍多数载流子的扩散运动，即阻止P区的空穴向N区扩散和N区的自由电子向P区扩散。另一方面它对少数载流子的作用却正好相反，它推动少数载流子越过空间电荷区，即把P区的自由电子推向N区；把N区的空穴推向P区。少数载流子在内电场作用下的这种运动称为漂移运动。漂移运动所形成的电流称为漂移电流。在一定的条件下，漂移和扩散运动达到动态平衡，PN结处于相对稳定的状态。

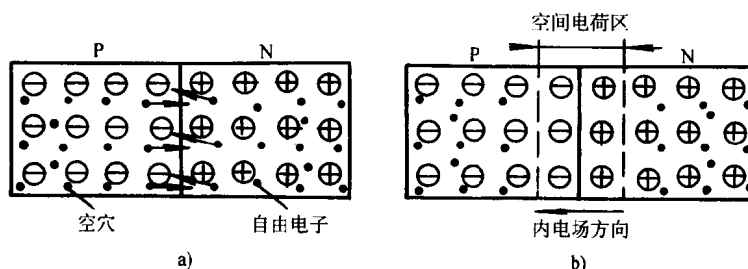


图 1-3 PN 结的形成

如果给PN结加正向电压，如图1-4a所示，外电场与内电场的方向相反，当外电场大于内电场时，内电场的作用被抵消，PN结变薄，多数载流子的扩散运动增加，形成正向电流，外电场越强，正向电流就越大，这意味着PN结的正向电阻变小。

如果给PN结加反向电压，如图1-4b所示，则外电场与内电场的方向一致，使内电场的作用增强，PN结变厚，多数载流子的扩散运动难于进行。但内电场的增强有助于少数载流子的漂移运动，形成反向电流，由于常温下少数载流子数量很少，因此一般情况下反向电流很小，即PN结的反向电阻很大。

综上所述，PN结具有单向导电性，即PN结加正向电压时，正向电阻很小，PN结导通，可形成较大的正向电流；而PN结加反向电压时，反向电阻很大，PN结截止，所以反向电流基本为零。二极管、晶体管等半导体器件的工作特性都是以PN结的单向导电性为基础的。

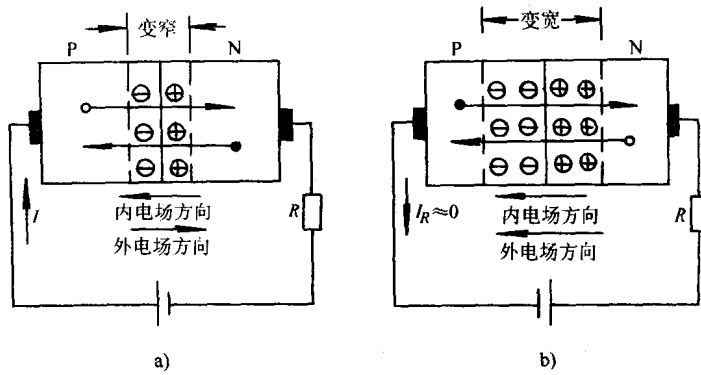


图 1-4 PN 结的单向导电性

a) PN 结加正向电压 b) PN 结加反向电压

思考题

1-2-1 什么是 PN 结？PN 结是怎样形成的？其主要特征是什么？

1-2-2 空间电荷区是由带电的正负离子形成的，为什么它的电阻率很高？

第三节 半导体二极管

一、基本结构

将 PN 结加上相应的电极引线 and 管壳，就成为半导体二极管。按结构分二极管有点接触型和面接触型两类。点接触型二极管（一般为锗管）如图 1-5a 所示。它的 PN 结结面积很小，因此不能通过较大的电流，但其高频性能好，故一般适用于高频和小功率的工作，也可作数字电路中的开关器件。面接触型二极管（一般为硅管）如图 1-5b 所示。它的 PN 结结面积大，故可通过较大电流，但其工作频率较低，一般用作整流。图 1-5c 是二极管的图形符号。

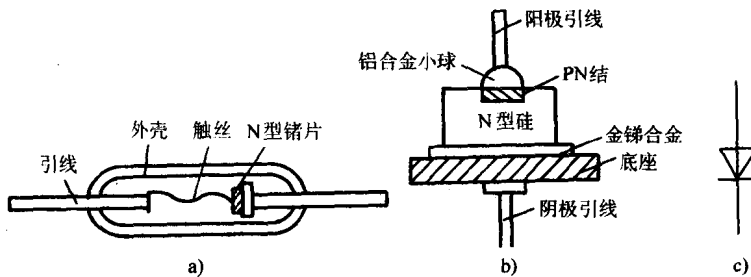


图 1-5 半导体二极管

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 图形符号

二、伏安特性

二极管既然是一个 PN 结，它当然具有单向导电性，其伏安特性曲线如图 1-6 所示。由

图可见, 当外加正向电压很低时, 由于外电场还不能克服 PN 结内电场 (对于多数载流子, 除少数能量较大者外), 扩散运动的阻力, 故正向电流很小, 几乎为零。当正向电压超过一定数值后, 内电场被大大削弱, 电流增长很快。这个一定数值的正向电压称为死区电压, 其大小与材料及环境温度有关。通常, 硅管的死区电压约为 0.5V, 锗管的死区电压约为 0.1V。导通时的正向压降, 硅管约为 0.6~0.8V, 锗管约为 0.2~0.3V。

在二极管上加反向电压时, 由于少数载流子的漂移运动, 形成很小的反向电流。

反向电流有两个特点: 一是它随温度的上升增长很快; 二是在反向电压不超过某一范围时, 反向电流的大小基本恒定, 而与反向电压的高低无关, 故通常称它为反向饱和电流。而当外加反向电压过高时, 反向电流突然增大, 二极管失去单向导电性, 这种现象称为击穿。二极管被击穿后, 一般不能恢复原来的性能, 即失效了。

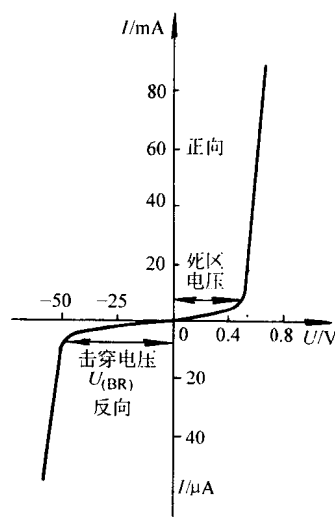


图 1-6 二极管的伏安特性曲线

三、主要参数

在使用各种半导体器件时, 要根据它们的实际工作条件确定它们的参数, 然后从相应的半导体器件手册中查找出适合的半导体器件型号。

二极管的主要参数有:

1. 最大正向电流 I_{FM}

最大正向电流指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。实际工作时, 管子通过的电流不应超过这个数值, 否则将导致管子过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{DRM}

U_{DRM} 是指二极管不被击穿所容许的最高反向电压。为安全起见, 一般 U_{DRM} 为反向击穿电压的 1/2~2/3。

3. 最大反向电流 I_{RM}

I_{RM} 指二极管在常温下承受最高反向工作电压 U_{DRM} 时的反向漏电流, 一般很小, 但其受温度影响较大。当温度升高时, I_{RM} 显著增大。

四、应用电路举例

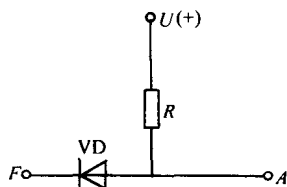
二极管是电子电路中最常用的半导体器件, 利用其单向导电性及导通时正向压降很小的特点, 可用来进行整流、检波、钳位、限幅、开关以及元器件保护等各项工作, 现简要介绍如下:

1. 整流

所谓整流就是将交流电变为单向脉动的直流电。利用二极管的单向导电性可组成单相、三相等各种形式的整流电路, 然后再经过滤波稳压便可获得平稳的直流电。这些将在第五章介绍。

2. 钳位

利用二极管正向导通时压降很小的特性, 可组成钳位电路如图 1-7 所示。图中若 A 点电位 $V_A = 0$, 因二极管 VD 正向导通, 其压降很小, 如忽略不计, 则 F 点的电位也就被钳制在 0V, 即 $V_F = 0$ 。



3. 限幅

利用二极管正向导通后其两端有一定的正向压降基本不变的特点, 可组成各种限幅电路, 使输出电压的幅值不超过某一数值。图 1-8a 中两只硅二极管相互反向并联, 设输入电压 u_i 为正弦波, 其幅值大于 0.7V, 当 u_i 为正半波, 且 u_i 幅度 $\geq 0.7V$ 时, 二极管 VD_1 导通, 输出电压 $u_o = 0.7V$; 当 u_i 为负半波, 且 $u_i \leq -0.7V$ 时, 二极管 VD_2 导通, 输出电压 $u_o = -0.7V$, 也就是说当输入正弦波在一个周期内变化时, 输出电压 u_o 被限制在 $-0.7 \sim 0.7V$ 之间, 其波形如图 1-8b 所示。可见, 输入波形的一部分被削掉了, 故限幅电路又称为削波电路, 常用于某些电子电路的输入端以限制输入电压的幅值。

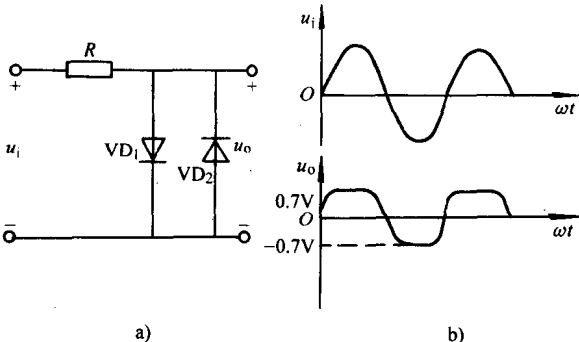


图 1-8 二极管限幅电路

a) 电路 b) 波形

4. 元器件保护

在电子电路中, 常用二极管来保护其他元器件免受过高电压的损害。图 1-9 中 L 和 R 是线圈的电感和电阻。开关 S 接通时, 电源 E 给线圈供电, L 中有电流流过, 储存了磁场能量。在开关 S 由接通到断开的瞬间, 电流突然中断, L 中将产生一个高于电源电压许多倍的自感电动势 e_L 其极性如图所示。自感电动势 e_L 作用在开关 S 的端子上, 可能在 S 的两端间产生电弧, 火花放电, 它将严重干扰设备的正常工作, 甚至将开关 S 烧坏。接入二极管 VD 后, e_L 产生放电电流 I , 使 L 中储存的磁场能量得到释放, 线圈两端的电压 ($e_L - e_i$) 被抑制在 0.7V 左右, 从而保护了开关 S 。

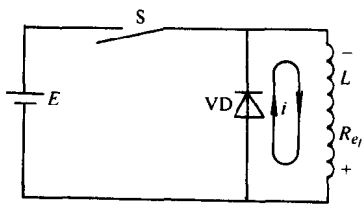


图 1-9 二极管的保护作用

除了上述各项用途外, 还有许多具有特殊结构和特性的二极管, 例如, 光敏二极管、热敏二极管、磁敏二极管、隧道二极管、体效应二极管。二极管应用也从一般的整流、检波发展到自动检测、自动控制等技术领域。随着半导体技术的飞速发展, 二极管将得到更广泛的应用。

思 考 题

- 1-3-1 如何使用万用表欧姆档判别二极管的好坏和极性?
- 1-3-2 为什么二极管的反向漏电流与外加反向电压基本无关? 而当环境温度升高时会明显增大?
- 1-3-3 用一节 1.5V 的电池直接接到二极管的两端, 会发生什么情况?

第四节 稳压管

稳压管是一种特殊工艺制成的面接触型硅二极管。稳压管的伏安特性和普通二极管的伏安特性基本相似，只是稳压管的反向击穿特性曲线很陡，稳压管的特性曲线和图形符号如图 1-10 所示。

从稳压管的反向特性曲线上可以看到，当反向电压达到击穿电压 U_Z 时，反向电流突然增大，稳压管被反向击穿。在反向击穿状态下，反向电流在很大范围变化时，管子两端的电压基本保持不变，这就是稳压管的稳压特性。只要限制反向电流不超过允许数值，管子就不会损坏。

稳压二极管的主要参数如下：

1. 稳定电压 U_Z

稳定电压 U_Z 是稳压管反向击穿后稳定工作的电压值。

2. 电压温度系数 α_U

温度每变化 1°C 时稳定电压变化的百分数，定义为电压温度系数 α_U ，它是表示稳压管温度稳定的参数，电压温度系数越小，温度稳定性越好。稳定电压低于 6V 的管子， α_U 是负值；高于 6V 的管子， α_U 是正值。而稳定电压为 6V 左右的稳压管，电压温度系数接近于零。因此，在温度稳定性要求较高的场合应选用 U_Z 为 6V 左右的稳压管。

3. 动态电阻 r_Z

动态电阻 r_Z 是稳压管在稳定工作范围内，管子两端电压的变化量与相应电流的变化之比。即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (1-1)$$

由图 1-10 知，稳压管的 r_Z 越小，稳压性能越好。

4. 稳定电流 I_Z

稳定电流 I_Z 是指稳压管正常工作时的参考电流值，手册上给出的稳定电压 U_Z 和动态电阻 r_Z 都是对应这个电流附近的数值。实际工作电流若小于稳定电流，则 r_Z 增大，稳压性能较差，只有使工作电流 $\geq I_Z$ ，才能保证稳压管有较好的稳压性能。

5. 耗散功率 P_Z 和最大稳定电流 I_{ZM}

P_Z 是稳压管允许结温下的最大功率损耗。最大稳定电流 I_{ZM} 是指稳压管允许通过的最大电流。它们之间的关系是

$$P_Z = U_Z I_{ZM} \quad (1-2)$$

稳压管在电路中的主要作用是稳压和限幅，也可和其他电路配合构成欠电压或过电压保护、报警环节等。

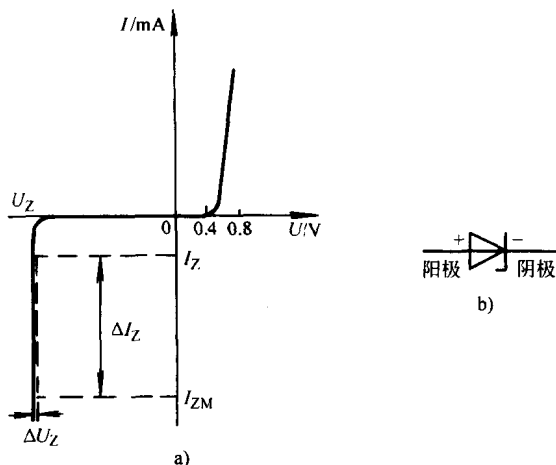


图 1-10 稳压管的图形符号和伏安特性

a) 伏安特性 b) 图形符号

图 1-11 所示为稳压管 VS 与电阻 R 配合组成的稳压电路。

输入电压 U_i 波动时会引起输出电压 U_o 的波动, 如 U_i 升高, 将引起输出电压 $U_o = U_Z$ 随之升高, 导致稳压管的电流 I_Z 急剧增加, 使得电阻 R 上的电流 I 和电压降 U_R 迅速增大, 从而使 U_o 基本上保持不变。反之, 当 U_i 减小时, U_R 相应减小, 仍可保持 U_o 基本不变。

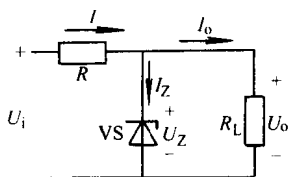


图 1-11 稳压管稳压电路

当负载电流 I_o 发生变化引起输出电压 U_o 发生变化时, 同样会引起 I_Z 的相应变化, 使得 U_o 保持基本稳定。如当 I_o 增大时, I 和 U_R 均会随之增大使得 U_o 下降, 这样导致 I_Z 急剧减小, 使 I 仍维持原有数值保持 U_R 不变, 使 U_o 得到稳定。

可见, 这种稳压电路中稳压管 VS 起着自动调节作用, 电阻 R 一方面保证稳压管的工作电流不超过最大稳定电流 I_{ZM} ; 另一方面还起到电压补偿作用。

【例 1-1】 已知图 1-11 中稳压管 VS 的参数为: $U_Z = 10\text{V}$, $I_Z = 5\text{mA}$, $I_{ZM} = 20\text{mA}$, 负载电阻 $R_L = 2\text{k}\Omega$, 要求当输入电压 U_i 由正常值发生 $\pm 20\%$ 波动时, 输出电压 U_o 基本不变。试确定电阻 R 和输出电压 U_i 的正常值。

解 设输入电压达到上限时, 流过稳压管的电流为最大值 I_{ZM} , 因此有

$$\begin{aligned} I &= I_{ZM} + \frac{U_Z}{R_L} = \left(20 + \frac{10}{2}\right)\text{mA} = 25\text{mA} \\ U_i + 0.2U_i &= IR + U_Z = 25R + 10 \\ 1.2U_i &= 25R + 10 \end{aligned} \quad (1)$$

当输入电压降为下限时, 流过稳压管的电流应为 I_Z , 于是有

$$\begin{aligned} I &= I_Z + \frac{U_Z}{R_L} = \left(5 + \frac{10}{2}\right)\text{mA} = 10\text{mA} \\ U_i - 0.2U_i &= IR + U_Z = 10R + 10 \\ 0.8U_i &= 10R + 10 \end{aligned} \quad (2)$$

联立 (1)、(2) 式解得

$$U_i = 18.75\text{V}$$

$$R = 0.5\text{k}\Omega$$

思 考 题

1-4-1 在图 1-11 中如果 $R=0$, 电路是否仍能起到稳压作用?

1-4-2 用两个稳压值相等的稳压管反向串联起来使用可获得较好的温度稳定性, 这是为什么?

1-4-3 利用二极管和稳压管的正向导通区是否也可以稳压?

1-4-4 已知两只稳压管的稳压值分别为 5V 和 8V , 若将它们串联使用, 可获得几组不同的稳定电压值?

第五节 晶 体 管

一、基本结构

晶体管也称为晶体三极管或三极管，其种类很多，按工作频率分，有高频管、低频管；按耗散功率分，有大、中、小功率管；按半导体材料分，有硅管、锗管等。

晶体管的基本结构是由两个 PN 结构成，其组成形式有 PNP 型和 NPN 型两种，图 1-12a、b 分别为它们的结构示意图和图形符号。

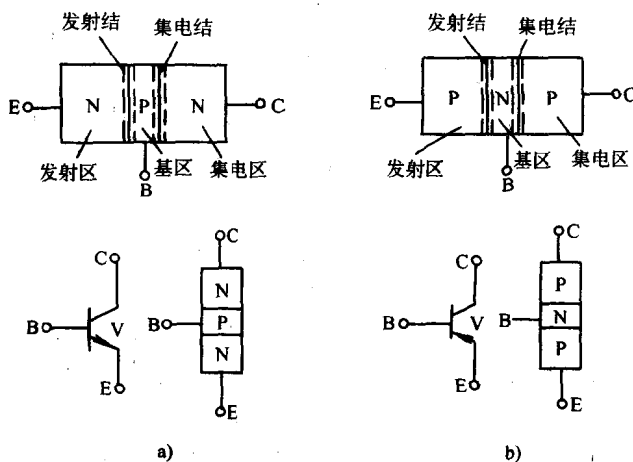


图 1-12 晶体管的结构示意图和图形符号

a) NPN 型晶体管 b) PNP 型晶体管

每一类都分成基区、发射区、集电区，分别引出基极 B、发射极 E 和集电极 C。每一类都有两个 PN 结。基区和发射区之间的结称为发射结，基区和集电区之间的结称为集电结。

NPN 型和 PNP 型晶体管的工作原理类似，仅在使用时电源极性连接不同而已。下面以 NPN 型晶体管为例来分析讨论。

二、电流分配和放大原理

了解晶体管的放大原理和其中电流的分配，我们先做一个实验，实验电路如图 1-13 所示。把晶体管接成两个电路：基极电路和集电极电路。发射极是公共端，因此这种接法称为晶体管的共发射极接法。如果用的是 NPN 型硅管，电源 E_B 和 E_C 的极性必须照图中那样接法，使发射结上加正向电压（正向偏置），由于 E_C 大于 E_B ，集电结加的是反向电压（反向偏置），晶体管才能起到放大作用。

改变可变电阻 R_B ，则基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化。电流方向如图中所示。测量结果如表 1-1 所示。

表 1-1 晶体管电流测量数据

I_B/mA	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C/mA	<0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
I_E/mA	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

由实验及测量结果可得出如下结论:

1) 观察实验数据中的每一列, 可得

$$I_E = I_C + I_B$$

此结果符合基尔霍夫定律。

2) I_C 和 I_E 比 I_B 大得多, 从表 1-1 第三列和第四列的数据可知, I_C 与 I_B 的比值分别为

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{1.50}{0.04} = 37.5 \quad \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.30}{0.06} = 38.3$$

这就是晶体管的电流放大作用。电流放大作用还体现在 图 1-13 晶体管电流放大的实验电路基极电流的少量变化 ΔI_B 可以引起集电极电流较大的变化 ΔI_C 。还是比较表 1-1 第三列和第四列的数据, 可得出

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.30 - 1.50}{0.06 - 0.04} = \frac{0.80}{0.02} = 40$$

3) 当 $I_B = 0$ (将基极开路) 时, $I_C = I_{CEO}$, 表中 $I_{CEO} < 0.001\text{mA} = 1\mu\text{A}$ 。

4) 要使晶体管起放大作用, 发射结必须正向偏置, 而集电结必须反向偏置。

下面用载流子在晶体管内部的运动规律来解释上述结论。

(1) 发射区向基区扩散电子。由于发射结处于正向偏置, 多数载流子的扩散运动加强, 发射区的自由电子 (多数载流子) 不断扩散到基区, 并不断从电源补充电子, 形成发射极电流 I_E 。基区的多数载流子 (空穴) 也要向发射区扩散, 但由于基区的空穴浓度比发射区的自由电子浓度小得多, 因此空穴电流很小, 可以忽略不计 (在图 1-14 中未画出)。

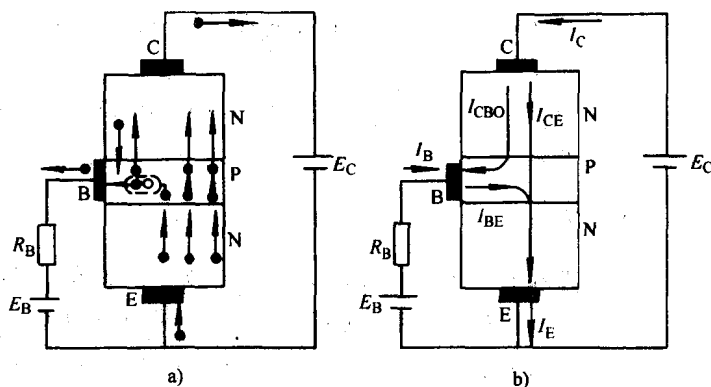


图 1-14 晶体管中的电流

a) 载流子运动 b) 电流分配

(2) 电子在基区扩散和复合。从发射区扩散到基区的自由电子起初都聚集在发射结附近, 靠近集电结的自由电子很少, 形成了浓度上的差别, 因而自由电子将向集电结方向继续

扩散。在扩散过程中,自由电子不断与空穴(P型基区中的多数载流子)相遇而复合。由于基区接电源 E_B 的正极,基区中受激发的价电子不断被电源拉走,这相当于不断补充基区中被复合掉的空穴,形成电流 I_{BE} (见图 1-14),它基本上等于基极电流 I_B 。

在中途被复合掉的电子越多,扩散到集电结的电子就越少,这不利于晶体管的放大作用。为此基区就要做得很薄,基区掺杂浓度小(这是放大的内部条件),这样才可以大大减少电子与基区空穴复合的机会,使绝大部分自由电子都能扩散到集电结边缘。

(3) 集电区收集从发射区扩散过来的电子。由于集电结反向偏置,集电结内电场增强,它对多数载流子的扩散运动起阻挡作用,阻挡集电区(N型)的自由电子向基区扩散,但可将从发射区扩散到基区并到达集电区边缘的自由电子拉入集电区,从而形成电流 I_{CE} ,它基本上等于集电极电流 I_C 。

除此外,由于集电结反向偏置,在内电场的作用下,集电区的少数载流子(空穴)和基区的少数载流子(电子)将发生漂移运动,形成电流 I_{CBO} 。这电流数值很小,它构成集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 的一小部分,但受温度影响很大,并与外加电压的大小关系不大。

上述的晶体管中的载流子运动和电流分配描绘在图 1-14 中。

如上所述,从发射区扩散到基区的电子中只有很小一部分在基区复合,绝大部分到达集电区。也就是构成发射极电流 I_E 的两部分中, I_{BE} 部分是很小的,而 I_{CE} 部分所占的百分比是大的。这个比值用 β 表示,即

$$\beta = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (1-3)$$

β 表征晶体管的电流放大能力,称为电流放大系数。

从式(1-3)知, I_B 虽然较小,但对 I_C 有控制作用, I_C 随 I_B 的改变而改变,这就是晶体管的电流控制能力。

三、特性曲线

晶体管的特性曲线全面反映了晶体管各极电压与电流之间的关系,是分析晶体管各种电路各重要依据。各种晶体管的特性曲线形状相似,但由于种类不同,数据差异很大,使用时可查阅有关半导体器件手册或用晶体管特性图示仪直接观察,也可用实验方法测量得到。

1. 输入特性曲线

输入特性是指在晶体管的集电极与发射极间所加的电压 U_{CE} 为常数时,基极与发射极间电压 U_{BE} 与基极电流 I_B 之间的关系,即

$$I_B = f(U_{BE}) |_{U_{CE} = \text{常数}}$$

图 1-15 所示为硅 NPN 型晶体管 3DG4 的输入特性曲线。

一般情况下,当 $U_{CE} \geq 1V$ 时,就能保证集电结处于反向偏置,可以把发射区扩散到基区的电子中的绝大部分拉入集电区。此时,再增大 U_{CE} 对 I_B 影响甚微,也即 $U_{CE} \geq 1V$ 的输入特性曲线基本上是重合的。所以,半导体器件手册中通常给出一条 $U_{CE} \geq 1V$ 时的晶体管的输入特性曲线。

由图 1-15 可见,晶体管的输入特性曲线与二极管的伏安特性曲线很相似,也存在一段

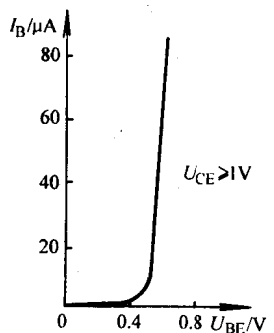


图 1-15 晶体管的输入特性曲线