



高职高专“十二五”规划教材

电子技术基础

何首贤 主 编
邢迎春 马振峰 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



高职高专“十二五”规划教材

电子技术基础

主 编 何首贤

副主编 邢迎春 马振峰

主 审 郭显久



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书包括模拟电子技术和数字电子技术两部分。全书紧密结合高等职业教育特点,适应社会实际需要,突出针对性、应用性。全书共分 15 章,包括半导体二极管和三极管、交流放大电路基础、负反馈放大电路、功率放大电路、集成运算放大电路、正弦波振荡电路、直流稳压电源、数字逻辑基础、集成逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、数/模和模/数转换电路及电子线路读图。

本书适用于高职高专电气、机电、机械等专业,也可作为高职高专非机电类工程技术有关专业的教学用书,还可供从事电子技术工作的工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术基础/何首贤主编. —北京:中国电力出版社, 2013.8

高职高专“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-4787-8

I. ①电… II. ①何… III. ①电子技术-高等教育-教材
IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 179509 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 8 月第一版 2013 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 307 千字

定价 23.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言

随着科学技术的不断发展,电子技术日益广泛地渗透到科学技术和工业生产的各个领域。本书结合高职教育的培养目标进行编写,适用于高职高专电气、机电、机械类专业,也可作为高职高专非机电类工程技术有关专业的教学用书。

本书包括模拟电子技术和数字电子技术两部分,共分 15 章。教材在内容的选取及编写上,具有如下特点。

(1) 模拟部分以分立元件电路作为学习集成电路基础,数字部分以介绍电路的逻辑功能为主,侧重中小规模数字集成电路的功能介绍和应用。

(2) 只讨论电子元器件的外特性和应用知识,其内部结构和机理未介绍。

(3) 教材编写以“必须、够用”为原则,避免繁琐的公式推导和数学论证,力求理论联系实际,学以致用。

(4) 教材内容突出应用性、实用性、针对性,将知识点与能力点有机结合,深入浅出,通俗易懂。

本书由何首贤主编、邢迎春、马振峰任副主编,陈宝大参编,郭显久主审。其中第 1 章、第 2 章、第 10 章、第 12 章由何首贤编写,第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 9 章、第 13 章、第 14 章由邢迎春编写,第 3 章、第 7 章、第 8 章、第 11 章、第 15 章由马振峰编写,陈宝大参与部分习题的编写。全书由何首贤负责统稿。

由于作者水平有限,书中难免存在许多不足,恳请读者批评指正,不胜感谢。

作者

2013 年 5 月



目 录

前言

第 1 篇 模拟电子技术

第 1 章 半导体二极管和三极管	1
1.1 半导体的基本知识	1
1.2 半导体二极管	3
1.3 半导体三极管	8
思考题与习题	12
第 2 章 交流放大电路基础	14
2.1 晶体管基本放大电路组成.....	14
2.2 放大电路的基本工作原理.....	15
2.3 放大电路的微变等效电路分析法.....	20
2.4 放大电路的另两种基本组态.....	24
2.5 阻容耦合多级放大电路.....	27
2.6 场效应管及其放大电路.....	31
思考题与习题	36
第 3 章 负反馈放大电路	40
3.1 反馈的基本概念与分类.....	40
3.2 负反馈放大电路.....	41
3.3 负反馈对放大电路性能的影响.....	43
3.4 深度负反馈电路电压放大倍数的估算.....	45
思考题与习题	45
第 4 章 功率放大电路	47
4.1 概述.....	47
4.2 互补对称功率放大电路.....	48
4.3 集成功率放大电路.....	54
4.4 功率管的散热问题.....	55
思考题与习题	56
第 5 章 集成运算放大电路	57
5.1 概述.....	57
5.2 差动放大电路.....	58
5.3 集成运放的主要参数及类型.....	63
5.4 集成运算放大电路的应用.....	64

5.5 集成运放的非线性应用·····	68
5.6 集成运放在应用中的实际问题·····	69
思考题与习题·····	71
第6章 正弦波振荡电路 ·····	73
6.1 自激振荡·····	73
6.2 LC 正弦波振荡电路·····	74
6.3 RC 正弦波振荡电路·····	77
思考题与习题·····	79
第7章 直流稳压电源 ·····	80
7.1 直流稳压电源的组成·····	80
7.2 单相整流电路·····	80
7.3 滤波电路·····	83
7.4 稳压电路·····	85
7.5 集成稳压器·····	88
思考题与习题·····	91

第2篇 数字电子技术

第8章 数字逻辑基础 ·····	93
8.1 数制与码制·····	93
8.2 基本逻辑运算和逻辑门·····	96
8.3 逻辑函数的几种表示方法及其相互转换·····	101
8.4 逻辑代数公式·····	103
8.5 逻辑函数的化简·····	105
思考题与习题·····	111
第9章 集成逻辑门电路 ·····	113
9.1 TTL 数字集成电路·····	113
9.2 MOS 数字集成电路·····	117
思考题与习题·····	120
第10章 组合逻辑电路 ·····	122
10.1 组合逻辑电路的分析和设计·····	122
10.2 加法器和数值比较器·····	123
10.3 编码器·····	127
10.4 译码器·····	130
10.5 数据分配器和数据选择器·····	132
思考题与习题·····	135
第11章 触发器 ·····	137
11.1 概述·····	137
11.2 基本 RS 触发器·····	138
11.3 同步触发器·····	140

11.4 集成触发器及应用	144
思考题与习题	146
第 12 章 时序逻辑电路	149
12.1 概述	149
12.2 时序逻辑电路分析	149
12.3 计数器	153
12.4 寄存器	159
思考题与习题	161
第 13 章 脉冲波形的产生与整形	163
13.1 555 集成定时器	163
13.2 单稳态触发器	164
13.3 多谐振荡器	168
13.4 施密特触发器	173
思考题与习题	174
第 14 章 数/模和模/数转换	176
14.1 概述	176
14.2 数/模转换器	176
14.3 模/数转换器	181
思考题与习题	188
第 15 章 电子线路读图练习	189
15.1 读图方法	189
15.2 读图练习	189
思考题与习题	194
参考文献	196



第1篇 模拟电子技术

第1章 半导体二极管和三极管

【本章提要】 半导体器件是组成电子线路的关键元件，电子线路的性能与其所用的半导体器件特性有着密切的关系。本章简要介绍半导体的基本知识、PN结的形成和单向导电特性，在此基础上，介绍半导体二极管和三极管的结构、工作原理、特性及主要参数。本章应重点掌握二极管、稳压管和三极管的外特性。

1.1 半导体的基本知识

自然界中的物质，按其导电能力的强弱，大体上分为导体、绝缘体和半导体三大类。铜、铝等金属导电能力良好称为导体，电阻率在 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下。橡胶、塑料等物质导电能力很差，它们都是绝缘体，电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体，如硅、锗和砷化镓等，其电阻率在 $10^{-4} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。

1.1.1 半导体的导电特性

半导体导电能力除了与导体、绝缘体有所不同之外，还具有独特的特性。

(1) 导电能力对温度的反应非常灵敏。温度越高导电能力越强。利用这一特性，半导体可制成热敏元件，用于温度变化的检测。

(2) 导电能力对光照非常敏感。光照越强导电能力越强。利用这一特性，半导体可制成光敏元件，如光敏电阻、光电管等。

(3) 在纯净的半导体中掺入微量的杂质（指其他元素），它的导电能力会大大增强。利用这一特性，可制造出各种半导体器件，如二极管、三极管、场效应管、晶闸管等。

1.1.2 本征半导体

纯净的半导体称为本征半导体，常用的本征半导体是硅和锗二晶体。硅、锗等半导体材料都是晶体结构。一般情况下，晶粒中的原子排列是整齐的，但从晶体整体来说，每个晶粒的方向彼此不同，所以原子的排列还是无规律和不整齐的，这种晶体称为多晶体。一般来讲，多晶体不能制成半导体器件。如果把多晶体“拉成”单晶体，使其原子排列由无规律和不整齐的状态变成有规律和整齐的状态，那么这种单晶体就可以制成晶体管和集成电路。

图 1-1 所示为硅单晶体原子排列示意图。硅原子的最外层有 4 个电子，由原子结构理论可知，当原子的最外层电子数为 8 个时，其结构就成为比较稳定的状态。这样每相邻两个原子都共有一对电子，称为“共有电子对”。电子对中的任何一个电子，既围绕自身原子核运动，也出现在相邻原子所属的轨道上，这样的组合称为共价键结构。

在温度 $T=0\text{K}$ （开尔文）和没有外界影响的条件下，半导体内的价电子全部束缚在共价键中，没有能自由运动的电子。当半导体的温度升高或受光线照射等外界因素影响时，某

些共价键中的价电子获得能量，挣脱共价键的束缚，离开原子成为自由电子，形成带负电的载流子；同时在共价键中留下相同数量的空位，这种由于原子共价键结构的破坏而造成的空位称为“空穴”。空穴与自由电子是成对出现的。若温度升高，单晶的半导体中会产生一定数量的电子—空穴对，这种现象称为热激发，如图 1-2 所示。

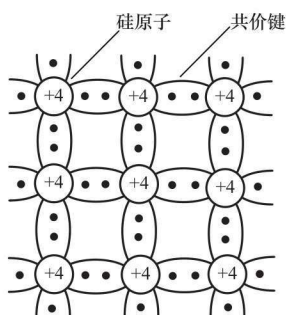


图 1-1 硅单晶体原子排列示意图

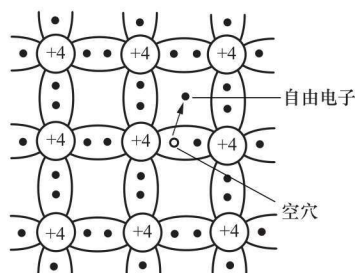


图 1-2 热激发产生的电子—空穴对

由于含空穴的原子带有正电，它将吸引相邻原子中的价电子，并使其挣脱原来共价键的束缚去填补前者的空穴，从而在自己的位置上出现新的空穴，这样，当电子按某一方向填补空穴时，就像带正电荷的空穴按相反方向移动。空穴和电子一样，也是一种载流子。

在本征半导体中，自由电子的数量和空穴的数量是相等的。每形成一个自由电子，同时出现一个空穴，它们成对出现，这种现象称为本征激发，热激发属于本征激发。自由电子在运动过程中，又会和空穴重新结合而成对消失，这种与激发相反的过程称为复合。电子—空穴对的产生与复合，在一定温度下呈现动态平衡，所以，电子—空穴对的数目保持不变。当温度升高后，电子—空穴对的数目相对增加，因此，本征半导体的导电能力随温度增加而显著增加。

综上所述：半导体有两种载流子：自由电子和空穴，这些载流子都是“自由”的，可以在外电场作用下反向运动。如果从本征半导体引出两个电极并接上电源，此时带负电的自由电子将向电源正极作定向运动，形成电子电流，带正电的空穴将向电源负极作定向运动，形成空穴电流，而在外电路中的电流为电子电流和空穴电流之和。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体的导电能力很差，但如果在纯净的半导体中人为掺入微量有用杂质，变成杂质半导体后，就会使其导电性能发生显著变化。

1. N 型半导体

在硅晶体中掺入微量 5 价元素，如磷（或者砷、锑等），如图 1-3 所示，因为磷原子的最外层电子轨道上有 5 个价电子，其中 4 个和周围的硅原子构成共价键，多出的一个电子很容易摆脱原子核的束缚成为自由电子，同时杂质原子变成带正电的粒子，由于自由电子数目增多，这种半导体导电主要靠电子，所以称为电子型半导体，简称 N 型半导体。在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴为少数载流子，多数载流子取决于掺杂，少数载流子取决于热激发（温度）。

2. P 型半导体

如果在硅晶体中，掺入少量的 3 价元素硼（铟、钾等），如图 1-4 所示，由于硼的价电

子只有 3 个，当它与硅原子组成共价键时，因缺少一个价电子会形成空位，相邻共价键上的价电子受热运动很容易填补这个空位，使杂质原子变成带负电的粒子，而在原价电子外形成一个空穴，每掺入一个硼原子都能提供一个空穴，从而使硅晶体中空穴的数目大大增加，而自由电子数很少，这种半导体的导电主要靠空穴，因此称为空穴型半导体，又称 P 型半导体。P 型半导体的空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

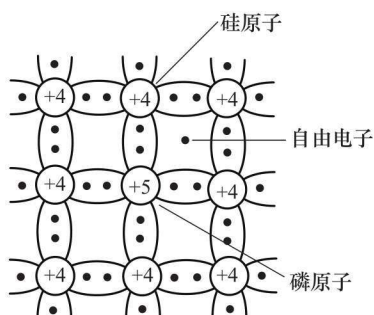


图 1-3 硅晶体中掺磷形成 N 型半导体

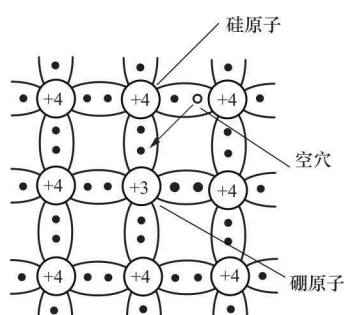


图 1-4 硅晶体中掺硼形成 P 型半导体

综上所述：N 型半导体、P 型半导体中的多数载流子都是掺入杂质造成的，尽管杂质含量甚微，但它们对半导体的导电能力却有很大影响。它们的少数载流子是热运动产生的，尽管数量很少，但对温度非常敏感，对半导体的性能有很大影响。

1.2 半导体二极管

1.2.1 PN 结及其单向导电特性

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体连接为一体时，在交界处就出现了电子和空穴的浓度差别，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，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 区的空穴向 N 区扩散，并与 N 区的电子复合，在 P 区一侧留下不能移动的负离子，同样 N 区的电子向 P 区扩散，且与 P 区的空穴复合，在 N 区一侧留下不能移动的正离子，这个区域称为空间电荷区，如图 1-5 所示。当空间电荷区形成以后，交界面附近就形成了一个内电场，方向由 N 区指向 P 区，内电场的作用是阻碍多数载流子的扩散，故空间电荷区也称为阻挡层。内电场有助于少数载流子的漂移运动，漂移是指在电场作用下的少数载流子的定向运动。因此，N 区空穴向 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，这又将引起多数载流子扩散。当扩散与漂移达到动态平衡时，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。

综上所述：在无外电场或其他因素激发时，

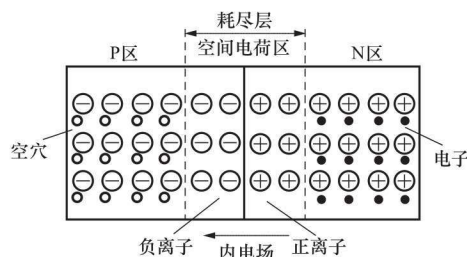


图 1-5 PN 结载流子的运动

PN 结处于平衡状态, 没有电流通过, 空间电荷区是恒定的。另外, 在这个区域内, 多数载流子已扩散到对方并复合掉了, 好像耗尽了一样, 因此, 空间电荷区又称为耗尽层。

2. PN 结单向导电性

PN 结的基本特性是具有单向导电性。

(1) 正向特性。PN 结外加正向电压 (简称正偏), 即电源正极接 P、负极接 N 时的特性, 如图 1-6 所示。正向接法时, 外电场与内电场方向相反, 因而削弱了内电场, 使空间电荷区宽度减小, 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, 本来就是少数载流子运动形成的, 而少数载流子数量又很少, 故对总电流的影响可忽略, 所以, 外接正向电压使 PN 结处于导通状态, 导通时电阻很小。

(2) 反向特性。外加反向电压 (简称反偏), 即电源正极接 N, 负极接 P 时的特性, 如图 1-7 所示。反向接法时, 外电场与内电场方向一致, 空间电荷区大大加宽, 多数载流子扩散难以进行, 有利于少数载流子漂移, 形成 PN 结反向电流。反向电流是少数载流子形成的, 然而少数载流子的浓度很低, 所以反向电流很小, 而且温度一定时基本上不随反偏电压变化。

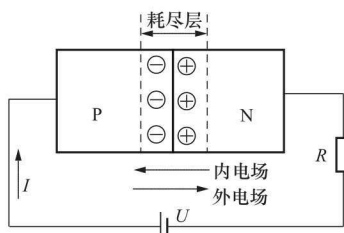


图 1-6 外加正向电压

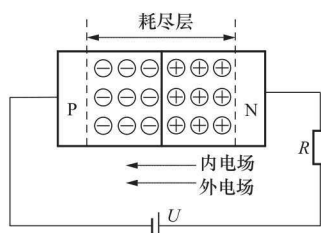


图 1-7 外加反向电压

综上所述: PN 结正偏时电路中有较大电流流过, 呈现低电阻, PN 结导通; PN 结反偏时电路中电流很小, 呈现高电阻, PN 结截止; PN 结具有单向导电性。

3. PN 结的结电容

PN 结形成后的空间电荷区可以等效为一个可变电容, 当外加正向电压时, 空间电荷区电量减少, PN 结变窄, 相当于结电容“放电”; 外加反向电压时, PN 结变宽, 相当于结电容“充电”。PN 结的结电容与其连接方式和外加电压的大小有关, 不是一个常数。正向电压大时, 结电容大; 反之结电容小, 利用这个特性, 可制成变容二极管。

1.2.2 二极管结构

半导体二极管由 PN 结加上引线 and 管壳构成, 按结构不同可分为面接触型和点接触型; 按材料不同可分为硅二极管和锗二极管。其外形及符号如图 1-8 所示。

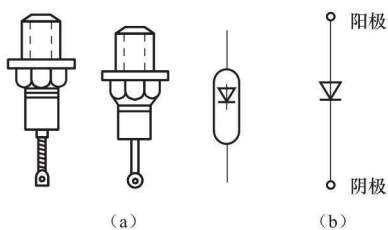


图 1-8 半导体二极管的外形及符号
(a) 外形图; (b) 符号

面接触型二极管的特点是 PN 结面积大, 允许通过的正向电流大。但因面积大, 结电容较大, 只能在较低的频率下工作, 常用于整流电路。

点接触型二极管的特点是 PN 结面积小, 结电容小, 工作电流小, 可以在高频下工作, 常用于高频检波、混频电路。

此外, 还有一种开关型二极管, 常用在数字电路中作开关管。

1.2.3 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指二极管两端电压 U 和流过管子的电流 I 之间的关系, 二极管的伏安特性如图 1-9 所示。二极管的伏安特性可分为 3 部分, 即正向特性、反向特性和反向击穿特性。

1. 正向特性

由图 1-9 中的第①段可见, 在二极管的正向特性的起始部分, 由于外加正向电压较小, 外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子所造成的阻力, 因此这时的正向电流几乎为零, 二极管呈现很大的电阻。这个范围称为“死区”, 相应的电压称为“死区电压”, 用 U_T 表示。锗管死区电压约为 0.1V , 硅管死区电压约为 0.5V 。当正向电压超过死区电压后, 内电场被削弱, 电流增强很快, 正向电阻很小, 二极管处于导通状态。一般情况下, 锗管的正向导通压降约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$, 硅管的正向导通压降约为 $0.6\sim 0.7\text{V}$ 。

2. 反向特性

二极管的反向特性对应于图 1-9 中的第②段。二极管的 PN 结在反向电压作用下, 由少数载流子漂移形成的反向电流很小, 在反向电压不超过某一范围时, 反向电流基本恒定, 故通常称之为反向饱和电流, 此时二极管处于截止状态。在同样的温度下, 硅管的反向电流比锗管小, 硅管约为 $1\mu\text{A}$ 至几十 μA , 锗管可达几百 μA 。

3. 反向击穿特性

当反向电压继续增加到某一电压时, 反向电流剧增, 称为反向击穿。此时, 二极管两端的反向电压几乎不变, 该电压称为反向击穿电压, 用 U_{BR} 表示, 对应图 1-9 中的第③段, 此时, 二极管失去了单向导电性。其原因是, 外加电场过强, 破坏了共价键而把价电子拉出, 引起载流子的数目剧增。

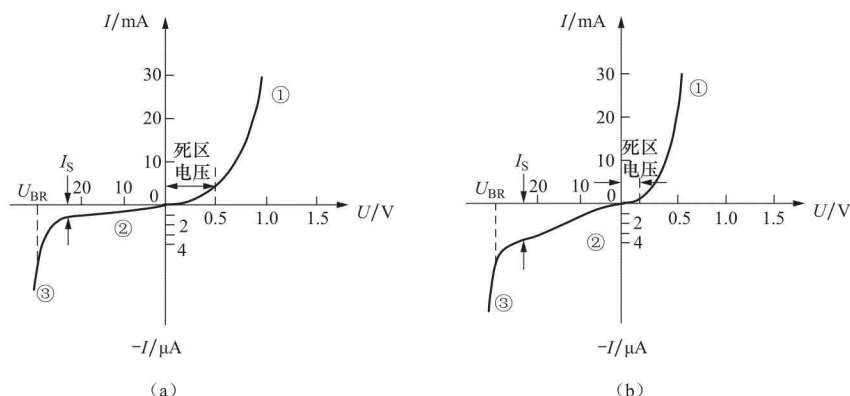


图 1-9 二极管的伏安特性

(a) 硅管; (b) 锗管

1.2.4 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F : 指二极管长期使用时允许流过的最大正向平均电流。它由 PN 结的面积和散热条件决定。使用时注意不能大于这个数值, 否则二极管会因过热而损坏。

(2) 最大反向工作电压 U_R : 指二极管使用时允许承受的最大反向电压。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。

(3) 最大反向电流 I_R ：指二极管加最大反向工作电压时的反向电流。其值越小，二极管单向导电性能越好。温度对反向电流影响很大，使用时应加以注意，尤其是锗二极管。

(4) 最高工作频率 f_M ：主要由二极管的 PN 结电容的大小决定。使用中若频率超过了 f_M ，二极管单向导电性能变差，甚至无法使用。

1.2.5 特殊二极管

1. 硅稳压二极管

稳压二极管是用特殊工艺制造的面接触型硅二极管，因为其具有稳定电压的作用，故称为稳压管。稳压管的伏安特性曲线及符号如图 1-10 所示。稳压管的正向特性曲线与普通二

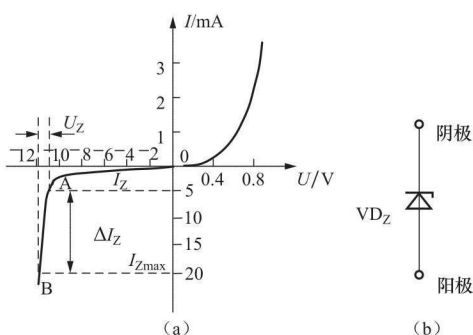


图 1-10 稳压二极管的伏安特性曲线和电路图

(a) 伏安特性曲线；(b) 图形符号

极管相似，而反向特性却不同，当加于稳压管的反向电压从零值开始增加时，起初电流很小，甚至不导通。当电压增加到稳压管击穿电压时，反向电流突然剧增，此后电流虽然在很大范围内变化，但稳压管两端电压却变化很小。如果将稳压管和负载并联，就能在一定条件下保持输出电压不变，这就是稳压管的作用。由于硅管热稳定性好，因此一般都采用硅二极管作稳压管。

硅稳压二极管的主要参数有以下几个。

(1) 稳定电压 U_Z 。稳定电压（击穿电压）是稳压管在正常工作下管子的两端电压，即使同一型号的管子，其稳压值也有一定的分散性。例如，2CW76 的稳定电压为 11.5~12.5V，是指对这种型号的某个管子，其稳定电压是在这个范围内的一个确定数值。在使用时要进行测试，按需要挑选。

(2) 稳定电流 I_Z 。稳定电流是指稳压管正常工作时的参考电流值。电流低于此值时，稳压效果差。高于此值时，只要不超过额定功率都可以正常工作，而且电流越大，稳压效果越好，只是管子的功耗要增加。

(3) 动态电阻 r_Z 。动态电阻是指稳压管在正常工作时，电压变化量与电流变化量之比，即 $r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ 。其数值随工作电流不同而改变。 r_Z 越小，稳压作用越好。

(4) 最大允许耗散功率 P_{ZM} 。它是指稳压管工作时所允许的最大耗散功率。它等于最大稳定电流与相应的稳定电压乘积，即 $P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$ 。

(5) 电压温度系数 α_u 。它是说明稳定电压值随温度影响的参数。硅稳压管 U_Z 低于 4V 时，具有负温度系数，高于 7V 时具有正温度系数，而在 4~7V 之间，温度系数很小。

2. 变容二极管

二极管结电容的大小与外加电压大小有关，反向电压增大，结电容减小；反向电压减小，结电容变大。人们利用结电容随外加电压改变而改变的特性，生产出变容二极管。变容二极管多用于电视机、录像机、收录机的调谐电路和自动频率微调电路中。

3. 发光二极管

发光二极管 (LED) 是一种能将电能转换成光能的半导体器件。其基本原理是，当正向电压大于开启电压时就有正向电流通过，发光二极管就会发光。发光二极管用砷化镓、磷化

镓等制成,图 1-11 (a) 所示为发光二极管的符号,发光二极管主要用于音响设备、数控装置中的显示器。

4. 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管,它的特点是,反向电流大小随光照强度的变化而变化。光电二极管主要用于需要光电转换的自动探测、控制装置以及光导纤维通信系统中作为接收器件等。图 1-11 (b) 所示为光电二极管的符号。

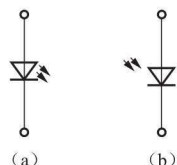


图 1-11 发光二极管与光电二极管符号
(a) 发光二极管符号;
(b) 光电二极管符号

1.2.6 半导体二极管使用常识

(1) 根据需要正确地选择型号。要求导通电流大时,选平面型二极管;要求工作频率高时,选用点接触型二极管;用于整流电路选用整流二极管;要求反向电流小,温度稳定性好,反向击穿电压高,耐温度时选用硅管;要求导通电压低时,选用锗管。

(2) 管子的参数应满足电路的要求。为保证电路正常工作,切勿超过手册中规定的最大允许电流和电压值。硅管与锗管不能互相代用。替换上去的二极管其最高反向工作电压及最大整流电流不应小于被替换管。

(3) 避免靠近发热元件,并保证散热良好。工作在高频或脉冲电路的二极管引线,要尽量短,不能用长引线或把引线变成圈来达到散热目的。

1.2.7 半导体二极管应用举例

1. 整流

整流就是将交流电变换为单方向的脉动电流。图 1-12 所示为半波整流电路。关于整流问题,本书将在第 7 章中详细讨论。

2. 检波

检波就是将载波信号上的低频信号取出。例如在电视、无线电广播及通信中,为了使图像和声音能远距离传送,需要将低频信号(即反映图像和声音的电信号)驮载在高频信号(通常称为载波信号)从天线发射出去,如图 1-13 中左边波形所示。接收机(电视机、收音机等)收到载波信号后,首先利用二极管的单向导电特性将载波信号负半波削去,然后利用旁路电容 C 将高频信号滤掉取出低频信号,如图 1-13 中右边波形所示。被取出的低频信号经放大即可在荧光屏上显示出图像或从扬声器中发出声音。

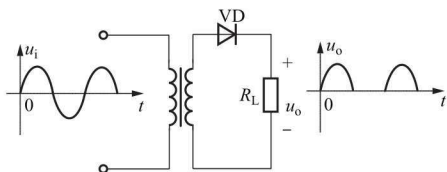


图 1-12 半波整流电路

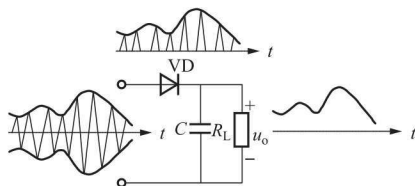


图 1-13 检波电路

3. 限幅

限幅就是限制输出电压幅度,也称作削波。图 1-14 所示为某二极管限幅电路。设 u_i 为正弦波, $U_m > U$ 。当 $u_i < U$ 时,二极管截止, $u_o \approx u_i$ 。当 $u_i > U$ 时,二极管导通,如果忽略二极管压降,则 $u_o = U$ 。此电路属于上限幅,把大于 U 以上的输出波形削去。

4. 钳位

二极管正向导通时,由于正向压降很小,故阴极与阳极的电位基本上相等,这称为二极

管的钳位作用。例如在图 1-15 所示电路中, F 为输出信号输出端。当输入端 A 的电位 $U_A = 0\text{V}$ 、B 的电位 $U_B = 3\text{V}$ 时, A 端电位比 B 端电位低, VD_A 优先导通, 如果忽略二极管正向压降, 则输出电压 $U_F \approx 0\text{V}$ 。当 U_A 导通后, VD_B 反向截止。 VD_A 起钳位作用, 把输出电位钳制在 0V 。 VD_B 截止, B 点的电位对 F 点的电位无影响, 即 VD_B 的阳极与阴极被隔离, 所以二极管 VD_B 起隔离作用。

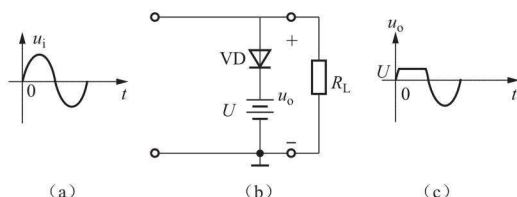


图 1-14 二极管限幅电路

(a) 输入波形; (b) 电路; (c) 输出波形

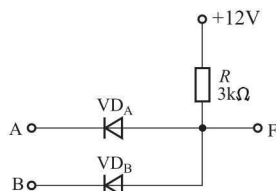


图 1-15 二极管钳位电路

1.3 半导体三极管

半导体三极管是组成放大电路的核心部件。

1.3.1 三极管结构

半导体三极管是由两个背靠背的 PN 结组成。根据排列方式不同, 半导体三极管可分为 PNP 型和 NPN 型两种类型, 如图 1-16 所示, 图中同时画出了它们的电路符号。每个三极管都有三个不同的区域, 中间是基区, 两侧是发射区和集电区。每个区上引出一个电极, 基区引出的是基极, 用符号 B 表示; 发射区引出的称为发射极, 用符号 E 表示; 集电区引出的称为集电极, 用符号 C 表示。基区与发射区之间的 PN 结称为发射结, 基区与集电区的 PN 结称为集电结。

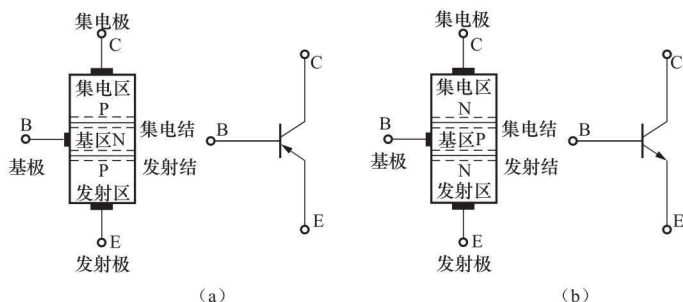


图 1-16 晶体三极管结构示意图及图形符号

(a) PNP 型三极管; (b) NPN 型三极管

半导体三极管的基区很薄。发射区杂质浓度高, 基区浓度最低。以 NPN 为例, 发射区的自由电子浓度比基区空穴浓度大 100 倍以上。此外集电区的几何尺寸比发射区要大, 这些都是晶体管能够起放大作用的重要因素。

PNP 和 NPN 型三极管符号的区别是发射极箭头指向不同, 箭头向里为 PNP, 箭头向外

为 NPN，它表示发射结在正向接法时的电流真实方向，PNP 和 NPN 型三极管的工作原理相似。使用时，电源连接极性不同。

1.3.2 三极管的电流放大作用

三极管内部结构特点是其具有放大作用的内部条件，而放大的外部条件是发射结要正向偏置，集电结要反向偏置。如图 1-17 所示电路，三极管接成两个回路，即基极回路和集电极回路，发射极是公共端，这种接法是三极管的共发射极接法。电源 V_{BB} 的正极接基区，负极接发射区，使发射结正偏。电源 V_{CC} 接在集电极与发射极之间，电源 $V_{CC} > V_{BB}$ ，使集电结反偏。

下面分析三极管内部多数载流子运动的过程。

(1) 发射区向基区发射电子形成发射极电流 I_E 。由于发射结加正向电压，因此发射区多数载流子电子从发射区注入基区，形成发射极电流 I_E ，同时基区多数载流子空穴也注入发射区，但晶体管的发射区掺杂浓度远大于基区，因此，基区扩散到发射区的空穴电流可以忽略不计。

(2) 电子在基区扩散与复合形成基极电流 I_B 。由发射区注入基区的电子继续向集电结扩散，在扩散过程中有少量的电子与基区的空穴复合，形成基极电流 I_B 。由于基区很薄，且空穴浓度很低，因此 I_B 很小。

(3) 电子被集电极收集形成集电极电流 I_C 。绝大多数电子扩散到集电结边缘，由于集电结是反向偏置，因此扩散到集电结边缘的电子在电场作用下，很容易被集电极所收集，构成集电极电流 I_C 的主要成分 I_{C1} ；同时，因集电结加反向电压，必然有很小的反向电流流过集电结，这个电流包括从集电区向基区的空穴电流和基区向集电区的电子电流，它们都是少数载流子形成的电流，所以数值很小，用 I_{CBO} 表示，即有 $I_C = I_{C1} + I_{CBO}$ 。

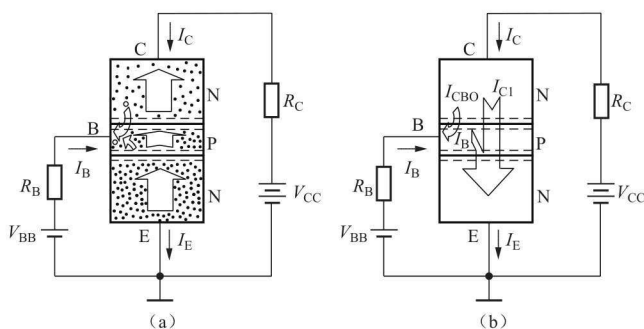


图 1-17 三极管中载流子的运动和电流关系

(a) 载流子的运动；(b) 极间电流的关系

从以上分析可以看出： $I_E = I_B + I_C = I_B + I_{C1} + I_{CBO}$ ，且 $I_C \gg I_B$ ，这就是三极管的电流放大作用。 I_C 与 I_B 之比称为直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ ，即

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

当 I_B 有一增量 ΔI_B 时， I_C 也相应地变化 ΔI_C ，且 $\Delta I_C \gg \Delta I_B$ ，集电极电流的变化量与基极电流变化量之比称为交流电流放大系数 β ，即

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

近似计算时, 可认为 $\bar{\beta} \approx \beta$ 。

综上所述: 三极管之所以能有电流放大作用, 其内部条件是发射区掺杂浓度较高, 基区做得很薄, 掺杂浓度较低, 集电区的几何尺寸较大; 外部条件是集电结反偏, 发射结正偏。电流放大作用的实质是用一个微小的 ΔI_B 去控制一个较大的 ΔI_C 。

1.3.3 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是指各电极电压与电流之间的关系曲线, 它是三极管内部载流子运动的外部表现。这里只介绍共发射极电路的输入特性曲线和输出特性曲线。共发射极接法中这四个量是 I_B 、 U_{BE} 、 I_C 、 U_{CE} 。图 1-18 所示为三极管共射特性曲线测试电路。

1. 输入特性

输入特性是指 U_{CE} 为一常数时, 输入回路中基极电流 I_B 与基—射极之间电压 U_{BE} 的关系, 即

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

当 U_{CE} 等于零时, 相当于集电极与发射极之间短路, 基极与发射极之间相当于两个二极管并联, 其输入特性应为两个二极管并联后的正向特性, 如图 1-19 所示。

当 $U_{CE} \geq 1V$ 时, 集电结已反向偏置, 且内电场已足够大, 可以把从发射区进入基区的电子绝大部分拉入集电区形成 I_C 。与 $U_{CE}=0$ 时相比, 即使在相同的 U_{BE} 下, 流向基极的电流减小, 即特性曲线右移。严格来讲, U_{CE} 不同, 所得到的输入特性也略有不同。实际上, 当 U_{CE} 超过一定数值 (如 $1V$) 以后, 只要 U_{CE} 不变, 则注入基区电子数一定, 而集电结所加的反向电压已能把注入基区的电子绝大部分拉到集电极, 以致 U_{CE} 再增加, I_B 也不再明显地减小, 所以通常只需给出 $U_{CE}=1V$ 的一条输入特性曲线, 就可以代表 $U_{CE} > 1V$ 的输入特性。

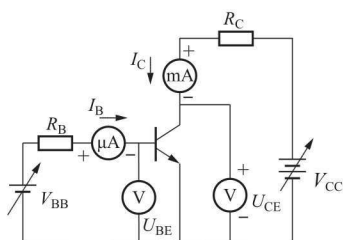


图 1-18 三极管特性曲线测试电路

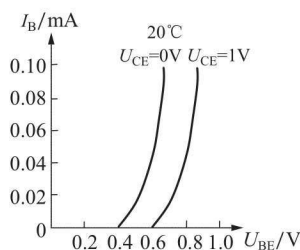


图 1-19 3DG4C 晶体管输入特性曲线

2. 输出特性

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

$$I_C = f(U_{CE}) |_{I_B=\text{常数}}$$

图 1-20 是三极管的输出特性曲线, 它可以划分为以下三个区域, 对应于三极管三种工作状态。

(1) 截止区。一般将 $I_B \leq 0$ 的区域称为截止区。此时 $I_C \approx I_{CEO} \approx 0$, $U_{CE} \approx E_C$, I_{CEO} 称为