

高等工科院校教材

电子技术

江苏理工大学 朱伟兴 主编

机械工业出版社

高等工科院校教材

电子技术

主 编 朱伟兴

副主编 周新云

参 编 赵不贿 谈大柏 高国琴

主 审 谈大柏



机械工业出版社

前 言

本书是根据国家教委 1995 年颁布的对高等工业院校“电子技术”(电工学Ⅱ)教学的基本要求而编写的,适于作为工科本科非电专业的少学时教材。

本书的重点放在使学生获得电子技术必要的基本理论、基本方法和基本技能上。在内容的处理方面,删减了一些传统的分立元件内容,增加了集成电路的篇幅,并通过一些例题和实例介绍集成组件的应用,使教学内容尽量接近工程实际并反映科技发展的新趋势,以拓宽学生的知识面,从而为学生学习后续课程和从事与本专业有关的工程技术打下一定的基础。

“电子技术”的内容包括半导体器件、电压放大器、功率放大器、集成运算放大器、直流电源、晶闸管及集成触发电路、集成门电路及组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、数字量与模拟量的转换。全书共七章。讲课学时为 40。但有些内容(如带“*”的章节),可通过实验和课外自学让学生了解和掌握。如学时偏少,可适当删减某些内容。

本书第一、二章由赵不贿和谈大柏编写,第三章由高国琴编写,第四章由周新云编写,第五、七章由朱伟兴编写,第六章由谈大柏编写。朱伟兴为主编,周新云为副主编。谈大柏担任主审。参加审稿的还有北京机械工业学院的毕绍光、赵刚。

在本书的编写过程中,得到江苏理工大学电气工程系电工学教研室的关心和大力支持,在此一并表示衷心的感谢和敬意!

由于我们的学识和水平有限,书中一定存在不少缺点和错误,恳切希望使用本书的教师和同学提出宝贵意见,给予批评、指正。

编 者

1996 年 5 月

目 录

前言

第一章 半导体器件 1

第一节 半导体二极管 1

一、半导体知识简介 1

二、PN 结及其单向导电性 2

三、半导体二极管的伏安特性和主要参数 3

第二节 稳压二极管 5

一、稳压二极管的稳压作用 5

二、稳压管的主要参数 6

第三节 半导体三极管 7

一、基本结构 7

二、晶体管的电流放大作用 8

三、晶体管的特性曲线 9

四、主要参数 10

五、温度对晶体管特性和参数的影响 11

习题 11

第二章 基本放大电路 13

第一节 放大电路的工作

情况分析 13

一、放大电路的组成 13

二、静态工作情况分析 14

三、动态工作情况分析 14

四、静态工作点与输出波形失真的关系 15

五、静态工作点的稳定 16

第二节 微变等效电路分析法 17

一、晶体管的微变等效电路 17

二、放大器的微变等效电路 18

三、放大器的动态性能分析 19

四、用微变等效电路分析多级阻容耦合放大器 20

第三节 共集电极电路

(射极输出器) 22

一、静态工作点的计算 23

二、动态性能分析 23

第四节 功率放大器 24

一、功率放大器的一般概念 24

二、互补对称功率放大电路 25

三、集成功率放大器 26

习题 27

第三章 集成运算放大器 30

第一节 差动放大电路 30

一、直接耦合放大器的零点漂移 30

二、基本差动放大电路 31

三、基本差动放大电路的工作原理 31

四、典型差动放大电路 31

第二节 集成运算放大器简介 32

一、集成运算放大器的组成 32

二、集成运算放大器的符号、外引线 33

三、集成运放的主要参数及电压传输特性 34

第三节 运算放大器中的负反馈 35

一、什么是负反馈 35

二、负反馈的类型 37

三、负反馈对放大器性能的影响 39

第四节 集成运放的线性应用 40

一、比例运算 41

二、加法运算 43

三、减法运算 44

四、积分运算 45

五、微分运算 46

六、正弦波振荡器(正弦波发生器) 46

第五节 集成运放的非线性应用 48

一、比较器 48

* 二、矩形波发生器 50

* 三、三角波发生器 50

* 四、锯齿波发生器 51

第六节 集成运放的选择与使用 52

一、集成运放的选择 52

二、使用中应注意的几个问题 52

第七节 集成运放的应用实例 53

习题	55	一、半导体数码管	96
第四章 硅整流电源	58	二、译码器	97
第一节 整流电路	58	三、半导体数码管显示电路	99
一、单相桥式整流电路	58	第八节 不同类型门电路的接口	99
二、三相桥式整流电路	62	一、由 TTL 到 CMOS 的接口	99
第二节 滤波电路	64	二、由 CMOS 到 TTL 的接口	100
一、电容滤波电路	64	三、CMOS 与 HTL 之间的接口	100
二、电感滤波电路	65	第九节 用中、大规模组件设计组合	
三、 Π 形滤波电路	65	逻辑电路	100
第三节 稳压电路	66	一、只读存储器 (ROM) 和可编程序	
一、稳压管稳压电路	66	阵列 (PLA)	100
二、集成稳压电路	67	二、用集成组件构成组合逻辑电路	103
第四节 晶闸管可控整流电路	69	三、用 EPROM 和 PLA 设计多输入、	
一、晶闸管	69	多输出的组合逻辑电路	104
二、单相桥式可控整流电路	71	习题	107
三、集成触发电路	72	第六章 触发器及时序逻辑电路	110
习题	74	第一节 双稳态触发器	110
第五章 集成门电路及组合		一、基本 RS 触发器	110
逻辑电路	76	二、时钟控制 RS 触发器	111
第一节 数字电路概述	76	三、主从 RS 触发器	112
一、数字电路和模拟电路	76	四、不同逻辑功能的触发器	113
二、数字电路的数制	76	第二节 数码寄存器和移位寄存器	115
三、数字系统框图	77	一、数码寄存器	115
第二节 逻辑门电路	78	二、移位寄存器	116
一、与门电路	78	第三节 计数器	117
二、或门电路	79	一、异步二进制加法计数器	118
三、非门电路	80	二、同步二进制加法计数器	118
四、复合门电路	80	三、十进制加法计数器	120
第三节 TTL 门电路	82	四、中、大规模集成计数器	121
一、TTL 与非门电路	82	第四节 555 定时器及其应用	125
二、三态门	83	一、555 定时器的工作原理	125
第四节 场效应晶体管与 MOS		二、单稳态触发器	125
门电路	85	三、多谐振荡器 (无稳态触发器)	127
一、场效应晶体管	85	第五节 数字电路应用举例	127
二、MOS 门电路	88	习题	130
三、集成门电路的类型及性能比较	89	第七章 模拟信号与数字信号	
第五节 组合逻辑电路	90	的转换	133
一、逻辑代数简介	90	第一节 数模转换器	133
二、组合逻辑电路的分析与设计	92	一、 R - $2R$ 电阻网络数模转换器	133
第六节 编码器	94	二、集成数模转换器	135
第七节 译码器及数码显示电路	96	三、数模转换器的主要技术指标	136

第二节 模数转换器	137	附录 A 国产半导体分立器件型号	
一、逐次逼近式 A/D 转换器	137	命名方法	140
二、集成模数转换器	137	附录 B 半导体集成电路型号	
三、模数转换器的主要技术指标	138	命名方法	141
习题	138	部分习题参考答案	143
附录	140	参考文献	145

第一章 半导体器件

半导体器件具有质量轻、体积小、耗电省、寿命长、工作可靠等突出优点，在现代工业、现代农业、现代科学技术和现代国防中都得到广泛的应用。半导体器件是电子电路的核心。电子电路的功能和性能与采用的半导体器件密切相关，而 PN 结又是构成各种半导体器件的共同基础。本章从讨论半导体的导电特性和 PN 结的基本原理开始，然后介绍半导体二极管、稳压二极管和半导体三极管的基本结构、工作原理、特性和参数。

第一节 半导体二极管

一、半导体知识简介

半导体，其导电能力介于导体（如金属）和绝缘体（如橡胶、陶瓷、塑料等）之间。很多半导体材料的导电能力在不同的条件下有很大的差别，有些半导体对环境温度很敏感，利用这种特性可以做成各种热敏元件；有些半导体对光照很敏感，利用这种特性可以做成各种光敏元件。而在纯净的半导体中掺入合适的其它适当元素，它的导电能力成几万、几十万乃至上百万倍地增加，人们利用这种特性制成了二极管、晶体三极管（简称晶体管）、场效应晶体管、集成电路等各种半导体器件。

（一）本征半导体及其载流子

完全纯净的、具有单晶结构的半导体称为本征半导体。

锗和硅是目前制造半导体器件用得最多的半导体材料，它们都是四价元素，原子最外层有四个价电子，每个原子与相邻四个原子组成共价键结构，如图 1-1 所示。在受到热（或光照）的激发下，少数价电子挣脱原子核的束缚成为自由电子，同时它在它原来的共价键中留下一个空位置，称为空穴。

在外电场的作用下，自由电子逆着电场的方向运动，形成电子电流。同样，在外电场的作用下，有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子，填补这个空穴，同时，失去了一个价电子的相邻原子的共价键中出现另一个空穴，它也可以由相邻原子中的价电子来递补，而在该原子中又出现一个空穴。如此继续下去，就好像带正电的粒子（空穴）在运动。因此可以用空穴运动产生的电流来代替价电子依次递补运动产生的电流，但两者运动方向相反。电子电流和空穴电流之和即为半导体中的电流。所以，在热激发下，本征半导体中存在两种载流子：自由电子和空穴。

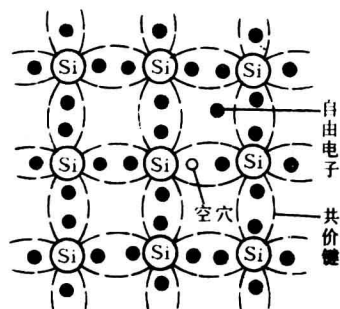


图 1-1 共价键示意图

本征半导体中，自由电子和空穴是成对出现的，在运动的过程中如果电子填补了空穴，它们成对地消失，这种现象称之为复合。在一定的温度下，自由电子和空穴的产生与复合在不断地进行着，处于一种动态平衡，半导体中的载流子浓度保持一定。但随着温度的升高，载

流子数量因受热激发而增加，电子空穴对的浓度也增加。所以，温度对半导体器件的影响很大。一般说来，温度每增加 10°C ，载流子浓度增加近一倍。在室温下，本征半导体硅中大约 10^{12} 个原子才能产生一个自由电子-空穴对，这说明本征半导体中的载流子数量是极少的。

(二) 杂质半导体

1. N 型半导体 在本征半导体硅(或锗)中掺入微量的杂质磷(或其它的五价元素)，就成为 N 型半导体。由于磷原子数量极少，基本上不改变整个晶体结构，只是某些硅原子的位置被磷原子取代，与周围四个硅原子形成共价键，多余的一个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子，磷原子因失去电子成为带正电的离子(它处于晶格中，不能移动参与导电)，图 1-2a 为其示意图。由于每掺入一个磷原子，就多一个自由电子，如果在本征半导体中掺入百万分之一的五价杂质，则自由电子的浓度就增加一百万倍以上。由于自由电子的增加，与空穴复合的机会也增加，使空穴大大减少。因此，在 N 型半导体中，自由电子数远远多于空穴数，自由电子是多数载流子(简称多子)，它的浓度主要取决于掺杂浓度；空穴是少数载流子(简称少子)，它的浓度主要取决于温度。

2. P 型半导体 如果在本征半导体硅(或锗)中掺入硼(或其它三价元素)，就成为 P 型半导体。一个硼原子与周围四个硅原子形成共价键时，缺少一个电子，出现了一个空穴。在室温下，这些空穴能吸引相邻原子的价电子来补充，使杂质原子变成带负电的离子，而相邻原子中产生了空穴，图 1-2b 为其示意图。因此，在 P 型半导体中，多数载流子是空穴，少数载流子是自由电子。多子浓度同样取决于掺杂浓度，少子浓度取决于温度。

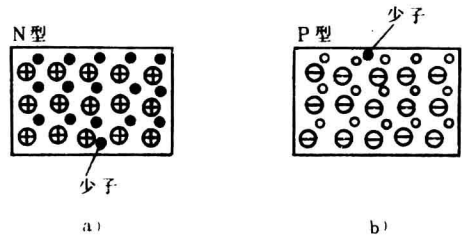


图 1-2 杂质半导体示意图

二、PN 结及其单向导电性

(一) PN 结的形成

由于 P 型半导体中多子是空穴，N 型半导体中多子是电子，在交界处就出现了电子和空穴的浓度差别。电子和空穴总是从高浓度的地方向低浓度的地方扩散，于是在两种半导体交界面附近，P 区的空穴必然向 N 区扩散，且与 N 区的电子复合而消失，在 P 区一侧留下不能移动的负离子空间电荷区。同样，N 区的电子也要扩散到 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，如图 1-3 所示。空间电荷区内形成了一个 N 区指向 P 区的内电场，随着扩散的进行，空间电荷区加宽，内电场加强。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。因此由浓度差而产生的多子扩散作用和由扩散而产生的内电场对扩散的阻碍作用最终达到动态平衡，使空间电荷区的宽度不再变化。另一方面，内电场

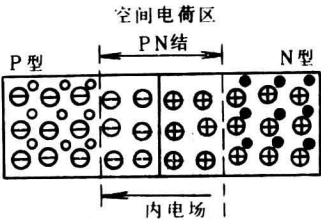


图 1-3 PN 结的形成

有利于少子产生漂移运动，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，内电场削弱，这又将引起多子扩散并增加内电场，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，形成了 PN 结。

由于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。

综上所述，在无外电场或其它因素激发时，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。由于空间电荷区内没有载流子，所以又叫耗尽层，其宽度一般为数微米。

由于空间电荷区内只有不能移动的正负离子，相当于存储着电荷；空间电荷区内缺少导电的载流子，电导率很低，相当于绝缘介质；而两侧的 P 区和 N 区电导率相对来说比较高，相当于金属；因此，PN 结还具有电容的效应，称它为结电容。

(二) PN 结的单向导电性

1. 外加正向电压 在图 1-4 中，P 区接电源正极，N 区接电源负极（称为正向偏置）。此时在外电源的作用下，多子被推向耗尽层，结果使空间电荷区变窄，内电场被削弱，有利于多子的扩散，而不利于少子的漂移。多子扩散形成正向电流，这时称 PN 结导通。导通时 PN 结两端电压只有零点几伏，所以不大的正向电压就可产生较大的正向电流 I_F ，通常在回路中串入一个电阻 R 以限制电流。

2. 外加反向电压 在图 1-5 中，P 区接电源负极，N 区接正极（称反向偏置），此时外电场使空间电荷区变宽，加强了内电场，阻止多子的扩散，但有利于少子漂移，在回路中产生了由少子漂移所形成的反向电流 I_R 。因少子的浓度很低，并在温度一定时浓度不变，所以反向电流不仅很小，且外加电压超过零点几伏后，由于少数数量有限，基本上不随外加电压的增加而增加，故反向电流基本不变，称为反向饱和电流。

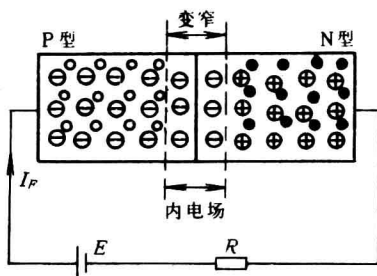


图 1-4 PN 结外加正向电压

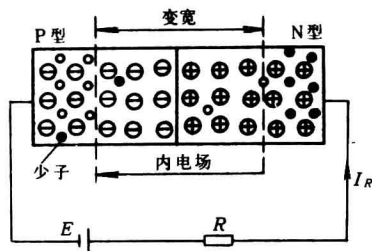


图 1-5 PN 结外加反向电压

由以上分析可知：PN 结具有单向导电性，即在 PN 结上加正向电压时，PN 结电阻很小，正向电流较大（PN 结处于导通状态）；加反向电压时，PN 结电阻很大，反向电流很小（PN 结处于截止状态）。

三、半导体二极管的伏安特性和主要参数

(一) 半导体二极管的基本结构

半导体二极管又称晶体二极管，简称二极管。它由 PN 结加上引线和管壳构成，如图 1-6 所示。它分为点接触型和面接触型两种。锗管一般是点接触型，接触面积小，结电容小，能在高频下工作，但允许通过的电流小，主要应用于小电流整流、高频检波，以及在脉冲数字电路中用作开关元件，如 2AP1 是点接触锗二极管，最大整流电流是 16mA，最高工作频率是 150MHz。硅管一般是面接触型，接触面积大，允许通过的正向电流大，但结电容也大，只能工作在低频情况，常用于整流，如 2CZ56 是面接触硅二极管，最大整流电流 3A，最高工作频率只有 3KHz。

(二) 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指流过二极管的电流与它的端电压之间的关系。图 1-7 给出了二极管的伏安特性曲线。曲线分成三个部分，下面分别给予介绍。

1. 正向特性 对应于图 1-7 的 0B 段为正向特性。在正向电压较小时，外电场还不足以克服 PN 结的内电场，因此这时的正向电流几乎为零，只有在外加电压超过一定数值后，才有明显的正向电流，该电压值称死区电压。在室温下，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，电流随电压增长很快。正向导通时，硅管压降约为 0.6~0.8V，锗管约为 0.2~0.3V。

2. 反向特性 图 1-7 的第 0C 段为反向特性，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。但由于少子的数目很少，所以反向电流是很小的。小功率硅管的反向电流一般小于 $0.1\mu\text{A}$ ，而锗管通常为几十微安。

温度升高时由于少子的增加，反向电流将随之增加。

3. 反向击穿特性 当外加反向电压超过一定数值（图中 U_{BR} ）后，强大的电场力直接将共价键上的电子拉出，使二极管内载流子数量突然剧增，从而使反向电流急剧增加。另一种原因是处于强电场中的载流子获得足够的能量碰撞晶格而将价电子碰撞出来，产生电子空穴对，引起连锁反应而使载流子数目大大增加，反向电流急剧增大。这种现象称为反向击穿。反向击穿时，PN 结功耗大，结温过高容易使管子损坏，实际使用时外加反向电压不允许超过击穿电压。

（三）二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_F I_F 是指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流，它是由 PN 结的面积和外界散热条件决定的。在实际使用过程中，不能超过此值，否则二极管将会烧坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM} U_{RM} 是指二极管在使用时允许加的最高反向电压，超过此值时就可能发生反向击穿。它通常为反向击穿电压的 $1/2 \sim 2/3$ 。

3. 反向电流 I_R I_R 是指常温条件下，二极管未击穿时的反向电流， I_R 越小，二极管的单向导电性能越好。由于 I_R 受温度影响，在温度变化较大的场合下使用时，应选择 I_R 较小的二极管，以提高电路的稳定性。

4. 最高工作频率 f_M PN 结的结电容，限制了二极管的工作频率。频率越高，则容抗越小，在高频电路中，即使在反向电压下，高频电流流过结电容，使二极管失去单向导电性。因

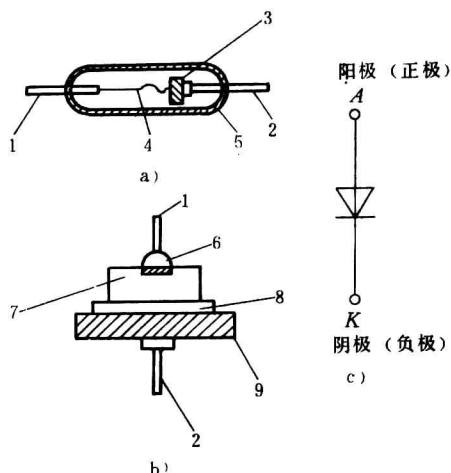


图 1-6 二极管的结构与符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 符号

1—阳极引线 2—阴极引线 3—N 型锗片 4—金属触丝 5—外壳 6—铝合金小球 7—N 型硅 8—金锡合金 9—底座

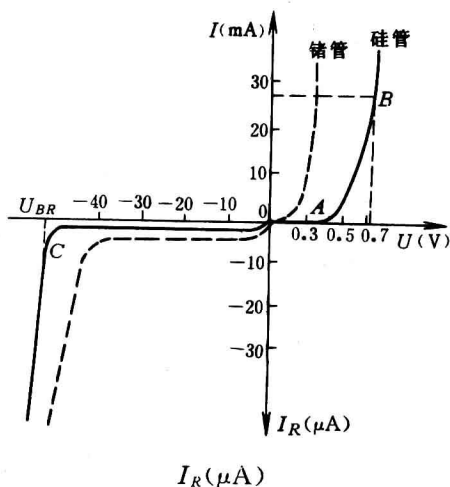


图 1-7 二极管的伏安特性

此, 不同型号的二极管给出了最高工作频率 f_M 的限制, 便于使用中正确选择。

值得指出的是由于制造工艺的限制, 同一型号的管子, 参数的分散性很大。有关电子器件手册中往往给出参数的范围, 而参数是在一定的测试条件下测得的, 条件变了, 相应的参数值也会发生变化。

例 1-1 在图 1-8a 中, 已知 $u_i = 10\sin\omega t$ V, $E = 5$ V, $R = 1$ k Ω , 二极管的正向压降和反向电流均忽略不计, 试画出 u_o 的波形。

解 当 $u_i < E$ 时, 二极管反向截止 (相当于开路), $u_o = u_i$, 即 u_o 随 u_i 变化而变化, 当 $u_i > E$ 时, 二极管正向导通 (相当于短路), $u_o = E$ 。 u_o 的波形如图 1-8b 所示, 作图时应注意 u_o 与 u_i 的对应关系。

例 1-2 图 1-9 所示电路中, 下列几种情况下, 试求输出端 F 的电位 V_F 及各元件中流过的电流: 1) $V_A = V_B = 0$ V, 2) $V_A = +3$ V, $V_B = 0$ V, 3) $V_A = V_B = +3$ V。二极管的正向压降可以忽略不计。

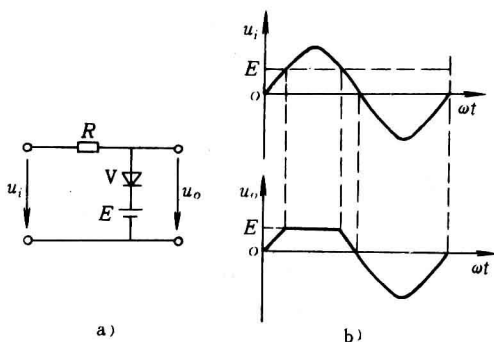


图 1-8 例 1-1 图

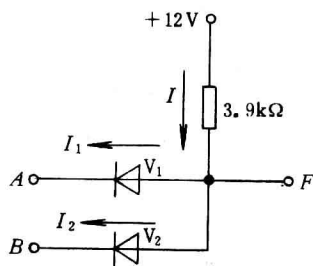


图 1-9 例 1-2 图

解 1) 两只二极管都导通, $V_F = 0$ V,

$$I = \frac{12}{3.9} \text{ mA} = 3.08 \text{ mA}$$

$$I_1 = I_2 = \frac{1}{2} I = 1.54 \text{ mA}$$

2) V_2 导通, V_1 截止, $V_F = 0$ V,

$$I_1 = 0,$$

$$I_2 = I = \frac{12}{3.9} \text{ mA} = 3.08 \text{ mA}$$

3) 两只二极管都导通, $V_F = +3$ V,

$$I = \frac{12-3}{3.9} \text{ mA} = 2.3 \text{ mA}$$

$$I_1 = I_2 = \frac{1}{2} I = 1.15 \text{ mA}$$

第二节 稳压二极管

一、稳压二极管的稳压作用

稳压二极管 (简称稳压管) 是一种特殊的二极管。它的符号、伏安特性如图 1-10 所示。稳

压二极管工作于反向击穿区,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。当然,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,为此稳压管必须串联一个合适的限流电阻后再接入电路。

稳压管的正向特性与普通二极管基本一样,正向压降约为 0.6V ,但它的反向击穿特性更陡些。图 1-10 中的 U_Z 表示反向击穿电压,即稳压管的稳定电压。稳压管的稳压作用是工作在稳压区时,当流经管内的电流变化很大时,它的端电压变化很小。特性曲线愈陡,稳压管的稳压性能愈好。

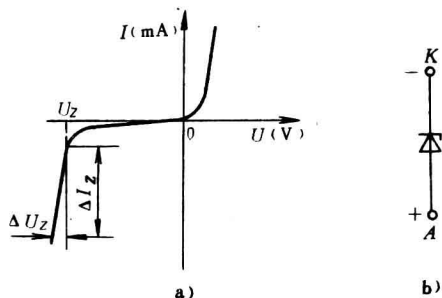


图 1-10 稳压管的符号和伏安特性

a) 稳压管的伏安特性 b) 稳压管的符号

二、稳压管的主要参数

(一) 稳定电压 U_Z

U_Z 即稳压管的反向击穿电压值。同一型号的稳压管,由于工艺方面的原因, U_Z 的分散性较大。例如 2CW55 型稳压管的 U_Z 在 $6\sim 7.5\text{V}$ 之间(测试电流为 10mA)。

(二) 稳定电流 I_Z

I_Z 即稳压管正常工作时的参考电流值。当流过稳压管的电流小于此值时,稳压管的稳压性能变差。高于此值时(但只要不超过最大稳定电流 I_{ZM}),稳压管都能正常工作。

(三) 动态电阻 R_Z

它是稳压管两端电压变化量 ΔU 与电流变化量 ΔI 之比,即 $R_Z = \Delta U / \Delta I$ 。由于稳压管是非线性元件, R_Z 随工作电流不同而改变,电流越大, R_Z 越小,稳压性能越好。

(四) 电压温度系数 C_{TV}

稳压管的稳定电压 U_Z 与温度有关,用温度系数 C_{TV} 表示。正温度系数表示温度升高, U_Z 增加;负温度系数表示温度升高, U_Z 降低。例如 2CW18, $C_{TV} = 0.095\% / ^\circ\text{C}$,温度在 20°C 时的稳压值是 11V ,温度在 50°C 时的稳压值为

$$[11 + 0.095\% \times (50 - 20) \times 11]\text{V} \approx 11.3\text{V}$$

(五) 最大耗散功率 P_{ZM}

P_{ZM} 指管子的最大允许损耗功率, $P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$,超过此值就会使管子因过热而损坏。

例 1-3 在图 1-11 所示电路中,稳压管的参数 $U_Z = 12\text{V}$, $I_{ZM} = 18\text{mA}$,为使管子不致烧坏,限流电阻 R 的阻值应为多少?

解
$$R \geq \frac{U_i - U_Z}{I_{ZM}} = \frac{20 - 12}{18} \text{k}\Omega = 0.44 \text{k}\Omega$$

例 1-4 图 1-12a 所示电路, $u_i = 20\sin\omega t \text{ V}$,稳压管的稳定电压都是 10V ,稳压管的正向压降忽略不计,试画出输出电压的波形。

解 当 $u_i \geq 10\text{V}$ 时, V_2 击穿导通, $u_o = 10\text{V}$;当 $u_i \leq -10\text{V}$ 时, V_1 击穿导通, $u_o = -10\text{V}$;当 $-10\text{V} \leq u_i \leq 10\text{V}$ 时,两个稳压管其中之一不导通, $u_o = u_i$;输出波形如图 1-12b 所示。

此例是用稳压管来作双向限幅。有时将两个稳压管做在一起,在两个方向上都能起到稳定电压的作用,称为双向稳压管,符号如图 1-12c 所示。

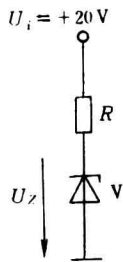


图 1-11 例 1-3 图

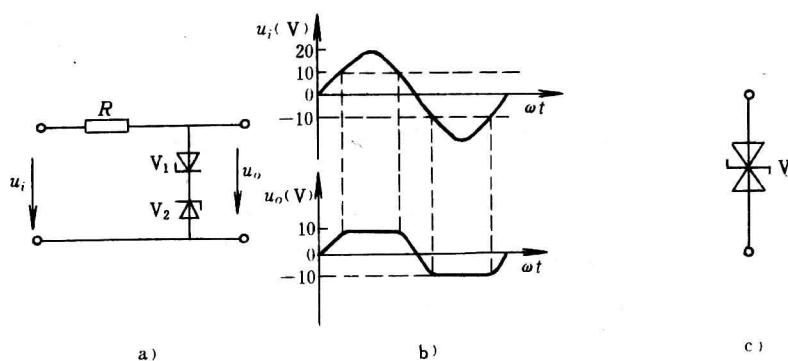


图 1-12 例 1-4 图

第三节 半导体三极管

半导体三极管又称晶体三极管，简称晶体管。它是电子线路中应用最广泛的电子器件，也是本书后面各章学习的基础。

一、基本结构

晶体管有两种类型：PNP 型和 NPN 型，图 1-13 是它们的结构示意图和图形符号。由图

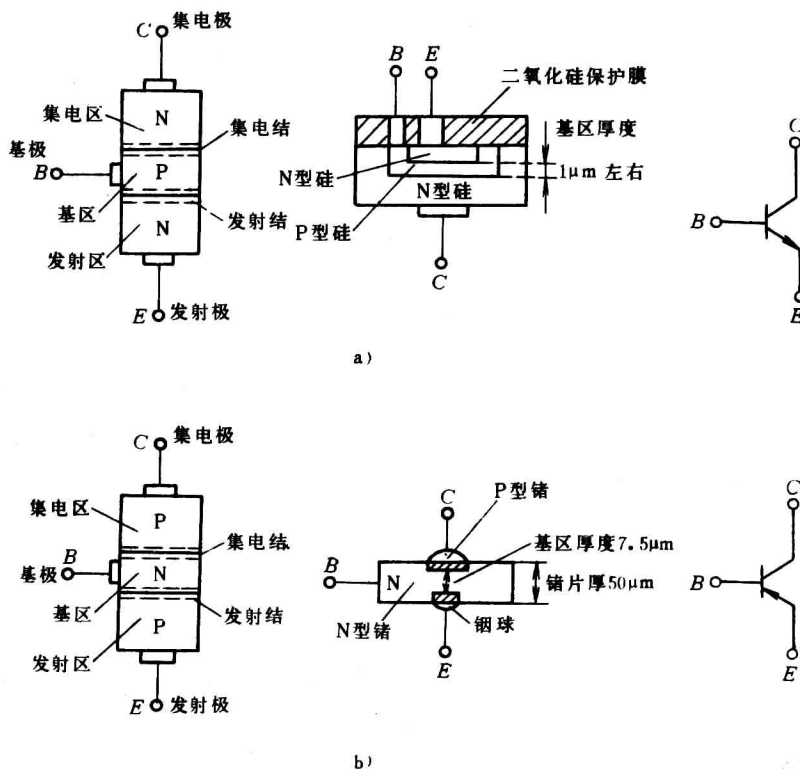


图 1-13 晶体管结构示意图与图形符号

a) NPN 型硅平面管 b) PNP 型锗合金管

可知,它们的三个区分别是发射区、基区和集电区,从三个区引出的三个电极分别称为发射极 E 、基极 B 和集电极 C 。基区与发射区之间形成的 PN 结称为发射结,基区与集电区之间形成的 PN 结称为集电结。

晶体管内部结构的特点是发射区掺杂浓度高,即多子浓度高,基区掺杂浓度低且很薄;集电区掺杂浓度也很低,且它的厚度比发射区大得多。这是晶体管具有电流放大作用的内部条件。显然,集电极与发射极不能互换,使用中要注意区分三个管脚。

二、晶体管的电流放大作用

晶体管内部结构是其具有电流放大作用的内部条件,而放大的外部条件是:发射结要处于正向偏置,集电结要处于反向偏置。对于 NPN 型的管子,即 $V_C > V_B > V_E$; 对 PNP 型的管子,即 $V_C < V_B < V_E$ 。下面以 NPN 型晶体管为例,简要说明它的电流放大作用。

(一) 发射区向基区扩散电子

由于发射结处于正向偏置,有利于发射区的自由电子(多子)向基区扩散(同时基区的空穴也将向发射区扩散,但由于基区掺杂浓度低,这部分空穴可略去不计),从而形成发射极电流 I_E ,如图 1-14 所示。

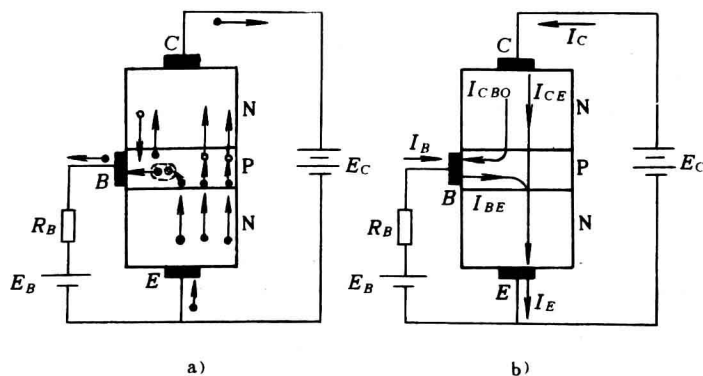


图 1-14 晶体管内部电流分配关系

a) 载流子运动 b) 电流分配

(二) 电子在基区扩散与复合

从发射区扩散到基区的自由电子,由于浓度上的差别,将继续向集电结边缘扩散,由于基区很薄,很快扩散到集电结边缘,在扩散过程中,很少一部分电子与基区的空穴复合。基极电源 E_B 给基区补充空穴,形成电流 I_{BE} ,它基本上等于基极的电流 I_B ,如图 1-14b 所示,但 I_B 很小,一般为几十微安。

(三) 集电极收集从发射区扩散来的自由电子

由于集电极处于反向偏置,从发射区扩散到集电结边缘的自由电子在电场的作用下,很容易漂移到集电区,形成电流 I_{CE} ,它近似等于集电极电流 I_C 。与此同时,集电区与基区的少子在反向电压作用下发生漂移运动,形成集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO} 。这电流数值很小,它构成集电极电流和基极电流的一小部分,如图 1-14b 所示。它随温度的增高而增大,但与外加电压的大小关系不大。

从上面分析可以看出: $I_E = I_{CE} + I_{BE}$, 且 $I_{CE} \gg I_{BE}$, 这就是晶体管的电流放大作用。而把 I_{CE} 与 I_{BE} 之比值称为直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 。

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

交流电流放大系数为 I_C 的增量 ΔI_C 与 I_B 的增量 ΔI_B 之比, 即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

一般情况下, $\bar{\beta} = \beta$ 。

三、晶体管的特性曲线

晶体管特性测试电路如图 1-15 所示。此电路输入回路和输出回路共有发射极, 称共发射极电路。

晶体管的特性曲线包括输入特性曲线和输出特性曲线两种。利用这些特性曲线可以较全面、确切地了解晶体管的工作性能。

(一) 输入特性

输入特性是指当 U_{CE} 为某一固定值时, 基极电流 I_B 与 U_{BE} 间的关系, 即

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

图 1-16a 所示的输入特性, 为 $U_{CE} = 0V$ 时, 相当于晶体管两个 PN 结并联加上正向电压, 它与二极管的正向特性相似。当 $U_{CE} = 1V$ 时, 这时集电结处于反向偏置, 从发射区扩散到基区的自由电子绝大部分被拉入集电区, 因而在同样的 U_{BE} 下, I_B 减小, 输入特性右移。当 $U_{CE} > 1V$ 时, 输入特性与 $U_{CE} = 1V$ 时的输入特性曲线基本上重合。这是因为当 $U_{CE} = 1V$ 时, 电压已足以将扩散到集电结边缘的自由电子收集过去, 因而 U_{CE} 的继续增大对 I_B 的影响很小。

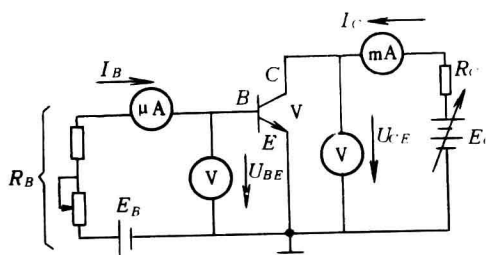


图 1-15 晶体管特性测试电路

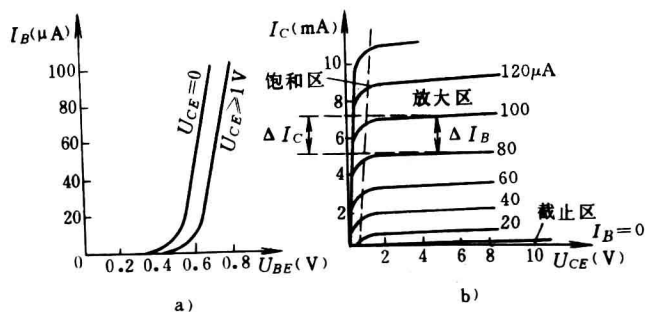


图 1-16 晶体管特性曲线

(二) 输出特性

输出特性是指当 I_B 是某一固定值时, 集电极电流 I_C 与集电极-发射极之间电压 U_{CE} 的关系, 即

$$I_C = f(U_{CE}) \quad | I_B = \text{常数}$$

图 1-16b 是晶体管的输出特性曲线, 它可以分成三个区域, 对应于晶体管的三种工作状态。

1. 截止区 $I_B = 0$ 的曲线以下区域称为截止区, 这时 $I_C = I_{CEO}$ (穿透电流)。当 U_{BE} 小于死区电压时, 晶体管已开始截止, 为了可靠截止, 有时使 $U_{BE} \leq 0$, 这时集电极与发射极之间呈高阻状态, 相当于开关断开一样。

2. 放大区 发射结为正向偏置, 集电结为反向偏置的区域称为放大区。此时集电极电流 I_C 与电压 U_{CE} 几乎无关, 特性曲线近似与横轴平行, 就是说, 当 I_B 一定时, I_C 也就基本不变。

考虑到有穿透电流存在, I_C 与 I_B 的关系是 $I_C = \bar{\beta}I_B + I_{CEO}$ 。放大区的特点是 I_C 的大小受 I_B 控制, 当 I_B 变化 ΔI_B 时, I_C 也就相应地变化 ΔI_C , 且 $\Delta I_C \gg \Delta I_B$, $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \gg 1$ 。

性能好的晶体管该区曲线近于平行等距, 且 I_{CEO} 很小, 这时 $\beta \approx \bar{\beta}$, 由于制造工艺的分散性, 同一型号的晶体管 β 值也有很大区别, 常用的晶体管 β 值在 20~100 之间。

3. 饱和区 为 $U_{BE} > U_{CE}$ 时, 集电结处于正向偏置, 晶体管工作于饱和状态, 这一区域称为饱和区。在饱和区, I_B 的变化对 I_C 的影响较小, 两者不成比例, $I_{CS} < \beta I_B$, I_{CS} 称为集电极临界饱和电流, 图 1-15 所示测试电路中, $I_{CS} \approx \frac{E_C}{R_C}$ 。

饱和时, C 、 E 之间的压降称为饱和压降, 用 U_{CES} 来表示, 小功率硅管约为 0.3V, 锗管约为 0.1V。晶体管饱和时, 发射结与集电结均处于正向偏置, 晶体管集电极与发射极之间呈现低电阻状态, C 、 E 间相当于开关闭合。

晶体管的线性放大区, 常用来放大模拟信号; 它的开关特性, 即工作在截止区和饱和区, 常用于数字电路。

例 1-5 在图 1-15 中, 已知 $E_C = 10V$, $E_B = 5V$, $R_C = 3k\Omega$, $R_B = 200k\Omega$, $\bar{\beta} = 100$, 求 I_B 、 I_C 和 U_{CE} 。如果将 R_B 减小到 $100k\Omega$, 晶体管是否还工作在放大区?

$$\text{解} \quad I_B = \frac{E_B - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{200 \times 10^3} \text{mA} = 0.0215 \text{mA} = 21.5 \mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 2.15 \text{mA}$$

$$U_{CE} = E_C - I_C R_C = (10 - 2.15 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^3) \text{V} = 3.55 \text{V}$$

如果 $R_B = 100k\Omega$ 时, 则

$$I_B = \frac{E_B - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{100 \times 10^3} \text{mA} = 0.043 \text{mA} = 43 \mu\text{A}$$

晶体管的集电极临界饱和电流 I_{CS} 为

$$I_{CS} = \frac{E_C}{R_C} = \frac{10}{3} \text{mA} = 3.33 \text{mA} < \bar{\beta} I_B = 100 \times 0.043 \text{mA} = 4.3 \text{mA}$$

所以, 晶体管工作在饱和区。

四、主要参数

晶体管除直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和交流电流放大系数 β 以外, 还有下列参数。

(一) 集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO}

I_{CBO} 是指发射极开路, 集电结反向偏置时的电流, 它实质上是集电结的反向饱和电流。它受温度的影响大, 因此该值越小越好。

(二) 穿透电流 I_{CEO}

I_{CEO} 是指基极开路时, 流经集电极和发射极之间的电流, 它好像直接穿过管子, 故称穿透电流。可以证明, $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ 。当温度增加时, I_{CBO} 增加, I_{CEO} 增加更快, 从而使 I_C 也相应增加, 造成晶体管的温度稳定性差。

(三) 极限参数

1. 集电极最大允许电流 I_{CM} 当集电极电流过大时, β 将下降。当 β 值下降到正常值的 2/3 时的集电极电流称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。因此, 在实际使用时, I_C 超过 I_{CM} 并不一定会使晶体管损坏。

2. 集-射极反向击穿电压 $U_{CEO(BR)}$ 指当基极开路时, 加在集电极和发射极之间的最大允许电压。从图 1-17 输出特性可看到, 当 $U_{CE} > U_{CEO(BR)}$ 时就会引起 I_C 急剧增加, 从而造成集电结反向击穿, 使用时应注意这一点。

3. 集电极最大允许功耗 P_{CM} 集电极功耗等于集电极电流 I_C 与管压降 U_{CE} 的乘积, 图 1-17 在特性曲线上作出了 P_{CM} 的曲线, 定出了过损耗区。集电极功耗会使晶体管的集电结温度升高, 当结温超过一定限度时 (硅管约为 150°C , 锗管约为 70°C), 将会使晶体管过热而损坏, 使用中应注意不能超过, 并注意散热。

五、温度对晶体管特性和参数的影响

与二极管一样, 晶体三极管的特性和参数同样受温度影响, 主要在以下三个方面:

(一) 温度对 I_{CBO} 和 I_{CEO} 的影响

图 1-17 晶体管安全工作区

前面已经谈到, 温度增加, I_{CBO} 会增加, 而 I_{CEO} 的增加量为 $(1+\beta)I_{CBO}$, 温度每增加 10°C , I_{CEO} 增加近一倍。

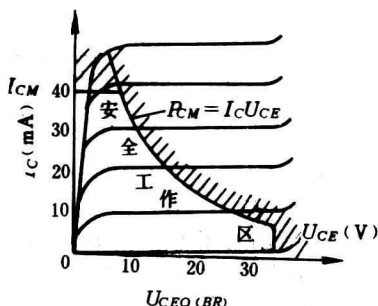
(二) 温度对 β 的影响

温度升高时, 晶体管的电流放大系数 β 增大, 使输出特性曲线之间的间隔加大。

(三) 温度对 U_{BE} 的影响

温度升高时, 晶体管的输入特性曲线向左移, 使 U_{BE} 减小。若 U_{BE} 一定, 则 I_B 增加。

温度对 I_{CEO} 、 β 和 U_{BE} 的影响, 集中反映在集电极电流 I_C 随温度的增加而增加, 为此, 在电路中将采取适当措施, 抑制 I_C 随温度变化而改变, 以保证电路工作的稳定。



习 题

1-1 如何用万用表来判断二极管的阳极和阴极?

1-2 图 1-18 所示电路中, 已知输入电压 $u_i = 10\sin\omega t$ V, 二极管视为理想元件, 试画出输出电压 u_o 的波形。

1-3 图 1-19 所示电路中, 试求下列情况下输出端电位 V_F 及各元件中通过的电流: 1) $V_A = +5\text{V}$, $V_B = 0.3\text{V}$; 2) $V_A = V_B = +5\text{V}$ 。设二极管为理想元件。

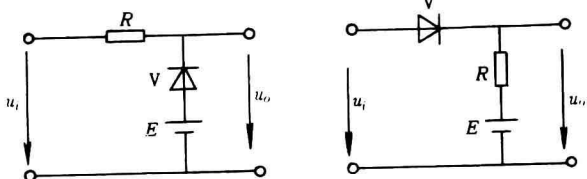


图 1-18 题 1-2 图

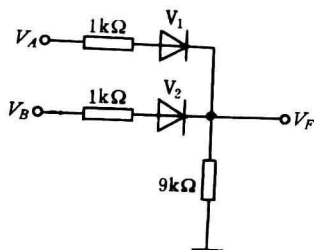


图 1-19 题 1-3 图

1-4 图 1-20 所示电路中的二极管是导通还是截止的? 为什么?

1-5 有两个稳压管, V_1 的稳定电压是 5.5V , V_2 的稳定电压是 8.5V , 正向压降都是 0.5V 。如果要得到 0.5V 、 3V 、 9V 和 14V 几种稳定电压, 两个稳压管和限流电阻应如何联接? 画出各电路。

1-6 稳压管稳压电路如图 1-21 所示, 已知稳压管的稳压值为 6V , 稳定电流为 10mA , 额定功耗为