



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

# 矿山电工学

KUANG SHAN DI AN GONG XUE

主 编◎冯晓艳



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

# 矿山电工学

主 编 冯晓艳

副主编 金朱鹏 孙 辉 张凤璐

主 审 郭明良

北 京

冶金工业出版社

2014

## 内 容 简 介

全书分为5章。第1章介绍电子技术知识,第2章矿山供电知识,第3章介绍安全用电及保护,第4章介绍采掘机械设备的电气控制,第5章介绍矿井照明。

本书可作为普通高等教育、高职高专、成人院校采矿工程、矿山安全工程、矿山机电等专业课程教材,也可作为相关工程技术人员的参考资料。

## 图书在版编目(CIP)数据

矿山电工学/冯晓艳等主编. —北京:冶金工业出版社,2014.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6741-8

I. ①矿… II. ①冯… III. ①矿山电—高等学校—教材 IV. ①TD6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 187625 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

ISBN 978-7-5024-6741-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京明兴印务有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版,2014 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 18 印张; 435 千字; 286 页

38.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

# 前 言

本书是依据教育部教学指导委员会颁布的课程教学基本要求编写的。全书分为5章。第1章介绍电子技术知识,第2章矿山供电知识,第3章介绍安全用电及保护,第4章介绍采掘机械设备的电气控制,第5章介绍矿井照明。

在编写过程中充分吸收了本学科新思想、新理论和新技术。注重教材的实用性和先进性,满足一般高校“应用型本科学生”的培养目标。本书具有以下特点:

(1)内容精简,注重实用。

(2)理论与实际紧密结合,引入实用电路,解决实际问题,提高学生学习兴趣;基础与系统并重,强调对基本知识点的覆盖,降低知识点的难度与深度,强调“矿山电工学”知识的系统性。

参加编写工作的有冯晓艳、金朱鹏、孙辉、张凤璐。第1章由冯晓艳编写,第2章由金朱鹏编写,第3章由孙辉编写;第4、5章由张凤璐编写,附录部分由金朱鹏编写。冯晓艳任本书的主编,负责全书的整体规划与统稿工作,金朱鹏、孙辉任副主编,郭明良教授任本书的主审,对本书提出了宝贵的意见,在此向他表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中妥有不妥之处。希望广大读者予以批评指正。

编 者

2014年5月

## 目 录

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 第一章 电子技术知识 .....          | (1)   |
| 第一节 半导体元器件基础 .....        | (1)   |
| 第二节 放大器的基础 .....          | (16)  |
| 第三节 负反馈放大电路 .....         | (32)  |
| 第四节 功率放大器 .....           | (51)  |
| 第五节 直流稳压电源 .....          | (61)  |
| 第二章 矿井供电知识 .....          | (81)  |
| 第一节 概述 .....              | (81)  |
| 第二节 矿山供电系统 .....          | (89)  |
| 第三节 高压供电设备 .....          | (108) |
| 第四节 低压配电开关 .....          | (122) |
| 第五节 电力变压器和移动变电站 .....     | (130) |
| 第六节 矿用电缆 .....            | (142) |
| 第七节 电缆故障探测 .....          | (151) |
| 第三章 安全用电及保护 .....         | (163) |
| 第一节 电气设备及其防爆原理 .....      | (163) |
| 第二节 漏电与触电 .....           | (169) |
| 第三节 井下低压电网的漏电分析 .....     | (181) |
| 第四节 漏电保护 .....            | (190) |
| 第五节 接地与接零 .....           | (209) |
| 第四章 采掘机械设备的电气控制 .....     | (220) |
| 第一节 控制电器 .....            | (220) |
| 第二节 控制线路图的绘制原则及分析方法 ..... | (225) |
| 第三节 矿用隔爆磁力起动器 .....       | (227) |
| 第四节 采煤机组的电气控制 .....       | (247) |
| 第五节 掘进机械的电气控制 .....       | (261) |



|                    |       |
|--------------------|-------|
| 第五章 矿井照明 .....     | (267) |
| 第一节 概述 .....       | (267) |
| 第二节 常用照明术语 .....   | (268) |
| 第三节 电光源及其用途 .....  | (271) |
| 第四节 矿用照明器 .....    | (273) |
| 第五节 矿井照明灯的选择 ..... | (275) |
| 第六节 照明供电网络 .....   | (277) |
| 参考文献 .....         | (281) |

# 第一章 电子技术知识

## 第一节 半导体元器件基础

晶体二极管(简称二极管)是用半导体材料制成的,广泛应用于电子设备中的最简单的半导体器件。它的内部结构示意图和电路符号如图 1-1 所示。

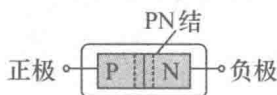


图 1-1 二极管内部结构示意图

二极管的核心部分是 PN 结。PN 结是 P 型半导体和 N 型半导体的接触面附近的区域。PN 结由外壳保护起来并引出两个极,就构成了二极管。其中一个极和 P 型半导体相连接,称为正极或阳极,另一个和 N 型半导体相连接,称为负极或阴极。那什么是 PN 结?什么是 N 型半导体和 P 型半导体?二极管的工作原理是什么?流过二极管的电流和加在二极管两端的电压的关系如何?二极管有什么用途?这些都是本章要回答的问题。

本章首先介绍半导体物理知识,讲解本征半导体、N 型半导体、P 型半导体。然后,讲解 PN 结的形成和工作原理、二极管的电压和电流关系(伏安特性)、二极管的应用、含有二极管电路的求解方法等。

### 一、半导体物理知识

自然界中的物质,按其导电能力分类,可以分成三大类:导体、绝缘体和半导体。电阻率低于  $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  的物质称为导体,电阻率高于  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  的物质称为绝缘体,导电能力介于导体和绝缘体之间,称为半导体。最常见的半导体材料是硅,其次是锗,还有一些化合物如砷化镓等也是半导体。本书着重讨论硅和锗的特性。

硅在元素周期表中的序号是 14,原子核外有 14 个电子,它的价电子是 4 个。锗在元素周期表中的序号是 32,原子核外有 32 个电子,而它的最外层电子数也是 4 个,即也有 4 个价电子。因此可以用同一个模型来表示硅和锗原子,如图 1-2 所示。



图 1-2 简化模型

图 1-2 所示硅和锗原子的简化模型,此模型分成两部分,一部分是价电子,另一部分是惯性核。惯性核是指硅和锗的原子除了价电子以外的部分。很明显,惯性核应具有 4 个正电荷。



### (一)本征半导体

本征半导体是纯净的半导体单晶。所谓单晶就是在—块半导体内原子按晶格排列的非常整齐。硅或锗的单晶在绝对零度时,即  $T=0\text{K}$  时平面结构示意图如图 1-3 所示。

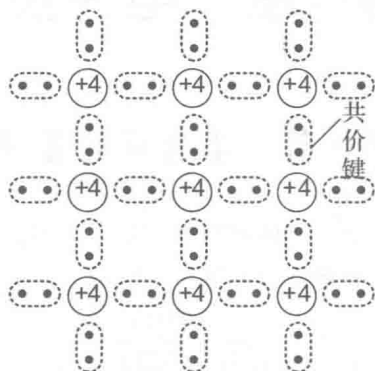


图 1-3 单晶结构平面示意图

从图 1-3 中可以看出,当温度为绝对零度时,硅和锗的每个原子都以共价键的形式和它周围的原子结合并相互作用。

当温度升高时,有些原子中的价电子获得足够的能量,可以克服共价键的束缚,跑到晶格中,成为可以在晶格中自由运动的自由电子,而在原共价键中出现一个空位,称为空穴。因此,只要产生一个自由电子,必然对应一个空穴,即电子和空穴成对出现。称为电子—空穴对。温度越高,产生的电子—空穴对就越多。这种产生电子—空穴对的过程,称为本征激发。

自由电子可以在晶格中运动,它是带负电的粒子,它的运动可以产生电流;空穴也可以运动,如果其它共价键中的电子移动到某一空穴所在的共价键中,填补了空位,这样就相当于空穴移动了位置。例如共价键 A 中的电子填补了共价键中 B 的空位,共价键 A 中就会出现空位,也就是空穴从 B 移动到 A,自由电子从 A 移动到 B,空穴的运动方向和自由电子的运动方向相反,因此可以把空穴的运动看作是一种带正电粒子的运动。空穴运动产生电流的方向和电流的方向相同。因此把自由电子和空穴都称为载流子。

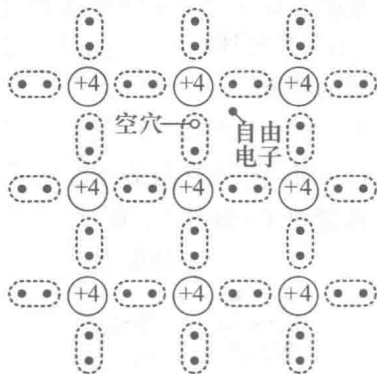


图 1-4 本征激发

本征激发的实质是:当温度升高时,价电子获得足够的能量,挣脱共价键的束缚而成为自由电子。在本征半导体中,与本征激发同时存在的一种现象称为复合。复合是指自由电子放出能

量又回来填补空穴的过程。当电子和空穴发生复合时,一对电子空穴对就消失了。显然激发使电子空穴对增加,而复合又使电子空穴对减少。在一定温度下,激发和复合达到动态平衡。即温度一定时,本征半导体内的电子浓度和空穴浓度相等,而且是一个定值。

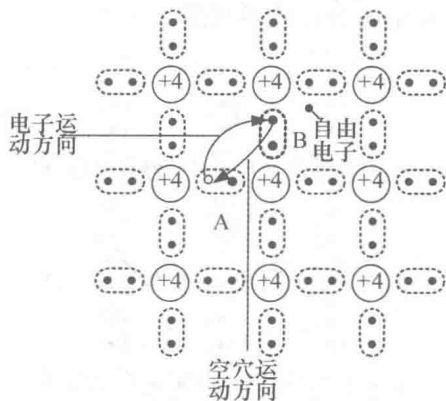


图 1-5 空穴的移动

## (二) 杂质半导体

掺杂就是将半导体材料中掺入一定量的杂质元素,这样的半导体材料称为杂质半导体。一般掺入杂质元素的浓度要远大于本征载流子的浓度,又要远小于材料的原子密度,使杂质原子零星地分布于半导体材料的晶格中。

杂质半导体分为两种,一种是 N 型半导体,另一种是 P 型半导体。

### 1. N 型半导体

如果在半导体材料中掺入五价元素,就能制成 N 型半导体。用于掺杂的常见的五价元素有磷和砷,图 1-6 所示为五价原子在晶格中的分布。

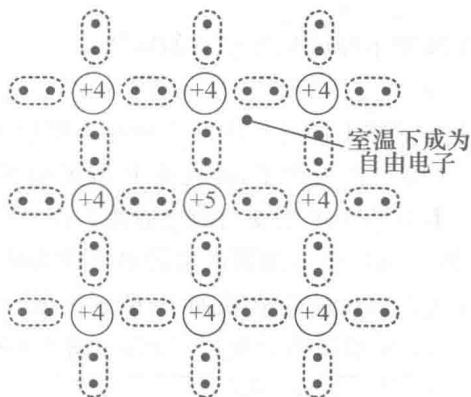


图 1-6 N 型半导体结构示意图

因为杂质原子是五价的,所以杂质的原子有五个价电子,其中四个价电子和周围的半导体材料原子中的价电子组成共价键,而余下的一个价电子很容易挣脱杂质原子的束缚,成为自由电子。理论和实验表明,在室温下,晶格中所有的杂质原子都能释放出一个电子,因此这种杂质称为施主杂质。由于这个电子不是共价键中的电子,所以没有空穴产生。杂质原子由于释放出一个电子而变成正离子,而这个正离子是束缚在晶格中,不能像载流子那样运动。杂质原子带



正电而自由电子带负电,所以整块半导体还是电中性的。

## 2. P 型半导体

如果在半导体材料中掺入三价元素,就能制成 P 型半导体。用于掺杂的常见三价元素是硼。如图 1-7 所示为硼原子在晶格中分布的平面图。

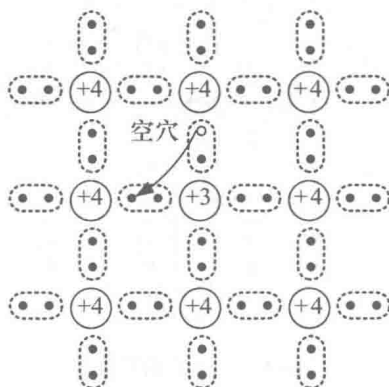


图 1-7 P 型半导体结构示意图

因为硼原子是三价的,它和周围半导体材料的原子中的价电子组成共价键时,缺少一个电子。理论和实验表明,在室温下,晶格中所有的硼原子都能获得半导体材料原子中的一个价电子而变成负离子,这个负离子是束缚在晶格中的,它不能像载流子那样运动。而给硼原子提供电子的那个原子的共价键中就出现了一个空穴。因此,一个硼原子就对应一个空穴的出现。因为硼原子接受一个电子变为负离子,所以称这种杂质半导体为 P 型半导体。

## 二、PN 结

PN 结就是 P 型半导体和 N 型半导体相互接触的区域。

### (一)PN 结的形成

用杂质补偿的技术在一块半导体上同时生成两个相互连接的区域,即 N 型区和 P 型区。P 型区中多子是空穴,而空穴在 N 型区内是少数,因此在 P 型区和 N 型区的接触面附近,存在着浓度差。载流子的浓度差会引起载流子由浓度高的地方流向浓度低的地方,这种由于浓度差而引起的载流子的运动,称为扩散。由扩散运动而产生的电流称为扩散电流。由于 P 型区空穴的浓度大于 N 型区空穴的浓度,则 P 型区的空穴就向 N 型区扩散。同样 N 型区的电子是多子, P 型区的电子是少数,因此电子从 N 型区向 P 型区扩散,如图 1-8 所示。

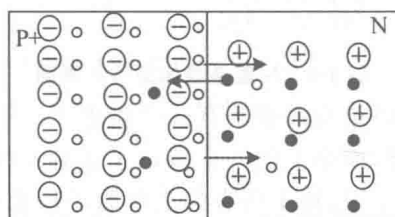


图 1-8 载流子扩散示意图



由图 1-8 可知, P 型区的空穴向 N 型区扩散, 当空穴到 N 型区后, 就成为 N 型区的少子, 很容易被 N 型区内的多子——电子复合。因此, 在接触面附近, 剩下了受主杂质的负离子, 这些负离子被束缚在晶格中, 不能自由移动。同样道理, N 型区的多子——电子扩散到 P 型区, 在接触面附近留下了施主杂质的正离子, 这样形成了所谓的空间电荷区。在空间电荷区内, 多数载流子已经扩散到对方并复合掉了, 或者说消耗尽了, 因此空间电荷区又称为耗尽层。空间电荷示意图如图 1-9 所示。

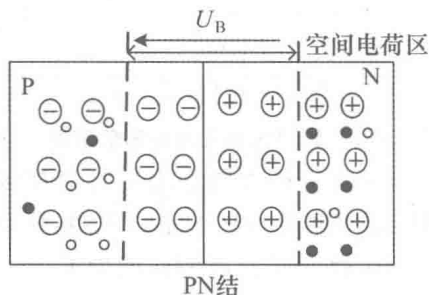


图 1-9 空间电荷区示意图

由于空间电荷区内有带正电的施主杂质离子和带负电的受主杂质离子, 即一边是正电荷, 另一边是负电荷, 因此存在电场, 称为内建电场。电力线从正电荷出发, 终止于负电荷, 电场只在空间电荷区内存在, 而空间电荷区以外的 P 型区域和 N 型区域还是电中性的。

由于空间电荷区存在内建电场, 对多子的扩散起到了阻碍的作用, P 型区的多子——空穴就不太容易扩散到 N 型区了, 而 N 型区的多子——电子也不太容易扩散到 P 型区, 也就是内建电场对多子的扩散有阻挡作用, 故空间电荷区又称为阻挡区或阻挡层。

内建电场对多子的扩散有阻挡作用, 但少子在内建电场的作用下会产生运动。这种载流子在内建电场的作用下而产生的定向运动称为漂移。由载流子因漂移而产生的电流称为漂移电流。P 型区的少子电子, 在内建电场的作用下会向 N 型区漂移, 同样, N 型区的少子——空穴, 也向 P 型区漂移。由于在 PN 结中多子的扩散运动方向正好和少子的漂移运动方向相反, 当温度一定时, 扩散运动和漂移运动会达到动态平衡状态。形成 PN 结。

## (二) PN 结的伏安特性

以上讲解的是没有加任何电压时的热平衡状态下的 PN 结。但是 PN 结在使用过程中都是要加电压的, 有可能加正向电压(P 型区接电源的正极, N 型区接电源的负极), 也有可能加反向电压(N 型区接电源的正极, P 型区接电源的负极), 或者加正、反向交替变化的交流电压。下面讨论 PN 结的电流和加在它两端的电压的关系, 称为伏安特性。

### 1. PN 结的正向特性

如图 1-10 所示, PN 结加上了正向电压, 即 P 型区接电源的正极, N 型区接电源的负极。

空间电荷区的载流子极少, 它的电阻很高, 而中性区内有大量的载流子, 中性区的电阻很小, 所以电源电压  $U$  几乎都加到空间电荷区上了。在空间电荷区中  $U$  所形成的电场方向和原内建电场的方向相反。此时空间电荷区的宽度变窄, PN 结未加电压时处于热平衡状态, 多子的扩散和少子的漂移处于动平衡状态。加正向电压之后, 阻挡层变窄, 阻挡层两端电位差变小, 因此有利于多子的扩散, 使多子扩散数量大于少子的漂移数量。此时 P 型区的多子——空穴向

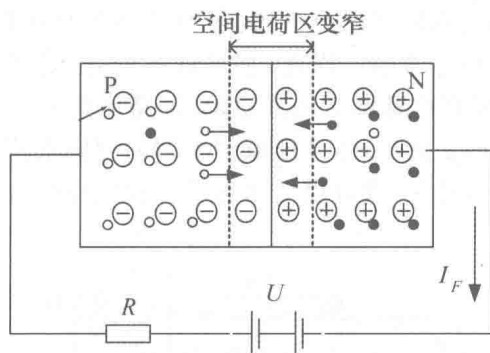


图 1-10 PN 结正向电压示意图

N 型区扩散, N 型区的少子——空穴在电场力的作用下向 P 型区漂移, 但是, 从 P 型区扩散到 N 型区的空穴数量大于从 N 型区漂移到 P 型区的空穴数量, 所以有一定数量的空穴由 P 型区净注入到 N 型区。空穴到了 N 型区就形成了 N 型区的少子。由于空穴不断注入 N 型区, 则在 N 型区的边缘处少子的浓度就比较高, 因此少子要向浓度低的地方扩散, 只要电压  $U$  是稳定的, 空穴就不断地注入到 N 型区, 并且使 N 型区的少子浓度有一个稳定的分布。显然, 外加的正向电压越高, PN 结的正向电流  $I_F$  就越大, 这个电压称为正向偏置电压。

## 2. PN 结的反向特性

当 PN 结加上反向偏置电压时, P 型区与电源负极相连, N 型区与电源的正极连接。

此时电源电压在空间电荷区内产生的电场方向和内建电场的方向相同, 因为空间电荷区变宽, 这使得多子的扩散很难进行, 但是有利于少子的漂移。因此, N 型区的少子——空穴只要到达空间电荷区的边缘, 就很快被电场拉到 P 型区。同样, P 型区的少子——电子只要运动到空间电荷区边缘, 就被空间电荷区的电场拉到 N 型区。

只要  $U$  的值大于 0.1V 以上, 空间电荷区基本上没有多子的扩散电流, 只有少子的漂移电流了。N 型区少子——空穴向 P 型区漂移, P 型区少子——电子向 N 型区漂移, 两漂移电流方向相同, 因此总的漂移电流等于空穴的漂移电流加上电子的漂移电流, 这就是 PN 结的反向电流  $I_R$ 。

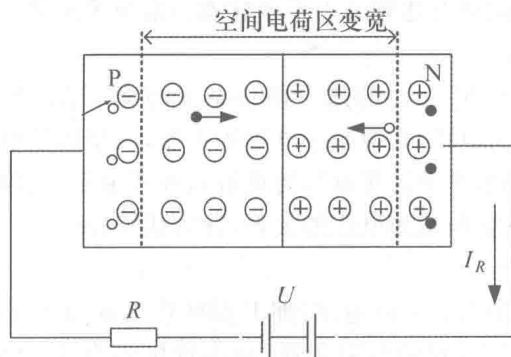


图 1-11 PN 结加反向偏置电压示意图

反向电流  $I_R$  很小, 因为它是由少子的运动形成的, 而无论是 P 型区还是 N 型区少子浓度都很小, 当反向电压  $U$  增加时, 反向电流也增加。但是, 当反向电压增加到 0.1V 以上时, 反向电流基本上就不再增加了。因为此时几乎全部少子都参与了形成反向电流的定向移动, 这时的

反向电流称为反向饱和电流,用  $I_s$  表示。

一般硅 PN 结的反向饱和电流  $I_s$  的值在  $10^{-15} \sim 10^{-9}$  之间,锗 PN 结的反向饱和电流  $I_s$  的值在  $10^{-9} \sim 10^{-6}$  之间。反向饱和电流与少子的浓度有关,而少子的浓度和温度有关,因此,反向饱和电流也和温度有关,温度越高反向饱和电流越大。

### 3. PN 结的击穿

反向电流和反向电压无关是有条件的,条件是 PN 结上所加的反向电压不能太大。如果反向电压加得太大,PN 结的反向电流会突然猛增,这种现象称为“击穿”。

在 PN 结发生击穿时,如果不采取措施限制反向电流的增长,PN 结会因电流太大而烧毁,这种击穿称为热击穿。热击穿是不可逆击穿,故在 PN 结中应避免热击穿;另一种击穿是可逆的,如果采取一定的措施使 PN 结在击穿区的电流不做无限制的增加,则二极管不会损坏。

### (三) 二极管的几种常见结构

PN 结进行封装就形成了二极管。二极管的常见结构主要有三种,点接触型、面接触型和平面二极管。

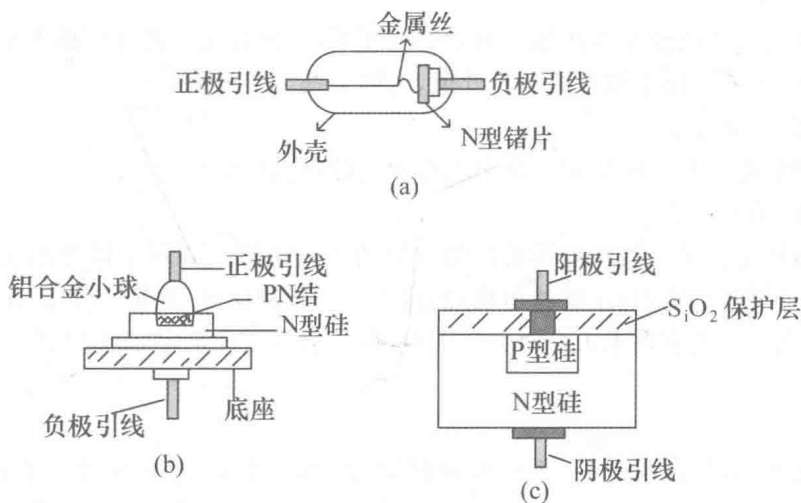


图 1-12 二极管的结构

(a)点接触型;(b)面接触型;(c)平面二极管

点接触型是指由一根金属丝经过特殊工艺与半导体表面相接形成 PN 结。因结面积小,不能通过较大电流。但其结电容较小,一般在  $1\text{pF}$  以下,工作频率可达  $100\text{MHz}$  以上。因此适用于高频电路和小功率整流。

面接触型采用合金法工艺制成的。结面积大,能够流过较大的电流,但其结电容大,因而只能在较低频率下工作,一般仅作为整流管使用。

平面二极管是采用扩散法制成的。结面积较大的可用于大功率整流,结面积小的可作为脉冲数字电路中的开关管。

### (四) 实际二极管的伏安特性

二极管的伏安特性与 PN 结的伏安特性大致相当,都是单向导电性。实际二极管的反向电流随着反向电压的增加而略有增加。

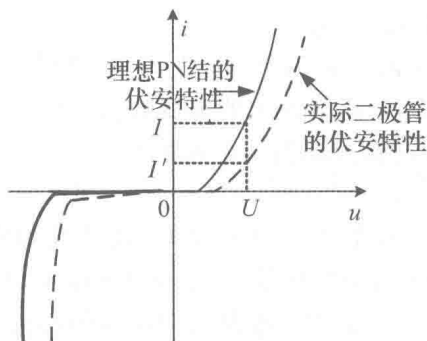


图 1-13 实际和理想 PN 结的伏安特性比较

### (五) 二极管的主要参数

在实际应用中选择适当的二极管对电路的设计很重要。不同用途的二极管有不同的结构，有不同的参数；不同用途的二极管对二极管参数的要求也不相同。二极管的主要参数有：

#### (1) 最大整流电流。

二极管的最大整流电流是指在规定的测试温度下，二极管允许通过的最大平均电流。二极管在正常工作时，平均工作电流不应超过此值，否则会损坏二极管。

#### (2) 最大反向峰值电压。

最大反向峰值电压是二极管在工作时允许承受的最大反向电压。

#### (3) 最大正向浪涌电流。

最大正向浪涌电流是二极管允许流过的过量的正向电流。表示二极管承受非正常工作电流（浪涌电流不是经常出现，只是偶然出现）的能力。一般测试时，规定一个 50Hz 的浪涌电流。

#### (4) 反向电流。二极管在未击穿时的反向电流，一般规定在室温 25℃ 时进行测试。

## 三、BJT

BJT 的种类很多，按照材料分，有硅管和锗管；按照频率分，有高频管和低频管；按照功率分，有小、中、大功率管等。从外形上看，BJT 都有 3 个电极，常见的几种外形如图 1-14 所示。图 1-14(a) 和图 1-14(b) 所示为小功率管，图 1-14(c) 所示为中功率管，图 1-14(d) 所示为大功率管。

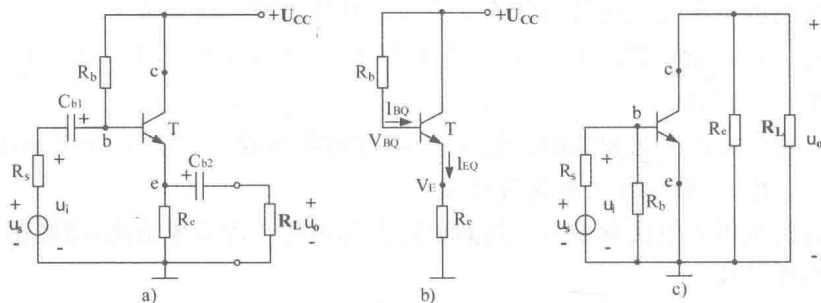


图 1-14 几种 BJT 的外形

(a)、(b) 小功率管；(c) 中功率管；(d) 大功率管

### (一)BJT 的结构

三极管按照结构不同,可分为两种类型:NPN 型和 PNP 型。

图 1-15(a)所示为 NPN 型三极管的结构示意图。它是在同一个硅片上制造出 3 个掺杂区域,形成了两个 PN 结,就构成了晶体管,称之为 NPN 型三极管。

由图可见,这 3 个杂质区,由下至上分别称为集电区、基区和发射区。虽然发射区和集电区都是 N 型材料,但 BJT 的制造工艺的特点是:发射区的掺杂浓度比集电区的掺杂浓度高;基区很薄且掺杂浓度低;在几何尺寸上,集电区的面积比发射区大。这些特点是保证 BJT 具有电流放大作用的内部条件。

发射区和基区之间的 PN 结称为发射结( $J_e$ ),集电区和基区之间的 PN 结称为集电结( $J_c$ )。从 3 个区各引出一个电极,分别叫做集电极 c、基极 b 和发射极 e。

图 1-15(b)所示为 NPN 管的电路符号,箭头方向表示发射结正偏时发射极电流的实际方向。

同样,PNP 型 BJT 也是由两个 PN 结、3 层杂质区构成的,不过中间是 N 型半导体,两边是 P 型半导体,结构和符号如图 1-15(c)、(d)所示。

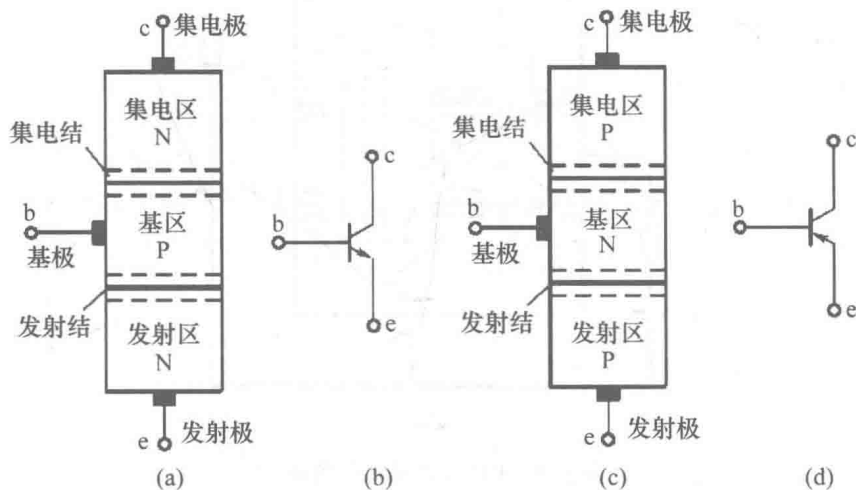


图 1-15 晶体管的结构和符号

(a)NPN 管的结构;(b)NPN 型管的符号;(c)PNP 管的结构;(d)PNP 管的符号

本节以硅材料 NPN 型管为例讲述晶体管的放大作用、特性曲线和主要参数。

### (二)BJT 放大原理

放大是对模拟信号最基本的处理。三极管作为放大电路的核心元件,它能够控制能量的转换,将输入的任何微小变化不失真地放大输出。

#### 1. BJT 处于放大的外部条件

要想使 BJT 具有放大作用,除了具备上述的内部条件外,还需要具备适当的外部条件:要求 BJT 的 3 个电极之间的偏置电压应保证发射结正向偏置,集电结反向偏置。因此,对于 NPN 管来说,要求  $U_B > U_E$ ,  $U_C \gg U_B$ ;而对于 PNP 管来说,则要求  $U_E > U_B$ ,  $U_B \gg U_C$ 。

#### 2. BJT 内部载流子的传输过程

(1)发射区向基区注入电子(又称为扩散)。BJT 中的载流子的运动如图 1-16 所示,由于发射



结外加正向电压,发射区就会有大量的自由电子(多子)向基区注入(扩散),形成发射极电子电流  $I_{EN}$ ;基区的空穴(多子)向发射区注入,形成空穴注入电流  $I_{EP}$ 。两电流之和就构成发射极电流,即  $I_E = I_{EN} + I_{EP}$ 。因为发射区相对基区是重掺杂,基区空穴浓度远低于发射区的电子浓度,所以满足  $I_{EN} \gg I_{EP}$ ,  $I_{EP}$  可忽略不计。因此,发射极电流  $I_E \approx I_{EN}$ ,其方向与电子注入方向相反。

(2)电子在基区的扩散和复合。发射区注入基区的电子即成为基区中的非平衡电子,这些非平衡自由电子会在基区靠近发射结的边界累积,在发射结处浓度最大,而在集电结处浓度最小(因集电结反偏,电子浓度近似为零)。因此,在基区中形成了非平衡电子的浓度差。在该浓度差作用下,注入基区的电子将继续向集电结扩散。在扩散过程中,非平衡电子会与基区中的空穴相遇,使部分电子因复合而失去,形成基区复合电流  $I_{BN}$ 。为了补充因复合而消失的空穴,基极电源  $U_{BB}$  不断从基区拉走价电子,即向基区提供新的空穴,形成基极电流  $I_B$ 。因此,  $I_{BN}$  是基极电流  $I_B$  的主要部分。但由于基区很薄且空穴浓度又低,所以被复合的电子数极少,故  $I_{BN}$  很小,而绝大部分电子都能扩散到发射结边缘。

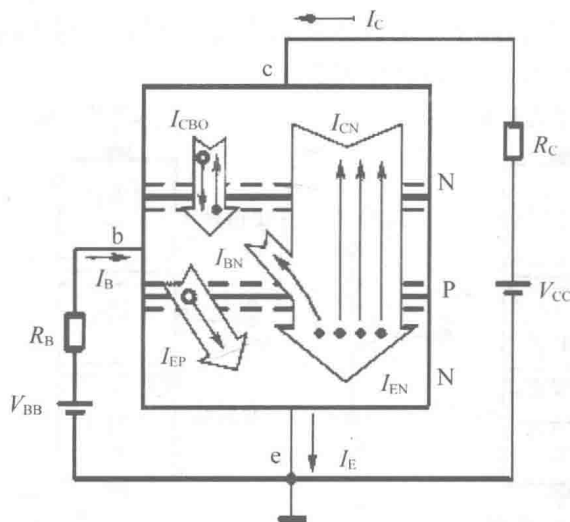


图 1-16 BJT 中的载流子的运动

(3)集电区收集扩散过来的电子。由于集电结反偏,在结内形成了较强的电场,有利于结外边界处少子的漂移。因而,使扩散到集电结边沿的电子在该电场作用下漂移到集电区,形成集电区的收集电流  $I_{CN}$ 。该电流是构成集电极电流  $I_C$  的主要部分。此外,集电区的少子(空穴)和基区本身的少子(电子)在结电场的作用下,向对方漂移形成集电结反向饱和电流  $I_{CBO}$ ,并流过集电极和基极支路,它是构成  $I_C$ 、 $I_B$  的另一部分电流。该电流是由热激发的少数载流子形成的,数值很小。这个电流对放大没有贡献,而且受温度的影响很大,容易使管子工作不稳定,所以在制造过程中要尽量减少  $I_{CBO}$ 。

由以上分析可知,BJT 内有两种载流子参与导电,故称为双极型三极管。

### 3. 电流分配关系

集电极电流  $I_C$  由两部分组成:  $I_{CN}$  和  $I_{CBO}$ 。前者是由发射区发射的电子被集电极收集后形成的,后者是由集电区和基区的少数载流子漂移运动形成的,称为反向饱和电流。于是有

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} \approx I_{CN} \quad (1-1)$$



发射极电流发射极电流  $I_E$  也由两部分组成:  $I_{EN}$  和  $I_{EP}$ 。  $I_{EN}$  为发射区发射的电子所形成的电流,  $I_{EP}$  是由基区向发射区扩散的空穴所形成的电流。因为发射区是重掺杂, 所以  $I_{EP}$  忽略不计, 即  $I_E \approx I_{EN}$ 。  $I_{EN}$  又分成两部分, 主要部分是  $I_{CN}$ , 极少部分是  $I_{BN}$ ,  $I_{BN}$  是电子在基区与空穴复合时所形成的电流, 基区空穴是由电源  $V_{BB}$  提供的, 故它是基极电流的一部分。

$$\text{即} \quad I_E \approx I_{EN} = I_{BN} + I_{CN} \quad (1-2)$$

基极电流  $I_B$  是  $I_{BO}$  与  $I_{CBO}$  之差, 即

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO} \approx I_{BN} \quad (1-3)$$

发射结发射的电子大部分被集电结收集, 形成集电极电流, 即  $I_{CN} \gg I_{BN}$ 。常用  $\bar{\alpha}$  来表示共基极电流放大倍数, 即

$$I_C = \bar{\alpha} I_E \quad (1-4)$$

根据 KCL,  $I_E = I_B + I_C$ 。因此, 基极电流可表示为发射极电流的其余部分, 即

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}) I_E \quad (1-5)$$

由此可导出集电极与基极之间的电流关系

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{\bar{\alpha} I_E}{(1 - \bar{\alpha}) I_E} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} = \bar{\beta} \quad (1-6)$$

式(1-6)中的  $\bar{\beta}$  称为 BJT 共发射极直流电流放大倍数。式(1-6)也反映了放大偏置时 BJT 的基极对发射极电流的控制作用, 利用这一性质可以实现 BJT 的放大作用。

### (三) 晶体管的共射极特性曲线

晶体管的输入特性和输出特性曲线描述各电极之间电压、电流的关系, 用于对晶体管的性能、参数和晶体管电路的分析估算。

#### 1. 输入特性曲线

输入特性曲线描述管压降  $U_{CE}$  一定的情况下, 基极电流  $i_B$  与发射结压降  $u_{BE}$  之间的函数关系, 即

$$i_B = f(u_{BE}) \big|_{U_{CE} = \text{常数}} \quad (1-7)$$

当  $U_{CE} = 0V$  时, 相当于集电极与发射极短路, 即发射结与集电结并联。因此, 输入特性曲线与 PN 结的伏安特性相似, 呈指数关系, 见图 1-17 中  $U_{CE} = 0V$  的那条曲线。

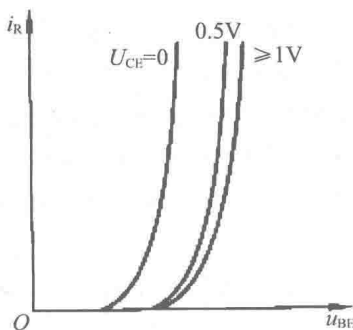


图 1-17 BJT 的输入特性曲线

当  $U_{CE}$  增大时, 曲线将右移, 见图 1-17 中标注 0.5V 和  $\geq 1V$  的曲线。这是因为, 由发射区注入基区的非平衡少数载流子有一部分越过基区和集电结形成集电极电流  $i_C$ , 使得在基区参与复合运