

主编◎单丽清 张晓娟

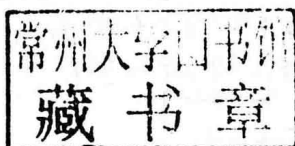
电子线路分析

DIANZI XIANLU FENXI

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

电子线路分析

主 编 单丽清 张晓娟
副主编 王佰红 刘 爽 苗 莹
参 编 徐皎瑾 钱海月 滕文龙



 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书在编写过程中根据教育部制定的相关专业节能人才培养要求及目标进行内容的精简与整合,注重学生应用能力和基本技能的培养,以适应职业技能型人才培养的需要。

全书一共9章,分上、下两篇。上篇模拟电子线路分析,内容包括半导体元件的认识和使用、直流稳压电源、基本放大电路的认识与分析、集成运算放大器的学习与应用、功率放大器及其应用;下篇数字电子线路的分析与实践,内容包括基本逻辑关系与门电路、逻辑函数与组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路及模拟量和数字量的转换。本书各章后配有理论学习成果检测及实践技能训练。

本书可作为高等院校电气自动化、机电类及电子类相关专业教材,也可供相关工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电子线路分析/单丽清,张晓娟主编. —北京:北京理工大学出版社,2017.12

ISBN 978-7-5682-5110-5

I. ①电… II. ①单…②张… III. ①电子电路-电路分析 IV. ①TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第328209号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市天利华印刷装订有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 14.5

字 数 / 345千字

版 次 / 2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷

定 价 / 61.00元

责任编辑 / 张鑫星

文案编辑 / 张鑫星

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 施胜娟

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

Preface

本书内容以电子技术理论知识为依托，以电子线路的分析与制作为学习目标，并结合高等教育培养技术应用型人才的培养目标，将理论知识与实践技能训练相结合，在完成理论基础的学习后进行实践技能训练环节来辅助理论知识的理解与巩固、提高学生的实践操作能力和工程意识。使用者还可以从实践技能训练环节入手，先行引入电子线路相关作品，实现以任务驱动教学，增加学生的学习兴趣 and 动力。

本书内容兼顾了经典电子技术理论与最新的现代电子技术，结合教学实际情况，在内容设置上侧重基本概念、基本分析方法和基本应用。为突出高等教育的特色，着重培养学生的职业素质和创新能力，在准确、易懂、实用的前提下对电子技术理论内容进行删减，把职业岗位所必需的知识、技能作为学习重点，充分利用有限的学习时间，全面提升学生的兴趣和能力。全书共包含9章，每章从提出“教学目的”开始，包含“知识目标”“能力目标”和“素质目标”三部分。“知识目标”是对理论基础部分内容的梳理，帮助学生各个模块内容有概括性印象，并明确学习过程中的重点内容，并设有理论学习成果检测环节，帮助学生巩固理论基础部分的学习成果；“能力目标”是对实践技能训练环节的具体要求，使学生在进行实践环节时有明确提升方向；而“素质目标”是对学生在学习过程中进行个人素养提升的指导性建议。

本书由单丽清、张晓娟教授担任主编，其中模拟电子部分第1章、第2章和第3章由张晓娟编写，模拟电子部分第4章、第5章由单丽清编写，实践技能训练环节由王佰红编写，数字电子部分第9章由刘爽编写，模拟电子部分第6章、第7章由徐皎瑾编写，数字电子部分第8章由钱海月编写，全书图形及公式处理工作由苗莹和滕文龙担任，全书由单丽清统稿。

由于时间仓促及编者水平有限，书中难免存在错误与疏漏之处，希望读者批评指正。

编者

目 录

Contents

上篇 模拟电子线路分析

▶ 第 1 章 半导体元件的认识和使用	3
1.1 半导体的基础知识	4
1.2 半导体二极管	6
1.3 双极型晶体管	9
1.4 场效应晶体管	16
▶ 第 2 章 直流稳压电源	24
2.1 整流电路	25
2.2 滤波电路	28
2.3 稳压电路	31
2.4 三端集成稳压器	34
▶ 第 3 章 基本放大电路的认识与分析	39
3.1 基本放大电路概述	40
3.2 放大电路的分析方法	44
3.3 其他常见的基本放大电路	54
3.4 放大电路的频率特性	57
3.5 多级放大电路	60
3.6 放大电路的负反馈	63
▶ 第 4 章 集成运算放大器的学习与应用	75
4.1 差分放大电路	76
4.2 集成运算放大器概述	80
4.3 运算放大器在信号运算方面的应用	84
4.4 运算放大器在信号处理方面的应用	89
▶ 第 5 章 功率放大器及其应用	98
5.1 功率放大器	99

5.2 功率放大器的应用 102

下篇 数字电子线路的分析与实践

► 第6章 基本逻辑关系与门电路 111

6.1 数字电路概述 112
 6.2 数制与码制 113
 6.3 基本逻辑关系 117
 6.4 门电路 121

► 第7章 逻辑函数与组合逻辑电路 139

7.1 逻辑函数及其基本运算 140
 7.2 逻辑函数的化简 142
 7.3 组合逻辑电路的分析与设计 148
 7.4 加法器 151
 7.5 编码器和译码器 153

► 第8章 触发器和时序逻辑电路 169

8.1 触发器 170
 8.2 时序逻辑电路的分析 177
 8.3 寄存器 182
 8.4 计数器 185
 8.5 石英晶体多谐振荡器 195
 8.6 单稳态触发器 196
 8.7 施密特触发器 197
 8.8 555 定时器及其应用 200

► 第9章 模拟量和数字量的转换 208

9.1 D/A 转换器 209
 9.2 A/D 转换器 216

► 参考文献 225

上篇 模拟电子线路分析

电子电路按其处理信号的不同通常可分为模拟电子电路及数字电子电路两大类，简称模拟电路及数字电路。模拟电子电路是指处理模拟信号（即连续信号）的电路，例如温度、压力等实际的物理信号、模拟语音的音频电信号等，研究的主要问题是怎样不失真的放大模拟信号；而数字电子电路是指处理数字信号（即离散信号）的电路，例如刻度尺的读数、数字显示仪表的显示值等，研究的主要问题是电路的输入和输出状态之间的逻辑关系。本篇主要介绍模拟电子线路的主要元器件及其结构、功能、特性等相关知识，以及对各种典型元器件组成电路的计算、分析与应用。

第 1 章

半导体元件的认识和使用

半导体元件是电子线路的核心元件，是组成各种电子电路最基本的单元。PN 结则是构成各种半导体器件的共同基础。二极管、晶体管是电子电路的组成基础，是电子电路中最基本的半导体元件。本次任务将在学习 PN 结导电特性的基础上，学习二极管的特性并完成相应电路的连接制作。

知识目标

熟悉半导体及 PN 结的特性；掌握二极管的结构符号及分类；熟悉二极管的伏安特性及主要参数；掌握二极管电路的分析方法；掌握特殊二极管的应用方法；掌握晶体管的结构、工作原理；掌握晶体管的特性曲线及主要参数；熟悉晶体管放大、饱和、截止三种工作状态的条件和工作在这三种状态的特点。

能力目标

学会使用晶体管手册选用二极管的方法；掌握常用二极管的识别与测试方法；能够对晶体管简单应用电路进行分析；能够判断晶体管的工作状态；能够对晶体管进行识别和检测；会通过计算确定晶体管的静态工作点。

素质目标

训练学生的工程意识、良好的劳动纪律观念和自学能力；培养学生良好的语言表达能力、客观评价能力、劳动组织和团体协作能力以及自我学习和管理的素养。

1.1 半导体的基础知识

自然界中的物质，按其导电能力可分为导体、半导体和绝缘体三大类。易于导电的物质如金、银、铜、铝等金属材料称为导体；很难导电的物质如塑料、橡胶等称为绝缘体。导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体，现代电子技术中常用的半导体材料主要有硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）及其他金属氧化物和硫化物。

半导体在不同条件下的导电性能有如下显著特性：

(1) 热敏特性，某些半导体电阻率随温度的升高而显著降低，利用这种特性可以制作各种热敏元件。

(2) 光敏特性，某些半导体在受到光照时导电能力很强，而无光照时导电能力像绝缘体一样弱，利用这种特性可以制作各种光敏元件。

(3) 掺杂特性，在纯净半导体材料中掺入微量杂质，其导电能力会显著增加。掺杂特性是半导体最显著的特性，利用这一特性可制作二极管、晶体管、场效应晶体管等半导体元件。

1.1.1 本征半导体与杂质半导体

半导体一般分为本征半导体和杂质半导体两种类型。

1. 本征半导体

目前，最常用的半导体材料为硅和锗。高纯度的硅和锗都是单晶结构，原子排列整齐且原子间保持相等的小距离。这种纯净、不含任何杂质、结构完整的半导体材料称为本征半导体。

硅和锗的原子结构示意图分别如图 1.1 (a)、(b) 所示，它们最外层都具有四个价电子，这些价电子不仅受到自身原子核的束缚，而且受周围相邻原子核的束缚，两个相邻原子之间共有 1 对价电子组成共价键，如图 1.2 所示。

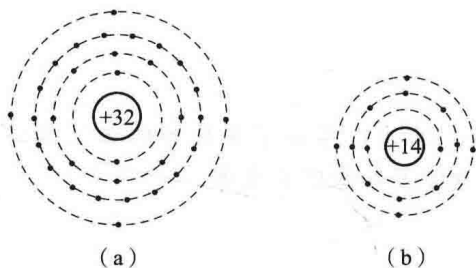


图 1.1 硅和锗的原子结构示意图

(a) 硅原子；(b) 锗原子

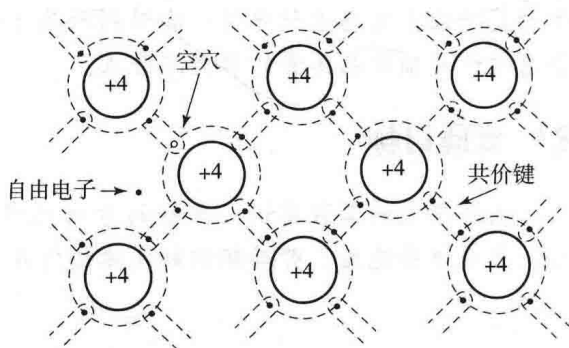


图 1.2 本征半导体中的自由电子和空穴

当共价键中的电子受激发获得足够的能量，就会挣脱共价键的束缚而成为自由电子，而这个电子原来所在的共价键的位置上就留下一个缺少负电荷的空位，称为空穴。由于温度的影响而产生电子—空穴对的现象称为本征激发。由于共价键出现了空穴，邻近价电子就可填补这个空位而形成新的空穴，使共价键中出现一定的电荷迁移。但本征半导体靠热激发的电子—空穴对很少，所以导电能力很弱。

2. 杂质半导体

本征半导体的实用价值不大，但若在本征半导体中掺入微量的杂质元素，其导电性能将发生明显变化。

1) N型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素，如磷、锑、砷等可形成N型半导体。杂质原子中只有4个价电子形成共价键，而多余的1个价电子很容易受激发成为自由电子，如图1.3所示。N型半导体中，由杂质原子提供的自由电子为多数载流子，而空穴是少数载流子。

2) P型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素，如硼、铟等可形成P型半导体。杂质原子最外层只有3个电子，在与相邻的原子组成共价键后留下一个空穴，如图1.4所示。P型半导体中空穴为多数载流子，而自由电子是少数载流子。

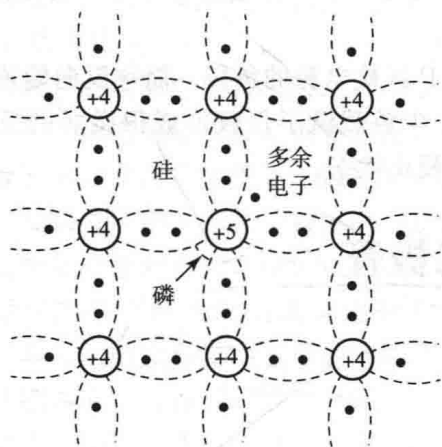


图 1.3 N型半导体

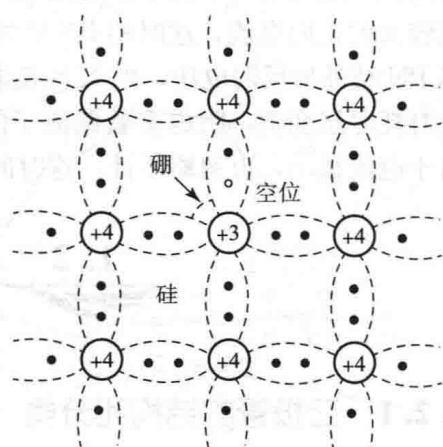


图 1.4 P型半导体

注意，无论是N型半导体还是P型半导体，虽然都有一种载流子占多数，但整个晶体仍然是电中性。

1.1.2 PN结的形成与特性

1. PN结的形成

用适当的工艺将P型半导体和N型半导体结合在同一基片上时，由于交界面处存在载流子浓度的差异，它们会发生扩散运动，使原来的P区和N区的电中性被破坏。N区中的电子要向P区扩散而留下不能移动的正离子，P区中的空穴要向N区扩散而留下不能移动的负离子，这些不能移动的带电粒子通常称为空间电荷，它们集中在P区和N区交界面附

近, 形成一个很薄的空间电荷区 (耗尽层), 即为 PN 结, 如图 1.5 所示。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

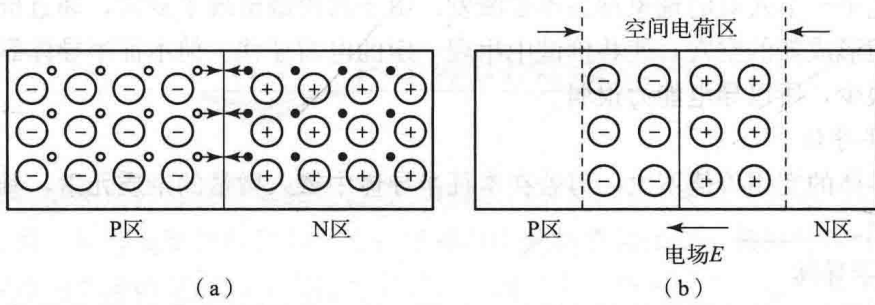


图 1.5 PN 结的形成
(a) 载流子的扩散运动; (b) 内电场的形成

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端加不同方向的电压, 可以破坏它原来的平衡, 从而使它呈现出单向导电性。若外加电压使电流从 P 区流到 N 区, PN 结将呈低阻性, 电流很大; 反之, PN 结呈高阻性, 电流很小。

当 PN 结外加正向电压, 即 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极, 简称正向偏置或正偏, 此时耗尽层变窄, 有利于扩散运动的进行。多数载流子在外加电压的作用下将越过 PN 结形成较大的正向电流, 这时的 PN 结处于导通状态。

当 PN 结外加反向电压, 即 N 区接电源的正极, P 区接电源的负极, 简称反向偏置或反偏, 此时耗尽层变宽, 阻碍多数载流子的扩散运动。少数载流子仅仅形成很微弱的反向电流, 由于电流很小, 可忽略不计, 这时的 PN 结处于截止状态。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和分类

半导体二极管是由一个 PN 结加上电极引线, 并加以外壳封装做成的。从 P 区接出的引线称为二极管的阳极或正极, 从 N 区接出的引线称为二极管的阴极或负极, 其内部结构示意图及电路符号如图 1.6 所示, 图 1.6 (b) 中三角箭头表示二极管正向导通时电流的方向。

二极管按所用材料不同可分为硅管和锗管, 按制造工艺不同可分为点接触型和面接触型, 其外部结构如图 1.7 所示。点接触型二极管由于金属细丝与 N 型半导体接触面很小, 允许通过的电流也很小 (几十毫安以下), 适用于高频检波、变频等场合; 而面接触型二极管 PN 结面积大, 允许通过的电流也较大, 适用于整流等工频较低场合。



图 1.6 二极管的结构和符号
(a) 结构示意图; (b) 电路符号

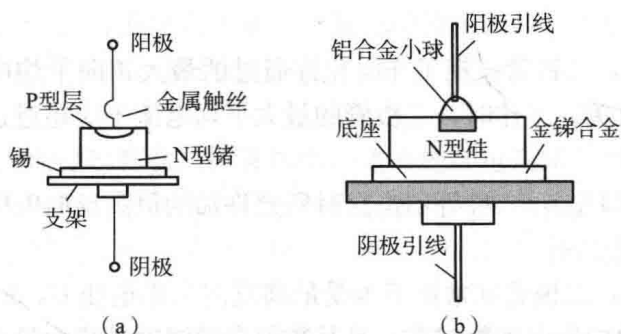


图 1.7 二极管的分类
(a) 点接触型; (b) 面接触型

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指二极管两端的电压与流过二极管电流的关系曲线, 如图 1.8 所示。

1. 正向特性

当二极管处于正向偏置但电压低于某一数值时, 正向电流很小, 这个区域称为死区, 硅管死区电压为 0.5 V, 锗管死区电压为 0.1 V。只有当正向电压高于某一值时, 二极管才有明显的正向电流, 这个电压被称为导通电压。在室温下, 硅管的导通电压约为 0.7 V, 锗管的导通电压约为 0.2 V, 一般认为当正向电压大于导通电压时, 二极管才导通, 否则截止。

2. 反向特性

二极管的反向电压很小时, 反向电流很小且变化不大, 称为反向漏电或反向饱和电流, 如图 1.8 中第三象限所示, 此时二极管处于截止状态。

当反向电压增大到某一数值时, 反向电流随反向电压的增加而急剧增大, 这种现象叫作反向击穿, 发生击穿时的电压称为反向击穿电压 U_{BR} 。反向击穿后, 只要反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结允许的耗散功率, 二极管一般不会损坏, 且当反向电压下降到击穿电压以下后, 其性能可恢复到原有情况, 这种可逆击穿称为电击穿; 若反向击穿电流过高, 则会导致 PN 结结温过高而烧坏, 这种不可逆击穿称为热击穿。普通二极管不允许反向击穿现象的发生。

3. 温度对伏安特性的影响

半导体二极管的导电特性与温度有关, 通常温度每升高 1 °C, 硅和锗二极管导通时的正向压降将减小 2.5 mV 左右。从反向特性看, 硅二极管温度每增加 8 °C, 反向电流大约增加一倍; 锗二极管温度每增加 12 °C, 反向电流大约增加一倍。

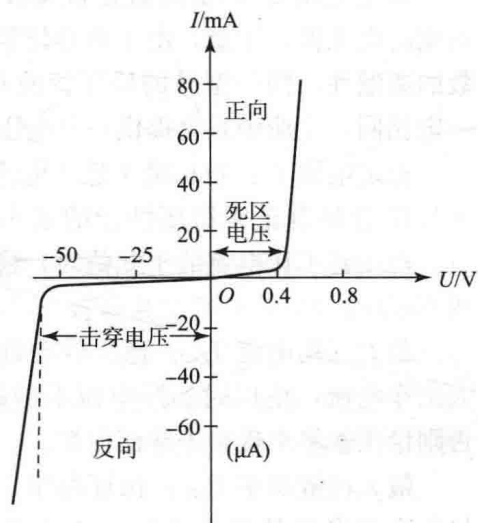


图 1.8 二极管的伏安特性曲线

1.2.3 二极管的主要参数

二极管的参数是反映二极管性能质量的指标, 在选用二极管时, 必须根据二极管参数合

理使用二极管。

最大整流电流 I_{FM} ：二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流，它与 PN 结的材料、面积及散热条件有关。工作时，二极管的最大平均电流不应超过这个数值，否则二极管会因过热而损坏。

最高反向工作电压 U_{RM} ：二极管不击穿时所允许加的最高反向电压，其值通常取二极管反向击穿电压的 $1/2$ 或 $2/3$ 。

最大反向电流 I_{RM} ：二极管在常温下承受最高反向工作电压 U_{RM} 时的反向电流。反向电流越大，说明管子的单向导电性能越差，且其数值会随温度升高而显著增大。

二极管的参数很多，其他参数如最高工作频率、最大整流电压下的管压降、结电容等，可在使用时查阅手册。

1.2.4 特殊二极管

1. 稳压二极管

稳压二极管又称齐纳二极管，是由硅材料制造的面接触型硅二极管，通常工作在反向击穿状态。它是利用 PN 结反向击穿时电压基本上不随电流的变化而变化的特点来达到稳压的目的，其电路符号及伏安特性曲线如图 1.9 所示。

描述稳压二极管特性的参数主要有以下几个。

稳定电压 U_Z ：稳压管正常工作时其管子两端的电压值。注意，由于半导体器件性能参数的离散性，同一型号的稳压管的 U_Z 值也不一定相同，手册中只会提供一个电压范围。

稳定电流 I_Z ：也称最小稳压电流，是指保证稳压管具有正常稳压性能的最小工作电流值。稳压管工作电流低于此值时，稳压效果差或不稳压。

最大工作电流 I_{ZM} ：稳压管允许流过的最大工作电流，使用时实际电流不得超过此值，否则稳压管将出现热击穿而损坏。

最大耗散功率 P_{ZM} ：保证稳压二极管不被热击穿所允许的最大功耗。 $P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$ 是由管子的最高结温决定的。

动态电阻 r_z ：稳压二极管在稳压范围内，管子两端电压变化量与对应电流变化量之比，即 $r_z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ 。其值一般为几欧到几十欧，其值越小，说明稳压性能越好。

电压温度系数 α_U ：当稳压管中流过的电流为 I_Z 时，环境温度每增加 1°C ，稳压值的相对变化量。它表示温度变化对稳定电压的影响程度。可见，其值越小，说明稳压二极管性能越好。

2. 发光二极管

发光二极管是一种将电能直接转化成光能的固体器件，简称 LED，其电路符号如图 1.10 所示。发光二极管与普通二极管相似，也是由一个 PN 结组成，具有单向导电性。

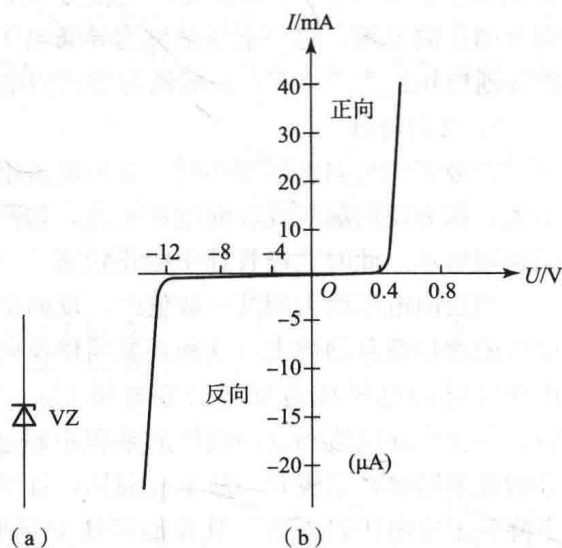


图 1.9 稳压二极管的电路符号及伏安特性曲线
(a) 电路符号；(b) 伏安特性曲线

当发光二极管接正向电压时，由于空穴和电子的复合而放出能量，发出一定波长的可见光，光的波长不同，颜色也不同，常见的有红、绿、黄等颜色。



图 1.10 发光二极管的电路符号

发光二极管的伏安特性也与普通二极管相似，当所施加电压未达到开启电压时，正向电流几乎为零；但电压一旦超过开启电压时，电流急剧上升。发光二极管的开启电压通常称为正向电压，它取决于制作材料的禁带宽度。

由于发光二极管的驱动电压低、工作电流小，且具有很强的抗振动和抗冲击能力、体积小、可靠性高、耗电量低和寿命长等特点而得到广泛应用。它可用作数字电路的数码及图形显示的七段式或阵列式器件；还可用作电子设备的通断指示灯或快速光源以及光电耦合器中的发光器件等。发光二极管的供电电源既可以是直流，也可以是交流，其工作电流一般为几毫安至几十毫安，应用中只要保证其正向工作电流在所规定的范围之内就可以正常发光。

3. 光电二极管

光电二极管与普通二极管一样，管芯由 PN 结构成，具有单相导电性。光电二极管的管壳上有一个能射入光线的“窗口”，这个“窗口”用有机玻璃进行封闭，入射光通过透镜正好射在管芯上。

光电二极管工作在反向偏置状态，当 PN 结上加反向电压时，用光照射 PN 结，就能形成反向的光电流，光电流的大小与光强度成正比。光电二极管用途很广，一般常用作传感器的光敏元件，或将光电二极管做成二极管阵列，用于光电编码，或用在光电输入机上作光电读出器件。

1.3 双极型晶体管

晶体管是最重要的一种半导体器件，利用它的电流放大作用可以组成各式各样的放大电路，利用它的开关作用可以组成各种门电路。根据结构不同，可将晶体管分为双极型和单极型两种。双极型半导体晶体管（简称 BJT）又称为晶体管，因为它有空穴和自由电子两种载流子参与导电，因此称为双极型晶体管；单极型半导体晶体管又称为场效应晶体管（简称 FET），是一种利用电场效应控制输出电流的半导体晶体管，它工作时只有一种载流子（多数载流子）参与导电，故称为单极型晶体管。

晶体管是由两个 PN 结、三个电极组成的。这两个结靠得很近，工作时相互联系、相互影响，表现出两个单独的 PN 结完全不同的特性，与二极管相比，其功能发生了质的变化，因此在电子线路中得到了广泛的应用。

1.3.1 晶体管的结构和分类

晶体管由形成两个 PN 结的三块杂质半导体组成，根据结构的不同，晶体管有 NPN 和 PNP 两种类型，其结构和电路符号如图 1.11 所示。

无论是 NPN 型还是 PNP 型晶体管，它们均包含三个区：发射区、基区、集电区；同时相应地引出三个电极：发射极、基极、集电极。同时又在两交界区形成 PN 结，分别是发射

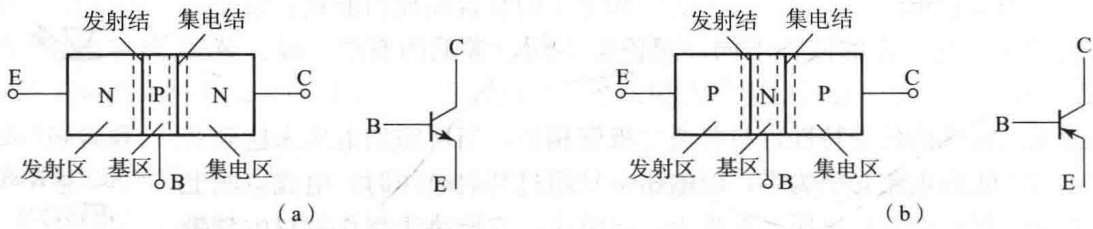


图 1.11 晶体管的结构及电路符号

(a) NPN 型半导体的结构及电路符号；(b) PNP 型半导体的结构及电路符号

结和集电结。晶体管发射区的掺杂浓度最高；集电区掺杂浓度低于发射区，且面积大；基区很薄，一般为几微米至几十微米，且掺杂浓度最低。

需要说明的是，PNP 型与 NPN 型晶体管的基本工作原理类似，只是使用时电源极性连接不同，各极电流方向不同，呈现在表示符号中的区别是发射结的箭头方向不同，它表示发射结加正向偏置时的电流方向。使用中需注意电源的极性，确保发射结加正向偏置电压，晶体管才能正常工作。

晶体管根据基片材料的不同，可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）；根据频率特性不同，可分为高频管和低频管；根据功率大小不同，分为大功率管、中功率管和小功率管等。

实际应用中采用 NPN 型晶体管较多，所以下面以 NPN 型晶体管为例加以讨论，所得结论同样适用于 PNP 型晶体管。

1.3.2 晶体管的电流分配与放大原理

为了定量地分析晶体管的电流分配关系和放大原理，下面先介绍一个实验，其实验电路如图 1.12 所示。

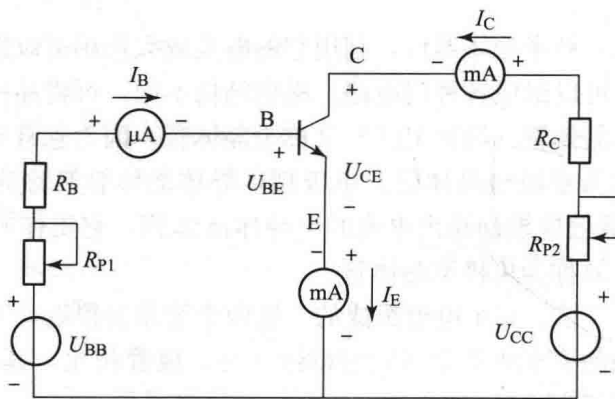


图 1.12 晶体管电流分配实验电路

加电源电压 U_{BB} 时发射结承受正向偏置电压，而电源 $U_{CC} > U_{BB}$ ，使集电结承受反向偏置电压，这样可以使晶体管具有正常的电流放大作用。

通过改变电位器 R_{P1} ，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，表 1.1 所示为晶体管各极电流实验数据。

表 1.1 晶体管各极电流实验数据

$I_B/\mu\text{A}$	0	20	30	40	50	60
I_C/mA	≈ 0	1.4	2.3	3.2	4	4.7
I_E/mA	≈ 0	1.42	2.33	3.24	4.05	4.76
I_C/I_B	0	70	76	80	80	78

分析表 1.1 中数据, 可得如下结论:

(1) $I_E = I_B + I_C$, 三个电流之间的关系符合基尔霍夫电流定律, 事实上, 三极管本身可以看成是一个扩大的节点。

(2) $I_C \approx I_E$, I_B 虽然很小, 但对 I_C 有控制作用, 在晶体管基极输入一个比较小的电流 I_B , 就可以在集电极输出一个比较大的电流 I_C , 且 I_C 随 I_B 的改变而改变。例如, I_B 由 $40 \mu\text{A}$ 增加至 $50 \mu\text{A}$ 时, I_C 从 3.2 mA 增加至 4 mA , 即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(4 - 3.2) \times 10^{-3}}{(50 - 40) \times 10^{-6}} = 80$$

式中, β 称为晶体管电流放大系数, 它反映晶体管电流放大能力, 也可以说电流 I_B 对 I_C 的控制能力。

值得说明的是, 所谓晶体管具有电流放大作用, 是指在基极输入小电流 I_B , 在集电极电路会获得较大的放大的电流 I_C , 这并不说明晶体管起到了能量放大的作用, 放大所需要的能量是由集电极电源 U_{CC} 提供的, 不可理解为晶体管自身可以生成能量, 能量是不能凭空产生的。晶体管具有用小信号控制大信号的能量控制功能。因此, 晶体管是一种电流控制器件。

晶体管电流之间为什么具有这样的关系呢? 可以通过晶体管内部载流子的传输过程来解释。NPN 型晶体管内部的电流分配如图 1.13 所示。

1. 发射区向基区发射电子

由图 1.13 可知, 电源 U_{BB} 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地扩散到基区, 并从电源补充进电子, 形成电子电流; 同时基区多数载流子空穴也会向发射区扩散, 形成空穴电流, 这两部分电流方向相同, 共同形成了发射极电流 I_E 。但由于基区多数载流子浓度远远低于发射区载流子浓度, 可以不考虑这个电流。因此, 可以认为晶体管发射结电流主要是电子电流。

2. 基区中电子的扩散与复合

从发射区进入基区的电子, 在靠近发射结的附近密集而浓度不断升高, 会促使电子流在基区中向集电结扩散, 扩散途中, 有些电子与基区的空穴复合, 同时接在基区的电源不断从

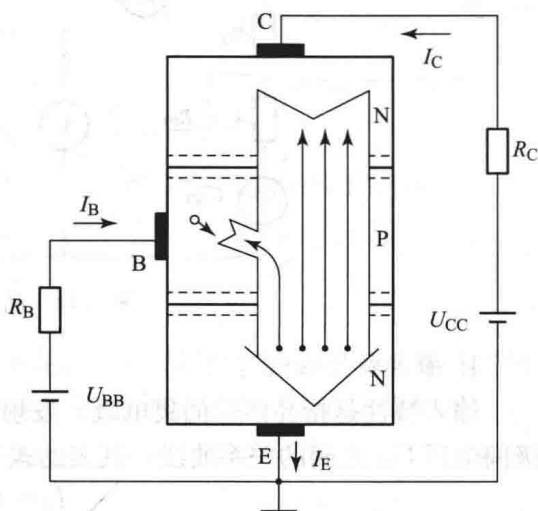


图 1.13 NPN 型晶体管内部的电流分配