

全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材

Dianzi

Jishu

电子技术

(建筑电气工程技术专业适用)

本教材编审委员会组织编写

刘春泽 主编



中国建筑工业出版社

China Architecture & Building Press

全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材

电 子 技 术

(建筑电气工程技术专业适用)

本教材编审委员会组织编写

刘春泽 主编

裴 涛 张玉凤 副主编

吴伯英 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术 / 刘春泽主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2004

全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材

ISBN 7-112-06952-1

I. 电… II. 刘… III. 电子技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 132843 号

全国高职高专教育土建类专业教学指导委员会规划推荐教材

电 子 技 术

(建筑电气工程技术专业适用)

本教材编审委员会组织编写

刘春泽 主编

裴 涛 张玉凤 副主编

吴伯英 主审

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22 字数: 530 千字

2005 年 3 月第一版 2005 年 3 月第一次印刷

印数: 1—3,000 册 定价: 30.00 元

ISBN 7-112-06952-1

TU·6193(12906)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

目 录

第一章 半导体元件及特性	1
第一节 半导体二极管.....	1
第二节 半导体三极管.....	9
第三节 场效应晶体管	14
思考题与习题	19
第二章 基本放大电路	21
第一节 基本放大电路的组成及工作原理	21
第二节 图解法分析放大电路	25
第三节 微变等效电路法分析放大电路	30
第四节 静态工作点的稳定电路	36
第五节 共集电极电路-射极输出器	39
第六节 共基极放大电路和放大电路的频率响应	42
第七节 场效晶体管基本放大电路	51
思考题与习题	56
实验与技能训练	60
第三章 集成运算放大器	62
第一节 集成电路	62
第二节 差分放大器	64
第三节 集成运算放大器	74
第四节 集成运算放大器的应用	79
第五节 负反馈	93
思考题与习题.....	112
实验与技能训练.....	119
第四章 功率放大器	126
第一节 功率放大器概述.....	126
第二节 功率放大器.....	130
思考题与习题.....	138
实验与技能训练.....	139
第五章 直流稳压电源	143
第一节 整流滤波电路.....	143
第二节 硅稳压管稳压电路.....	147
第三节 串联型晶体三极管稳压电路.....	149
思考题与习题.....	153

第六章 逻辑代数基础	154
第一节 数字电路概述	154
第二节 数制与码制	156
第三节 逻辑函数的基本运算	160
第四节 逻辑函数及基本公式	163
第五节 逻辑函数的化简方法	166
思考题与习题	176
第七章 逻辑门电路	178
第一节 二极管、三极管的开关特性	178
第二节 基本逻辑门电路	181
思考题与习题	190
实验与技能训练	192
第八章 组合逻辑电路	196
第一节 组合逻辑电路的分析与设计	196
第二节 加法器和数值比较器	199
第三节 编码器	204
第四节 译码器	209
第五节 数据选择器和数据分配器	221
思考题与习题	228
第九章 触发器	231
第一节 RS 触发器	231
第二节 触发器逻辑功能概述	234
第三节 主从触发器	236
第四节 触发器逻辑功能的转换	237
思考题与习题	239
实验与技能训练	240
第十章 时序逻辑电路	242
第一节 时序逻辑电路的特点与基本分析方法	242
第二节 寄存器	243
第三节 计数器	245
思考题与习题	249
第十一章 A/D、D/A 转换	251
第一节 D/A 转换器	251
第二节 A/D 转换器	257
思考题与习题	266
实验与技能训练	268
第十二章 电力电子技术	270
第一节 晶闸管的组成及工作原理	270
第二节 单相可控整流电路	276

第三节 三相可控整流电路·····	290
第四节 晶闸管触发电路·····	305
第五节 有源逆变电路·····	321
思考题与习题·····	332
实验与技能训练·····	334
参考文献·····	339

第一章 半导体元件及特性

半导体器件是近代电子学的重要组成部分，是构成电子线路的重要器件。由于半导体元器件具有体积小、重量轻、输入功率小和功率转换效率高等优点，因而得到广泛的应用。本章首先介绍半导体的基本知识，接着介绍半导体二极管、三极管、场效应晶体管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数，为后面的章节提供必要的基础知识。

第一节 半导体二极管

一、半导体的特点

(一) 半导体的特点

在自然界中，存在着许多不同的物质，有的物质很容易传导电流，称为导体。也有的物质几乎不传导电流，称为绝缘体。此外还有一类物质，它的导电能力介于导体与绝缘体之间，我们称它为半导体。常见的半导体如锗、硅、硒化镓、一些硫化物和氧化物等。半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外，它还具有不同于其他物质的特点，例如，半导体受到外界光和热的刺激时或者在纯净的半导体中加入微量的杂质，其导电性能会发生显著变化。其中半导体的电阻率随温度的上升而明显下降，呈负温度系数的特性。半导体的导电能力随温度上升而明显增加；半导体的电阻率随光照的不同而变化；在纯净半导体掺入少量的杂质，它的导电能力会得到显著提高。

(二) 本征半导体和空穴

本征半导体是完全纯净的、原子排列整齐的半导体晶体。在 $T=0K$ 和没有外界激发时，没有可以自由运动的带电粒子—载流子，这时它相当于绝缘体。例如高纯度半导体材料硅、锗都是单晶结构，它们的原子整齐地按一定的规律排列着，原子之间的距离不仅很小而且是相等的。图 1-1(a) 和 1-1(b) 所示分别为锗和硅的原子结构示意图。

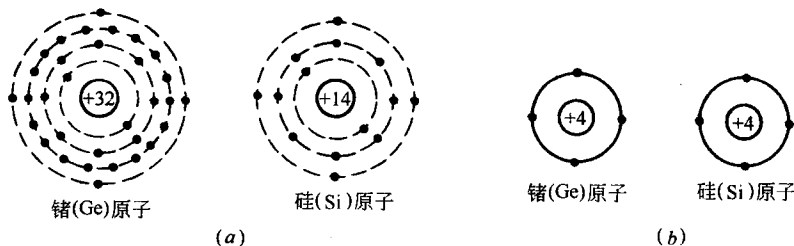


图 1-1 锗和硅原子结构模型

(a) 原子结构图；(b) 简化模型

在硅、锗被制成单晶后，最外层的 4 个价电子不仅受自身原子核的束缚，还与其相邻的 4 个原子核相互吸引，2 个相邻原子之间有 1 对价电子，这种价电子称为共价键结构，如图 1-2 所示。

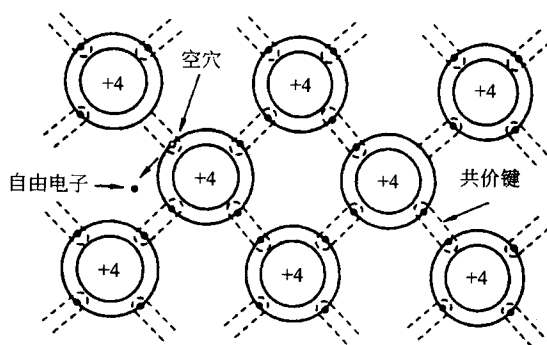


图 1-2 锗(硅)原子在晶体中的共价键排列

半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中的原子被束缚得那么紧，在室温 300K 时，由于热激发，就会使一些价电子获得足够的能量挣脱共价键的束缚，成为自由电子。这种现象称为本征激发。在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键就留下一个空位，这个空位叫做空穴。显然，空穴带有正电荷。当温度越高时，电子的空穴越多。电子空穴的热运动是杂乱无章的，对外不显电性。

(三) 杂质半导体

在本征半导体中掺入少量的杂质，就会使半导体的导电性能发生显著的改变。因掺入杂质的不同，可分为 N 型半导体(电子半导体)和 P 型半导体(空穴半导体)。

1. N 型半导体

在本征半导体中(如硅、锗中)掺入少量的五价元素杂质，如磷、锑、砷等，会使半导体中的自由电子数发生变化，磷原子有五个价电子，它的四个价电子与相邻的硅组成共价键后，还多余一个价电子，多余的价电子很容易受激发成为自由电子。所以掺入的磷元素越多，则自由电子就越多。如图 1-3 所示。由于磷原子在硅晶体中给出了一个多余的电子，称磷为施主杂质，或 N 型杂质。但在产生自由电子的同时并不产生新的空穴，因此在 N 型半导体中，自由电子数远大于空穴数。这样的一种半导体将以自由电子导电为主，所以自由电子称为多数载流子，而空穴称为少数载流子。

2. P 型半导体

在本征半导体中(如硅、锗中)掺入少量的三价元素杂质，如硼、镓等，硼原子最外层只有三个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个价电子，在晶体中就留有一个空穴，空穴数量增多，自由电子则相对很少。如图 1-4 所示。由于硼原子在硅晶体中能

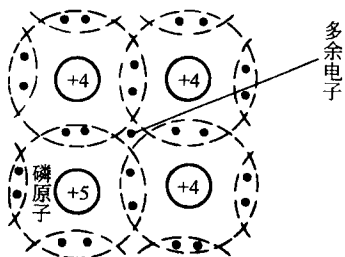


图 1-3 N 型半导体

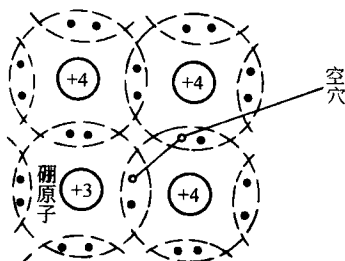


图 1-4 P 型半导体

接受电子，故称硼为受主杂质，或 P 型杂质。在产生空穴的同时并不产生新的自由电子，因此在 P 型半导体中，空穴数远大于自由电子数。在这种半导体中以空穴导电为主，故空穴为多数载流子，而自由电子为少数载流子。注意不论是 N 型半导体或是 P 型半导体都是电中性，对外不显电性。

二、PN 结的形成与特性

(一) PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体接触后，在交界面处由于载流子的扩散运动，P 区的空穴向 N 区扩散，N 区的电子向 P 区扩散。在 P 区和 N 区的接触面上就产生了正、负离子层。N 区一侧失去自由电子剩下正离子，P 区一侧失去空穴剩下负离子，这个区域称为空间电荷区，即 PN 结。同时形成一个由 N 区指向 P 区的内电场，内电场的方向从 N 区指向 P 区。内电场对扩散运动起阻碍作用，电子和空穴的扩散运动随着内电场的增强而逐渐减弱，最后达到动态的平衡。如图 1-5(a)、(b) 所示。

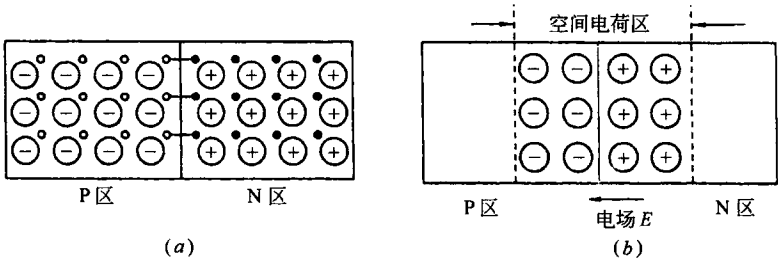


图 1-5 PN 结的形成

(二) PN 结的单向导电性

PN 结在使用时总是加一定的电压，若 PN 结外加正向电压(P 区的电位高于 N 区的电位)，称为正向偏置，简称正偏。如图 1-6(a) 所示。这时 PN 结外电场与内电场方向相反，PN 结变窄，则 P 区的多数载流子空穴和 N 区的多数载流子自由电子在回路中形成较大的正向电流 I_F ，使 PN 结正向导通。这时 PN 结呈低电阻状态。

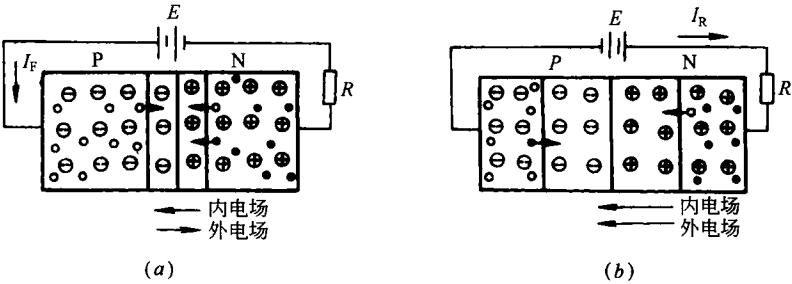


图 1-6 PN 结的单向导电性

若 PN 结外加反向电压(P 区的电位低于 N 区的电位)，称为反向偏置，简称反偏。如图 1-6(b) 所示。这时外加电场与内电场方向相同，使内电场增强，PN 结变厚，多数载流子运动难以进行，而 P 区的少数载流子自由电子和 N 区的少数载流子空穴在回路中形成极小的反向电流 I_R ，称 PN 结反向截止。这时 PN 结呈高阻状态。

由此可知，PN 结正向偏置时，呈导通状态；反向偏置时，呈截止状态。这就是 PN

结的单向导电性。另外在室温下，少数载流子形成的反向电流虽然很小，但它随温度的上升而明显增加，使用时要特别注意。

三、二极管的结构和类型

半导体二极管由一个 PN 结加上相应的引出端和管壳构成。它由两个电极，P 区引出线称二极管的正极(又称阳极)，由 N 区引出线称二极管的负极(又称阴极)。常见二极管的外形图和符号如图 1-7 所示。



图 1-7 二极管的结构和符号

二极管的种类很多，按结构分，常见的有点接触型和面接触型。点接触型二极管是用一根含杂质元素的金属丝压在半导体晶片上，经特殊工艺、方法处理而成，如图 1-8(a)所示。因其结面积小，允许通过的电流小，但结电容小，工作频率高，主要用在高频检波和开关电路；面接触型二极管的 PN 结是用合金或扩散法做成的，其结构如图 1-8(b)所示。由于面接触型二极管的 PN 结面积大，PN 结电容较大，一般适于较低的频率下工作，由于接触面积大，允许通过较大电流和具有较大功率容量，主要用于整流电路。按制造材料分，常用的有硅二极管和锗二极管，其中硅二极管的热稳定性比锗二极管好得多。按用途分，常用的有普通二极管、整流二极管、检波二极管、稳压二极管、光电二极管、开关二极管等等。

四、二极管的特性及参数

(一) 半导体二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指通过二极管的电流与其两端的电压之间的关系。如图 1-9 所示。下面对二极管的伏安特性分三部分来分析。

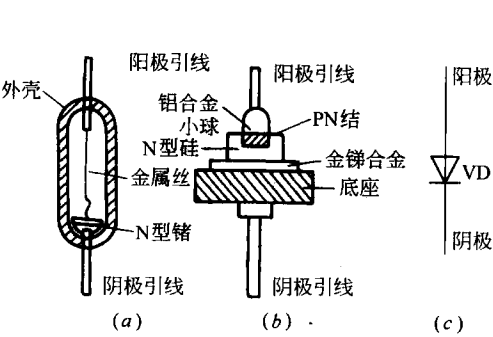


图 1-8 二极管的结构和符号

(a)点接触型；(b)面接触型；(c)符号

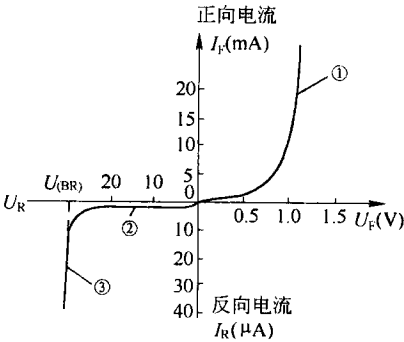


图 1-9 二极管的伏安特性

1. 正向特性

当二极管两端加正向电压时，便有正向电流通过。但当二极管承受电压很低时，还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子运动的阻挡作用，因此，这时正向电流 I_F 仍然很小，二极管呈现的电阻较大，称为死区。通常，硅材料二极管的死区电压约为 0.5V，锗材料

二极管的死区电压为 $0.2V$ 。

当外加电压超过一定电压数值 U_T 时，外电场大大抵消了内电场，二极管的电阻变得很小，正向电流 I_F 随外加电压的增加而显著增大，如图 1-9 第①段所示。当二极管完全导通后，正向压降基本维持不变，称为二极管的正向导通电压或门坎电压，一般硅管为 $0.7V$ ，锗管为 $0.3V$ 。

2. 反向特性

二极管加反向电压，即高电位接在二极管的阴极，低电位接在二极管的阳极。此时外电场与内电场方向一致，只有少数载流子的漂移运动，形成反向电流 I_R ，如图 1-9 第②段所示。反向电流 I_R 极小，一般硅管为几微安以下，锗管较大，几十到几百微安。这种特性称为反向截止特性。

3. 反向击穿特性

当外加反向电压增大到一定数值时，外加电场过强，可能破坏共价键而把价电子拉出，使电子的数目剧增；强电场也可能引起电子与原子碰撞，产生新的电子空穴对，而引起载流子的数目急剧上升。这都将使反向电流突然剧增，这种现象称二极管反向击穿，击穿时对应的电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。如图 1-9 第③段所示。普通二极管发生反向击穿后，将会因电流过大使管子过热而造成永久性损坏，这种现象叫做热击穿。

(二) 二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_{FM}

指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。使用二极管时，管子通过的电流应小于 I_{FM} ，否则管子容易过热而损坏。

2. 反向击穿电压 U_{BR}

指二极管反向击穿时，对应的外加电压称为反向击穿电压。一般手册上给出的最高反向电压约为击穿电压的一半，以确保管子安全运行。

3. 反向电流 I_R

指管子未击穿时的反向电流。其值愈小，管子的单向导电性越好。由于温度增加，反向电流会急剧增加，所以在使用二极管时要注意温度的影响。

4. 最高工作频率 f_M

指保持二极管单向导通性能时，外加电压的最高频率，二极管工作频率与 PN 结的极间电容大小有关，容量越小，工作频率越高。

五、二极管的应用举例

利用二极管的单向导电性及导通时正向压降很小的特点，可以应用于整流、检波、稳压、限位、开关以及元件保护等各项功能。

(一) 整流

整流是指将交流电变为单向脉冲的直流电。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，然后再经过电容的滤波及稳压，便可获得平稳的直流电。这些内容将在第五章(单相全波整流、单相桥式整流)详细阐述。下面着重分析单相半波整流的基本原理。

单相半波整流电路通常由降压电源变压器 T 、整流二极管 VD 和负载电阻 R_L 组成，如图 1-10 所示。为简化分析，将二极管视为理想二极管，即二极管正向导通时，作短路

处理；反向截止时，作开路处理。

设电源变压器二次绕组的交流电压为：

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$$

u_2 的波形如图 1-11(a) 所示。在 u_2 的正半周期间，变压器二次电压的瞬时极性是上端为正，下端为负。二极管 VD 因正向偏置而导通，电流自上而下流过负载电阻 R_L ，则 $u_{VD}=0$ ， $u_L=u_2$ 。在 u_2 的负半周，变压器二次电压的瞬时极性是上端为负，下端为正。二极管 VD 因反向偏置而截止，没有电流通过负载电阻 R_L ，则 $u_L=0$ ，而 u_2 全部加在二极管 VD 两端，有 $u_{VD}=u_2$ 。负载上的电压和电流的波形如图 1-11(b)、(c) 所示。可见，利用二极管的单向导电性，将变压器二次绕组的正弦交流电变换成了负载两端的单向脉动的直流电，达到了整流的目的是。这种电路在交流电的半个周期才有电流通过负载，故称为半波整流电路。

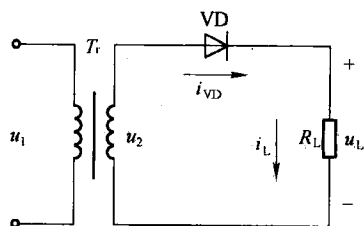


图 1-10 单相半波整流电路

(二) 稳压

稳压又称钳位，它是利用二极管的反向击穿电压原理。当反向电流有很大的变化时，只引起微小的电压变化。如图 1-12 所示。特性曲线愈陡，稳压性能愈好。由此可见，稳压管是工作在反向击穿区。

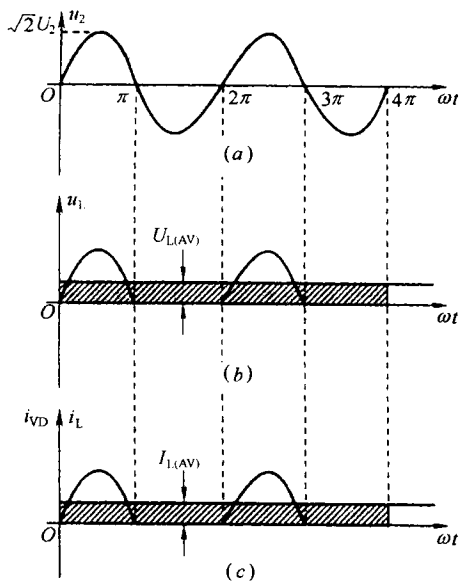


图 1-11 半波整流波形图

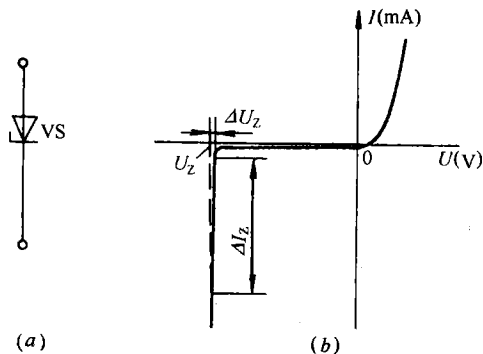


图 1-12 稳压管的符号及伏安特性

(a) 符号；(b) 伏安特性

稳压管的主要参数有：

- (1) 稳定电压 U_Z ：它是表示稳压管在规定电流值下正常工作时，其两端的电压值；
- (2) 稳定电流 I_Z ：它等于稳压管在正常工作时的参考电流值；
- (3) 温度系数 k ：它表示温度升高 1°C 时稳压值的相对变化量，即表示管子温度稳定性的参数；

(4) 动态电阻 r_z ：它是稳压管两端电压变化量与电流变化量的比值，其数值随工作电流的不同而改变。 r_z 愈小，表明稳压作用愈好；

(5) 最大允许耗散功率 P_{ZM} ：它等于稳定电压 U_Z 和最大允许电流 I_{ZM} 的乘积。

图 1-13 是常用的稳压电路。图中 R 是限流电阻，它一方面起限流作用，保证在负载开路时流过二极管的电流不超过 I_{ZM} ；另一方面，在输入电压 u_i 或负载变化时，它起到调整作用，保证输出电压 u_o 稳定。为了保证电路能正常工作， u_i 必须使稳压管工作在反向击穿区，并且适当选择 R 的阻值，使稳压管中的电流在 I_Z 和最大允许电流 I_{ZM} 之间。

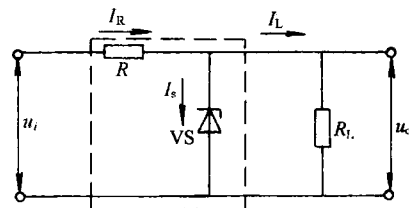


图 1-13 稳压电路

(三) 限位

利用二极管正向导通后其两端电压很小且基本保持不变的特性，可以构成限位电路，使输出电压保持在某一电压范围内。

六、特殊用途的二极管

(一) 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管，是一种将光信号转换成电信号的特殊二极管。它的反向电流随光照强度的增加而上升，通常在管壳有一个玻璃窗口以接受光照。其外形和符号如图 1-14 所示。

光电二极管工作在反向偏置状态。当管壳上的玻璃窗口无光照时，反向电流很小，称为暗电流；有光照时反向电流很大，称为亮电流，且光照越强，亮电流越大。如果在外电路上接上负载，便可获得随光照强弱而变化的电信号。例如图 1-15 是光电二极管的基本应用电路，无光照时，负载 R_L 上无电压；有光照时，亮电流在 R_L 上转换为电压输出，从而实现光电转换。

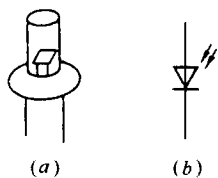


图 1-14 光电二极管的
外形及符号
(a) 外形；(b) 符号

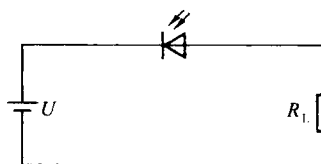


图 1-15 光电二极管的
基本应用电路

光电二极管使用时应注意：

- (1) 保证光电二极管的反偏电压不小于 5V，否则光电流和光强度不呈线性关系；
- (2) 保持光电二极管的管壳清洁，否则光电灵敏度会下降。

光电二极管主要在光电控制系统中作传感元件，应用也十分广泛。

(二) 发光二极管

发光二极管是一种将电能转换成光能的元器件，简写成 LED (Light Emitting Diode)。通常用元素周期表中 III、V 族元素的化合物，如砷化镓、磷化镓等制成。发光二极管和普通二极管相似，也是由一个 PN 结构成，发光二极管正向导通时，由于空穴和电子的直接

复合而放出能量，发出一定波长的可见光，由于光的波长不同，颜色也不相同。常见的发光二极管有红、绿、黄等颜色。图 1-16 发光二极管的外形和符号。

发光二极管正向偏置并达到一定电流时就会发光。通常工作电流 10~30mA 时，正向压降 2~3V。发光二极管的发光颜色有红色、绿色、黄色等。通常管脚引线较长的为正极，较短的为负极。当管壳上有凸起的标志时，靠近标志的管脚为正极。

使用发光二极管时也要串入限流电阻，避免流过的电流太大。改变电流的大小还可以改变发光的亮度。图 1-17(a)是常用的直流驱动电路。限流电阻 R 可按下式计算：

$$R = \frac{U - U_F}{I_F} \tag{1-1}$$

式中 U_F 为 LED 的正向电压，约为 2V； I_F 为正向工作电流，可从产品手册中查得。用交流电源驱动时，如图 1-17(b)所示。此时，在计算限流电阻 R 时仍用上式，不过上式中的 U 是交流电压的有效值，二极管 VD 可避免 LED 承受高的反向电压。

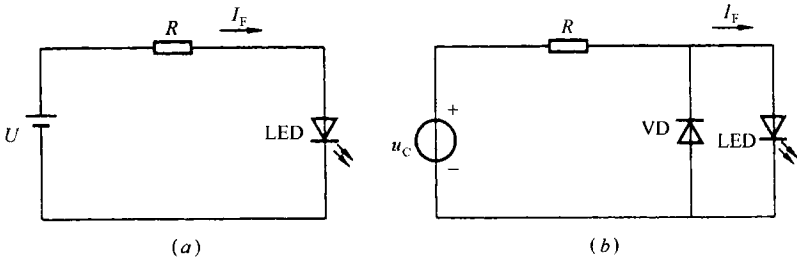


图 1-17 LED 的驱动电路
(a)直流驱动；(b)交流驱动

发光二极管除可单个使用外，也常作成七段式或矩阵式，工作电流一般为几个毫安或几十毫安之间。几种常见的发光材料的主要参数如表 1-1 所示。LED 的反向击穿电压一般大于 5V，但为使器件长时间稳定而又可靠地工作，安全使用电压选择在 5V 以下。

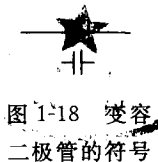
发光二极管的主要参数					表 1-1
颜 色	波 长 (nm)	基 本 材 料	正向电压 (10mA)(V)	光强(10mA 时， 张角±45°)(cd)	光 功 率 (μW)
红 外	900	砷化镓(GaAs)	1.3~1.5		100~500
红	655	磷砷化镓(GaAsP)	1.6~1.8	0.4~1	1~2
鲜 红	635	磷砷化镓(GaAsP)	2.0~2.2	2~4	5~10
黄	583	磷砷化镓(GaAsP)	2.0~2.2	1~3	3~8
绿	565	磷化镓(GaP)	2.2~2.4	0.5~3	1.5~8

(三) 变容二极管

变容二极管是利用 PN 结的电容效应工作的，即空间电荷区内没有载流子，起着绝缘

介质的作用，PN 结类似一个平板电容器。它的电容量一般为几十到几百皮法，且随反偏电压(0~30V)的升高而减小(约 15 倍)。因此变容二极管是工作在反向偏置状态，其符号如图 1-18 所示。

变容二极管的常见用途是作为调谐电容使用，例如在电视机的频道选择器中，利用它来微调选择电台的频道。



第二节 半导体三极管

半导体三极管又称双极型三极管或晶体三极管，简称三极管。它在电子电路中既可用于放大元件，又可用作开关元件，应用非常广泛。本节主要介绍三极管的工作原理、特性曲线和主要参数。

一、三极管的结构和类型

(一) 三极管的结构

三极管又称晶体管，它的种类很多。从其内部结构来看，分为 NPN 型和 PNP 型两种三极管。其中 NPN 型多为硅管，而 PNP 型多为锗管。

三极管是由两个 PN 结的三块杂质半导体组成，不管是 NPN 型还是 PNP 型，都有三个区组成：集电区、发射区、基区，以及分别从这三个区引出的三个电极：集电极 C、发射极 E、基极 B。两个 PN 结分别是发射区与基区之间的发射结和集电区与基区之间的集电结。在电路中，两种管子的内部结构和符号如图 1-19 所示。图中箭头表示发射结在加正向电压时的电流方向。

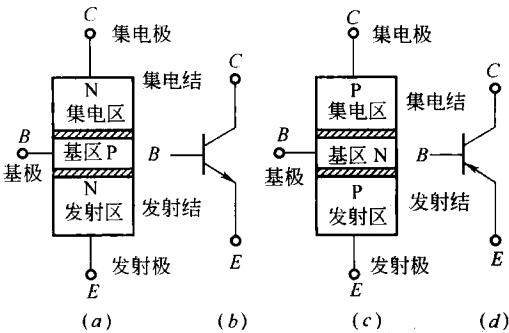


图 1-19 三极管的结构和符号
(a)NPN 型三极管；(b)NPN 管符号；
(c)PNP 型三极管；(d)PNP 管符号

为了保证三极管具有电流放大功能，三极管在制造工艺上有如下特点：

- (1) 基区做得很薄(一般仅有 1 微米至几十微米厚)掺杂浓度很低，所以基区多数载流子的浓度很低。
- (2) 发射区比集电区掺的杂质多，因此发射区的多数载流子浓度比集电区高。故三极管的集电极和发射极不能互换使用。另外，集电结截面积大于发射结的截面积。常见三极管的外形如图 1-20 所示。

(二) 三极管的类型

三极管根据基片材料的不同，分为锗管和硅管两大类，目前国内生产的硅管多为 NPN 型(3D 系列)，锗管多为 PNP 型(3A 系列)；从频率特性分为高频管和低频管；从功率大小分为大功率管、中功率管和小功率管等。实际应用中采用 NPN 型的三极管较多，所以下面以 NPN 型三极管为例加以讨论，所得结论对于 PNP 型三极管同样适用。

二、三极管的电流分配及放大作用

NPN 型和 PNP 型三极管虽然结构不同，但工作原理是相似的。下面以 NPN 型管为例来介绍三极管的电流放大原理。

(一) 三极管内部载流子的运动过程

要实现三极管的放大作用，需要外加合适的电源电压。要求发射结外加正向电压，简称正向偏置；集电结外加反向电压，简称反向偏置。如图 1-21 所示。图中 E_B 为基极外接电源，它保证发射结正向偏置； E_C 为集电极外接电源，并且 $E_C > E_B$ ，以满足发射结反向偏置的要求； R_B 和 R_C 分别为基极回路和集电极回路的串接电阻。

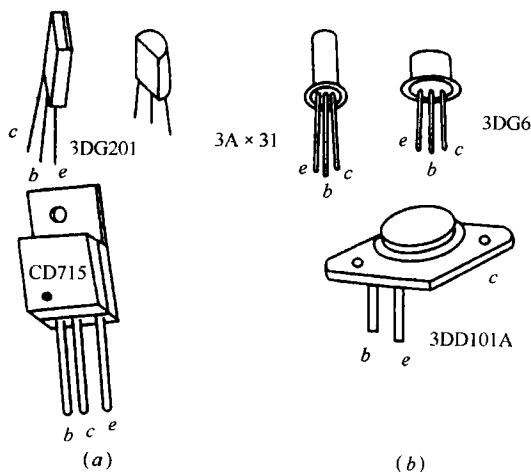


图 1-20 常见三极管外形图

(a) 塑封装；(b) 金属壳管

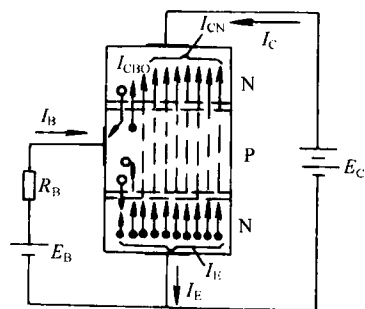


图 1-21 三极管内部载流子的运动

1. 发射区向基区发射电子

由于电源 E_B 经过电阻 R_B 加在发射结上，发射结正偏。发射区的多数载流子——自由电子不断通过发射结向基区扩散，形成发射极电流 I_E 。同时基区多数载流子空穴也向发射区扩散，但由于基区的多数载流子浓度远远低于发射区载流子浓度，故与电子流相比，空穴流可以忽略不计。因此可以认为三极管发射结电流主要是电子流。

2. 电子在基区中的扩散和复合

由发射区注入基区的电子，在发射结附近积累起来，形成了一定的浓度梯度，而靠近集电结附近电子浓度很小，渐渐形成电子浓度差，在浓度差的作用下，促使电子流在基区向集电结扩散，在扩散过程中，电子不断与基区空穴复合形成电子流 I_{BN} ，复合的空穴由基极电源补充，而形成基极电流 I_B 。所以基极电流就是电子在基区与空穴复合的电流。由于基区空穴浓度很低，且基区做得很薄，使电子在基区和空穴复合的数量很少，绝大多数都扩散到集电结附近，所以形成的基极电流 I_B 很小。

3. 集电区收集电子

由于集电结外加反向电压很大，这个反向电压产生的电场力一方面使集电区的电子和基区的空穴很难通过集电结；另一方面吸引基区中扩散到集电结附近的大量电子，将它们收集到集电区，形成收集电流 I_{CN} 。同时集电区的少数载流子即空穴也会产生漂移运动，流向基区形成反向饱和电流 I_{CBO} 。

由此可见，集电结电流 I_C 由两部分电流 I_{CN} 和 I_{CBO} 组成，而 I_{CBO} 的数值很小，但对温度却非常敏感，使管子工作不稳定，所以在制造过程中应尽量设法减小 I_{CBO} 。

以上分析的是 NPN 型三极管的电流放大原理，对于 PNP 型三极管，其工作原理相

同，只是三极管各极所接电源极性相反，发射区发射的载流子是空穴而不是电子。

(二) 电流分配关系

由上面载流子的运动过程可知，由于电子在基区的复合，发射区注入基区的电子并非全部到达集电极，三极管制成后，发射区注入的电子传输到集电结所占的比例是一定的。图 1-22 描述了三极管电流分配关系。从图中可知：

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} \tag{1-2}$$

由于在常温下 I_{CBO} 的数值很小，可忽略不计。故

$$I_C \approx I_{CN} \quad I_B \approx I_{BN}$$

又因为

$$I_E = I_{CN} + I_{BN}$$

所以

$$I_E = I_C + I_B$$

设

$$I_C = \beta I_B \tag{1-3}$$

故

$$I_E = \beta I_B + I_B = (1 + \beta) I_B \tag{1-4}$$

上式中 I_C 与 I_B 的比值，表示共射极直流电流放大系数，用 β 表示，当电流的变化量很小时，可近似认为 $\beta \approx \bar{\beta}$ 。

(三) 放大作用

三极管的最基本的作用是把微弱的电信号加以放大，三极管的放大电路如图 1-23 所示。因发射极是基极回路和集电极回路的公共端，所以此电路又叫共射极放大电路。如果 $I_B = 20\mu A$ ， $I_C = 1.2mA$ ，则 $I_E = I_B + I_C = (0.02 + 1.2)mA = 1.22mA$ ，电流放大倍数 $\beta = I_C / I_B = 60$ 。若调节电阻 R_B ，使电流 I_B 增加 $10\mu A$ ，则 I_C 相应地增加了 $\Delta I_C = 0.01 \times 60mA = 0.6mA$ 。由此可见，当基极有微小的变化时，集电极会有很大的变化，这说明三极管有电流放大作用。

三、三极管的特性曲线及主要参数

(一) 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是指三极管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。由于三极管有三个电极，输入、输出各占一个电极，一个公共电极，因此要用两种特性曲线来描述，即输入特性曲线和输出特性曲线。图 1-24 是三极管共射极特性曲线测试电路。

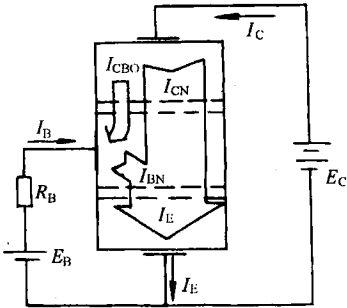


图 1-22 三极管的电流分配关系

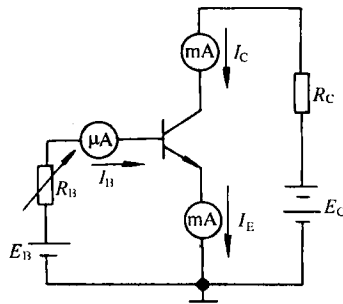


图 1-23 三极管共射极放大电路

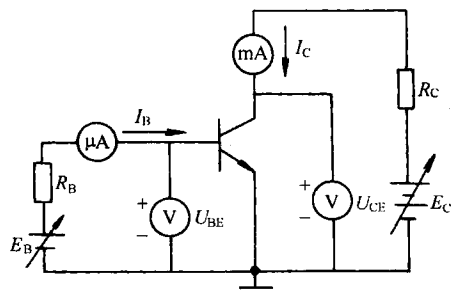


图 1-24 三极管共射特性曲线测试电路