

中国高等教育培训中心  
高职信息类专业国际合作组织

联合引进

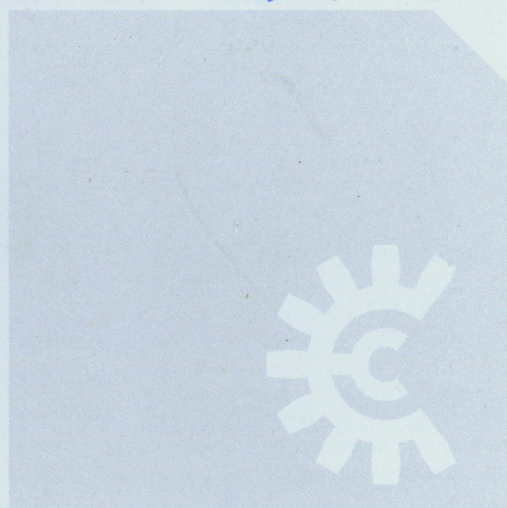


德国国家远程教育中心 (ZFU) 批准

# 电气技术人员认证远程教育课程

【德】Robert Eckert博士远程教育学院 编著

## 电子技术 (第二册)



ECKERT  
SCHULEN  
Fernlehrinstitut  
GmbH



华文出版社  
Sinoculture Press

电气技术人员认证远程教育课程

# 电子技术

## 第二册

[德] Robert Eckert博士远程教育学院 编著  
北京泛华德教育科技有限公司 翻译

华文出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术/德国Robert Eckert博士远程教育学院编著;  
北京泛华德教育科技有限公司译—北京: 华文出版社, 2009.12

电气技术人员认证远程教育课程  
ISBN 978-7-5075-2962-3

I. ①电… II. ①德…②北… III. ①电子技术—工程技术人员—远程教育—教材 IV.  
①TN

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第213408号

## 电气技术人员认证远程教育课程：电子技术(第二册)

---

编 著： 德国Robert Eckert博士远程教育学院  
翻 译： 北京泛华德教育科技有限公司  
责任编辑： 吴 晶  
责任校对： 华 一  
出版发行： 华文出版社  
社 址： 北京市宣武区广安门外大街305号8区2号楼  
邮政编码： 100055  
网 址： <http://www.hwcbcs.com>.  
投稿邮箱： [hwcbcs@126.com](mailto:hwcbcs@126.com)  
电 话： 010-58336255 010-58336259  
经 销： 新华书店  
印 刷： 北京市艺辉印刷有限公司  
开 本： 210×297 1/16  
印 张： (全套4册)55  
字 数： (全套4册)1356千字  
版 次： 2010年2月第1版  
印 次： 2010年2月第1次印刷  
标准书号： ISBN 978-7-5075-2962-3  
定 价： (全套4册)270.00 元

---

版权所有，侵权必究

# 德国《电气技术人员认证远程教育课程》中文版

## 导言：光荣与梦想

众所周知，德国是一个高度发达的工业化国家，在德国工业化进程中，德国政府始终如一地把职业教育作为国家经济发展的中坚力量，这不仅体现在理论上，更重要的是在教育实践中创造出闻名于世的“双元制”职业教育模式。进入新世纪后又发起了“职业教育攻势国家行动”，设立了全国“职业教育日”，颁布实施了新的《联邦职业教育法》等发展职业教育的重大举措。摆在我们面前的这套11000页，1800万字完整的电气技术专业课程，由中国高等教育培训中心、高职信息类专业国际合作组织联合引进，经德国国家远程教育中心批准，Robert Eckert博士远程教育学院编写的电气技术人员认证远程教育课程，就是在这样的经济社会环境制约下的德国职业教育课程一个具有代表性的建设成果。

在欧洲颇具影响的Robert Eckert博士远程教育学院根据职业院校培训框架计划开发的课程充分体现了学校配合企业的培训设计学习领域，实施项目教学。可以看出，这套课程是对学科体系的调整与改革，课程内容侧重知识的应用与技能的培养。我国很多优秀的院校都曾选派教师赴德国ECKERT教育集团Robert Eckert博士远程教育学院进行课程建设培训，国家示范性高职院校邢台职业技术学院、成都航空职业技术学院、淄博职业学院、常州信息工程学院、浙江工商职业技术学院、包头职业技术学院等院校的教师赴德归国后普遍感到受益匪浅。

《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》指出：“积极引进国（境）外优质职业教育资源。鼓励国（境）外组织和个人依照我国法律和办学资格要求，同我国境内职业教育机构和其他社会组织，合作举办高水平的职业学校或职业培训机构。努力拓展职业学校毕业生国（境）外就业市场”。在中德职业教育合作30年后的今天，中国职业教育已经站在了一个新的历史起点上，积极引进国际上先进的职业教育理念和优质教学资源将对我国职教未来发展起到很重要的作用。教材作为一种重要的教学资源，不仅是体现教育思想、实现教育目标的载体，也是人才培养过程中掌握知识、发展能力和提高素质的重要信息载体，是课程最具体的形式。德国基于工作过程导向理念、“双元制”职业教育模式的落脚点都聚焦在课程体系和课程内容上。对于日益重视职业教育课程建设的中国职业教育事业而言，系统地了解德国专业的课程体系、结构和课程内容，破解德国核心教育技术，无疑会对我们本土化的课程改革与建设，取得“他山之石，可以攻玉”的功效。

我们坚信，通过这套电气技术人员的认证教材，从中可以研究德国工作过程导向思想在职业学校的专业课程体系是如何落实的，德国职业学校的教育活动如何应对经济技术发展。对比分析中国相应的专业课程体系，寻找相似与差异；系统分析教材的内容架构，研究课程设置依据、课程与课程之间的内在教育技术逻辑关系，比较研究中德职业教育在设计专业课程体系的内在逻辑思路的异同；分析教材的编写结构、传递技术信息的逻辑思路、编写方法、教材的形式、体例和模式，与国内同类教材比较各自的特色。所有这一切，都将为推动中国当代的职教课程改革提供新颖的视角、建设性的借鉴与参考。

高职信息类专业国际合作组织已开始与Robert Eckert博士远程教育学院、国际教育技术

研发机构北京泛华德教育科技有限公司合作开发与上述课程相配套的课件、教案及多媒体教学资源、教学参考、实训手册等。这套课程发行后将陆续举办与其配套的师资培训班、通过中德职教专家上示范课、开展交流研讨和观摩等途径，为职业院校以及职业培训机构的教师借鉴德国的职业教育理念、教育模式以及教学方法等提供切实有效的参考，本着洋为中用的原则，最终旨在提升广大教师驾驭本土化课程建设的能力。

对于那些区域经济条件不尽如人意，渴望交流学习的职业学校以及培训机构，高职信息类专业国际合作组织愿将其多年来的成功经验与丰硕成果以及对德国乃至其他发达国家职业教育合作的良好资源，无私地奉献出来。

我们的行动宗旨是：运用国家示范性高职院校的建设成果、借鉴德国的职业培训模式和课程体系、依托新媒体的远程教育平台、面向不发达地区扶持职业教育的弱势群体、整合国内外的教学、实习、实训与就业资源，为中国职业教育的宏图伟业做出自己的贡献。

德国《电气技术人员认证远程教育课程》中文版编委会

2009年12月 北京

# 德国《电气技术人员认证远程教育课程》

## 中文版编委会

- 主 编:** 钟玉琢 清华大学深圳研究生院信息学部主任
- 执行主编:** 曲克敏 中国高等教育培训中心副主任  
高职信息类专业国际合作组织秘书长
- 副 主 编:** 周长海 中国高等教育培训中心教育技术部首席顾问
- 徐玉彬 工业与信息化部电子教育与考试中心主任
- 左志成 中国电子科技集团公司人力资源部主任
- 刘 丛 国家示范性高职院校邢台职业技术学院院长
- 张学库 国家示范性高职院校宁波职业技术学院副院长
- 李学锋 国家示范性高职院校成都航空职业技术学院  
院长助理\教务处长\国家级教学名师
- 姜义林 国家示范性高职院校淄博职业学院副院长
- 委 员:** (按姓氏笔画排序)
- 吴志荣 宁波职业技术学院电子系主任
- 邱寄帆 成都航空职业技术学院计算机系主任
- 宗美娟 淄博职业学院示范建设办公室专职副主任
- 林训超 成都航空职业技术学院电子工程系主任
- 祝登义 成都航空职业技术学院教务处副处长
- 郭震震 中国高等教育培训中心教育技术部主任助理
- 高爱国 淄博职业学院信息工程系主任
- 曾照香 淄博职业学院电子电气系主任\国家级教学名师
- 褚建立 邢台职业技术学院信息工程系主任

电气技术人员认证远程教育课程

## 《电子技术》

审校委员会

主任：林训超

副主任：李明富

委员：梁颖 周兴 黄燕

第3分册a部分      晶体管及其基本电路      张鹏翻译      张欣主审、终审

第3分册b部分      晶体管开关及其基本电路      张鹏翻译      张欣主审、终审

## 第3分册a部分

# 晶体管及其基本电路

## 目 录

引 言.....	1
1 双极型晶体管的构造与工作原理.....	2
1.1 双极型晶体管的构造 .....	2
1.2 双极型晶体管的工作原理 .....	3
1.3 双极型PNP晶体管工作原理 .....	6
2 双极型晶体管的特性曲线和工作范围.....	8
2.1 双极型晶体管的特性曲线 .....	8
2.1.1 输出特性曲线图 .....	8
2.1.2 控制特性曲线 .....	10
2.1.3 输入特性曲线图 .....	12
2.1.4 反作用特性曲线图 .....	13
2.1.5 四象限特性曲线图 .....	14
2.2 双极型晶体管的工作范围 .....	15
3 晶体管的极限与特征值.....	17
3.1 极限值 .....	17
3.1.1 损耗功率 .....	18
3.2 特征值 .....	19
3.2.1 静态特征值 .....	20
3.2.1.1 直流电流放大系数.....	20
3.2.1.2 漏电流.....	22
3.2.1.3 漏电压(饱和电压) .....	24
3.2.1.4 击穿电压.....	24
3.2.1.5 晶体管直流电阻.....	26
3.2.2 动态特征值 .....	26
3.2.2.1 交流电流放大系数.....	27
3.2.2.2 短路跨导.....	29

3.2.2.3	输入输出电阻	30
3.2.2.4	特征频率	32
3.2.2.5	开关时间	33
3.2.2.6	晶体管电容与噪音	33
3.3	一些晶体管参数的测定	34
3.4	分类, 类型名称和端口分布	35
4	双极型晶体管基本电路	37
4.1	引言	37
4.2	工作参数	37
4.3	直流电压源的交流特性	38
4.4	共射极电路	38
4.4.1	共射极电路的功能	39
4.4.2	共射极电路的工作参数	39
4.5	共集电极电路(发射极跟随)	42
4.5.1	共集电极电路的功能	42
4.5.2	集电极电路的工作参数	42
4.5.3	直流电流放大系数	45
4.6	共基极电路	45
4.6.1	共基极电路的功能	45
4.6.2	共基极电路的工作参数	45
4.6.3	直流电流放大系数	47
4.7	三种基本电路的比较	47
5	共射极电路工作点的调节和稳定	50
5.1	工作点在特性曲线图中的位置	50
5.2	工作点的调节	52
5.2.1	通过基极串联电阻调节工作点	52
5.2.2	通过基极分压器调节工作点	53
5.3	通过负反馈实现工作点稳定	56
5.3.1	通过电流负反馈实现工作点稳定	56
5.3.2	通过电压负反馈实现工作点稳定	61
6	低频晶体管放大器	65
6.1	晶体管的低频放大(低频晶体管放大器)	65
6.2	单管放大器和推挽式放大器	65
6.3	晶体管的小信号放大和大信号放大	67
6.4	用四端参数计算低频小信号放大器	67
6.4.1	用h参数描述晶体管	68
6.4.2	修正特性曲线	70
6.4.3	晶体管的h参数等效电路	71

6.4.4 常用放大参数 .....	71
6.4.5 共射放大电路的放大参数 .....	72
6.5 低频大信号放大器 .....	76
6.5.1 电阻负载线、工作负载线线和功率双曲线 .....	76
6.5.2 图解法确定输入交变电压和输出交流电压 .....	80
6.5.3 图解法确定输入交变电流和输出交流电流 .....	81
复习题答案.....	85
练习题答案.....	89



## 引言

除了其他许多种类电子元件外，双极型晶体管不论是作为单一电子元件还是集成电路的组件，在电子领域中都得到广泛应用。例如在激励和反馈系统中（例如开关或者继电器驱动器），还有在娱乐性电器（例如前端放大器和输出放大器）和高效性能电器（例如相位控制器）中都能见到双极型晶体管的身影。

在“双极型晶体管及其基本电路”这本教材的第一部将介绍其结构，作用方式，构造，特征和极限值，如何使用数据手册以及晶体管基本电路。尽管教材中所使用的晶体管实例BCY 58在目前的新技术中很少使用，但是之所以选择这类晶体管，一方面是因为此型号包含较少晶体管而且在数据手册中有详细介绍，另一方面是因为如何使用数据手册是和晶体管的类型无关的。

在本教材的第二部分将特别介绍在低频放大器应用中广泛使用的共射极电路。文中将使用图表及数学注释对电路和电路分析进行说明。

## 1 双极型晶体管的构造与工作原理

在这一章将介绍双极型晶体管的构造及其工作原理，也是为能更好理解以后章节内容而必不可少的基础知识。

### 1.1 双极型晶体管的构造

在教材“电子技术基础1”和“半导体及其基本电路”中已经详细地了解了PN结的特性。通过附加反向偏置电压，空间电荷区（耗尽层）越宽，从而扩散势垒越大。这也抑制了多数载流子扩散电流（N极中的电子和P极中的空穴），只有微弱的少数载流子漂移电流（P极中的电子和N极中的空穴）流动。从而附加的反向电压形成了这股微弱的反向电流（漏电流），使其能够流过耗尽层。

通过补充载流子将增强这股反向电流，比如再附加一个在导通方向极化（正偏）的PN结便能够为此PN结补充载流子，从而增强反向电流。如果两块背靠背的PN结尽可能地靠近（距离十分之一微米左右），原则上称之为“双极型晶体管”，此外，因为能额外注入载流子，也被称为“注入型晶体管”。

**要 点：**

在双极型晶体管效应中一个PN结的反向电流将通过另一个在导通方向极化（正偏）的PN结注入载流子而被加强。

图1.1.1是双极型晶体管2种可能的晶区顺序构造及其二极管等效电路和符号。

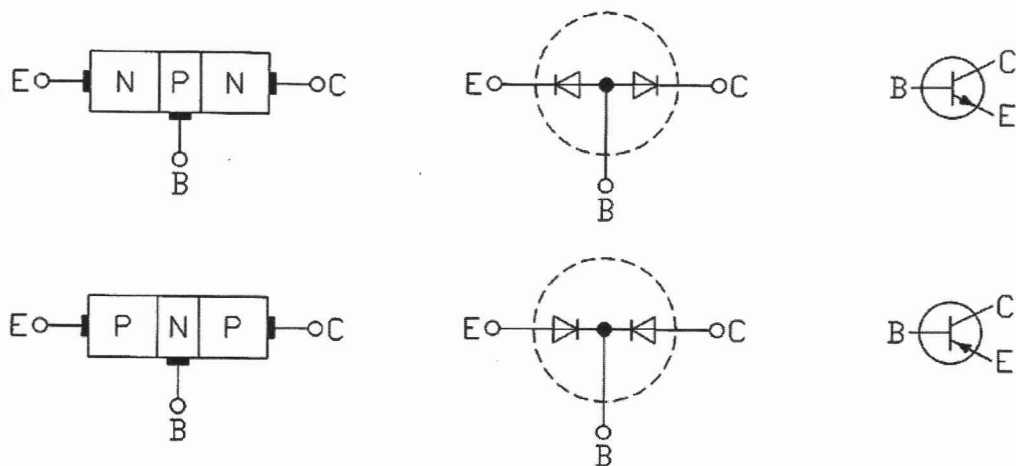


图1.1.1：双极型晶体管构造及其等效电路、符号

从图中可以看到一个双极型晶体管是由2个PN结、3个晶体块组成，根据不同的晶区顺序（PN结连接方式）可以分为NPN型晶体管和PNP型晶体管。而这2种晶体管是互补的，也就是说一个特定的NPN型晶体管可以由一个拥有等效数值的PNP型晶体管替代，而仅仅需要交换相应电压源的极性。在图1.1.1的左图中，左外侧的晶体块被为**发射极（E）**，因为它向中间的晶体块输送载流子。中间通常很薄（几个微米）而实际上起到控制晶体管作用的晶体块叫做**基极（B）**。右外侧晶体块因为“收集”电子而被称作**集电极（C）**。值得注意的是：外侧两区域晶体块（发

射极和集电极)的掺杂浓度远远高于中间层(基极),到达若干数量级,在1.2节中将更进一步了解到,这项工艺对于晶体管的功能具有决定性的意义。

**要 点:**

一个双极型晶体管是一个三极性模块,它由两个背靠背的PN结组成。根据连接方式的不同分为NPN晶体管和PNP晶体管。三个外部接点分别被称为基极,发射极和集电极。

图1.1.1中间部分是相应的二极管等效电路图,可以看到是由两个方向相对的二极管组成。这里要注意的是这只是一个非常简化的等效电路,决不能简单的认为一个晶体管可以用两个二极管模拟。

图1.1.1中在二极管等效电路的右侧是两种不同类型晶体管的电路标识。可以看到在NPN型晶体管中箭头指向发射极,而在PNP型晶体管中箭头指向基极。而外侧的圆圈代表晶体管的外壳,在电路设计中往往可以被省略掉。

**1.2 双极型晶体管的工作原理**

现在要介绍双极型NPN型晶体管的工作原理,注意图1.2.1。要提醒的是,图中实际电子移动方向被认为是电流方向!在技术性电流方向(通常指电子元件外部,从晶体管接口算起)应用中箭头恰恰应该是图中的反方向(见图1.2.2b中电流方向)!

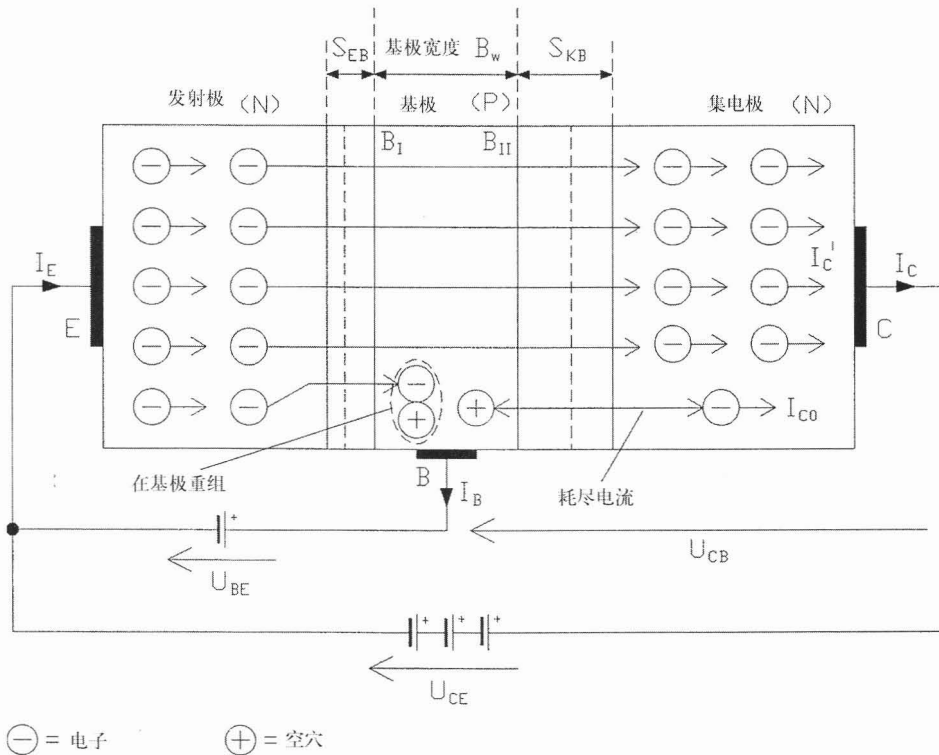


图1.2.1: NPN双极型晶体管工作原理

从图中可以看出,发射极-基极PN结由于电压 $U_{BE}$ 而在导通方向被极化。电压值相当于二极管的正向导通电压,对于锗管来说为0.1到0.3V左右,对于硅管大约为0.6到0.8V。集电极-基极PN结通过集电极-发射极电压 $U_{CE}$ 反向极化(反偏),因为实际应用中 $U_{CE} > U_{BE}$ ,因此集基电压

$U_{CB}=U_{CE}-U_{BE}$  为正值，也就是说集电极电位高于基极电位。由于导通极性，发射极与基极之间的耗尽层（图中 $S_{EB}$ ）总体来说要比集电极和基极之间的耗尽层（ $S_{KB}$ ）更窄。

### 功 能

通过在附加正偏电压 $U_{BE}$ 作用下，负极电子以发射极电流 $I_E$ 形式全部移动并聚集到发射极。电子在发射极是多数载流子（多子），并且以扩散电流的形式沿着发射极与基极之间的浓度梯度方向向基极发射电子，发射区电子注入基极后，变成了少数载流子（少子）。

基区非常狭窄，所以只有少量的电子与在基区的空穴再度符合。

在整个基区的宽度里，对于电子来说，从 $B_I$ 到 $B_{II}$ 的线性浓度梯度占据着主导作用，并且电子浓度在基区的 $B_I$ 部分最高。在基区注入的电子绝大部分（大约95%到99.9%）以扩散电流的形式沿着电子浓度梯度从 $B_I$ 穿过整个基区到达集电极与基极PN结的空间电荷区（耗尽层） $S_{KB}$ （图1.2.1中的电流 $I_C'$ ）。因为作用于载流子上的反向电场力，集电极-基极PN结的空间电荷区正处于反向极化（反偏）状态。而这个反向电场力是由作用于集电极和基极之间电压 $U_{CB}$ 的极性所决定的，它使得电子向集电极方向加速，并在集电极被“收集”。在集电层电子现在作为自由载流子（多子，因为集电极是N型掺杂），而且作为由发射极引起的集电极电流流出晶体管的集电极。

流经在反向方向极化（反偏）的集电极-基极PN结的同时还有反向电流，在图1.2.1中以 $I_{C0}$ 表示。它是由少子（少数载流子）而产生的场电流（PN结处于反向工作状态）：电子由集电极-基极PN结的空间电荷层流向集电极，而电子空穴流向基极。反向电流 $I_{C0}$ 在室温条件下相当微弱，相对于 $I_C'$ 一般情况下可以忽略不计。对于流经晶体管接口的集电极电流总量可以表示为：

$$I_C = I_C' + I_{C0} \quad (1.2.1)$$

从图1.2.1中可以看到，在两个空间电荷层 $S_{EB}$ ， $S_{KB}$ 中靠近基极的部分（从左虚线至 $B_I$ ，从 $B_{II}$ 至右虚线部分）都要比靠近外侧两个区域的部分宽。这是由于不同的掺杂浓度所导致的，因为在高掺杂浓度区域（发射极和集电极）注入的载流子能够大量而且迅速地再复合，所以这些区域的耗尽层必将相对更为狭窄。而基极自身掺杂浓度相当微弱，也就是说，将与杂质原子置换。

至此可以清楚知道，晶体管的功能不仅与掺杂比有关，更主要受基极的几何尺寸影响：基极越薄，到达集电极的发射极电流比率就越高。此外，发射极-基极PN结的导通极性和发射极正偏电压 $U_{BE}$ 也将影响晶体管的功能。但是如果基极无连接的话，将不会出现集电极电流。

### 要 点：

双极型晶体管在工作状态下的控制参数就是基-射极正偏电压 $U_{BE}$

至此可以说，通过在导通至反向范围内改变基极电阻，可以控制正偏电压 $U_{BE}$ ，借助集电极电流 $I_C$ 从而达到控制集-射回路电阻的目的。这也是“转移电阻器”名称的由来，集电极-发射极回路的“导通电阻”值范围可以从 $m\Omega$ 到 $G\Omega$ ！

除了集电极电流 $I_C$ 和发射极电流 $I_E$ 在晶体管基极接口还将有基极电流 $I_B$ 出现，参见图1.2.1。

**要 点:**

在一个双极型晶体管接口将有三种电流出现：发射极电流  $I_E$ ，集电极电流  $I_C$  和基极电流  $I_B$ ，三种电流的大小关系如下： $I_B \ll I_C < I_E$

从图1.2.1中可以得到三种电流之间关系的数学表达式：

$$I_C = I_E - I_B \quad (1.2.2)$$

此外，基极电流  $I_B$  是由以下分支电流组成：

a) 再复合电流  $I_{BB}$ 

正如已经提到过的，流入基极的电子有一小部分与电子空穴再复合，从而引起在基极端口的场电流（正向偏置电压  $U_{BE}$ ），同样可以看作流出基极的电子流。再复合的电子经基极流出，无法到达集电极。出于这个原因，流出的电子从激励技术角度看作是一种损耗。因此为了尽量降低此类损耗，应该尽可能地减小基极的宽度。

b) 再复合电流  $I_{EB}$ 

在发射极的N区和基-射极之间PN结的空间电荷区  $S_{EB}$  已经存在再复合现象，也就是说通过电子来填补空穴，这里不再进行进一步地阐述。再复合所需的空穴同样通过基极接口端流进来（也就是说电子流出基极）。由于再复合的原因所以不是所有的多子都能够到达基极。通过构造强非对称掺杂的PN结（发射极掺杂度远远高于基极）可以较少这类情况的发生。

c) 反向电流  $I_{C0}$ 

这里涉及到已经描述过的空穴电子流，它由空间电荷区  $S_{KB}$  流向基极（集电极-基极PN结此时处于反向偏置，见图1.2.1）。

再复合电流  $I_{BB}$  在这三种分支电流中占最大比重，也就是说，它可以用来代表基极电流  $I_B$ ！

从当前的叙述中可以看到，在晶体管工作状态下，既有正极载流子也有负极载流子的参与，这也是“双极型”这个名称的由来。

从另一个角度出发也可以看到，晶体管其实也是一个功率放大器。这是因为在实际工作状态下，电压  $U_{CE}$  远大于电压  $U_{BE}$ ，另一方面，集电极电流  $I_C$  只是略微小于（约为  $I_E$  的95%至99.9%）发射极电流  $I_E$ 。因此在集电极端的可支配能量又或功率（ $U_{CE} \cdot I_C$ ）大于在基极端的输入能量又或功率（ $U_{BE} \cdot I_B$ ）。

**要 点:**

双极型晶体管是一个起功率放大作用的电子元件，其间正负极载流子都参与工作。

要注意的是，在这一节所介绍的晶体管内部作用（特别是基极电流  $I_B$  的分支划分）应该作为背景知识去认识。在一般文献或教材中仅限于介绍电流  $I_B$ ， $I_E$  和  $I_C$ （经常也涉及到  $I_{C0}$ ），然后只是利用公式1.2.2将它们联系起来！在图1.2.2a中总结了介绍过的各类内部特性与关系，在图1.2.2b中

是相应的电压和电流标识（技术性电流方向。译者注：有别于之前介绍晶体管内部特性时使用的电流方向）。

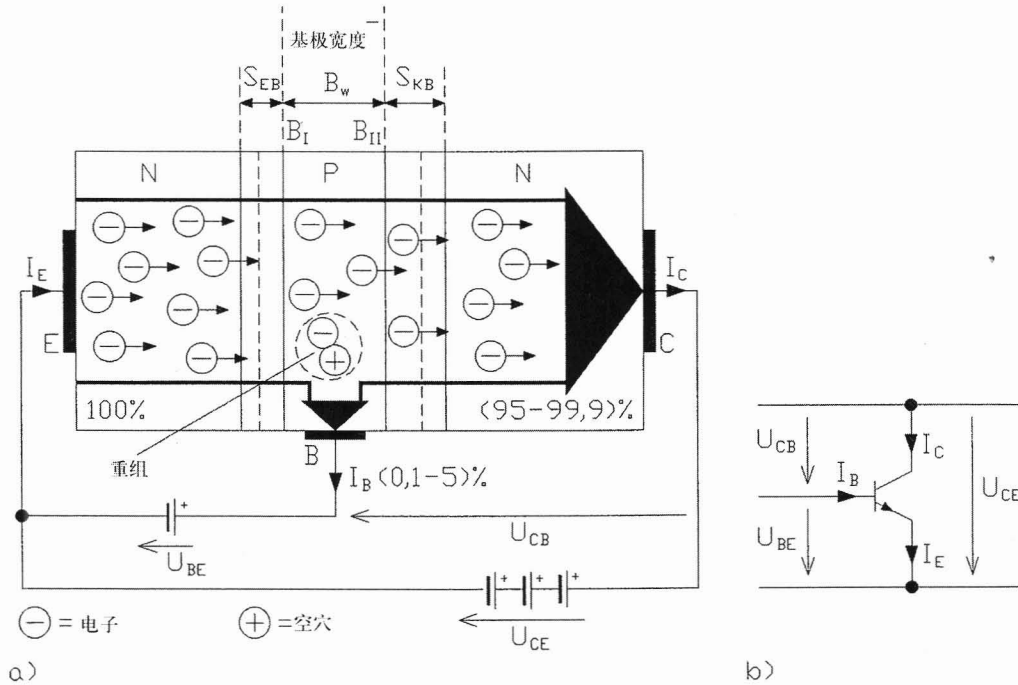


图1.2.2: 双极型晶体管工作原理简略图

- a) 晶区顺序, 电压和电子移动
- b) 电压和与技术性电流方向相符 (与电子移动方向相反) 电流的电路图

### 1.3 双极型PNP晶体管工作原理

前面对于双极型NPN晶体管工作原理的描述对于PNP型晶体管同样有效。相对1.2节内容只需调整空穴和空穴电子移动方向，将其反向就能得到在PNP型晶体管内部电子移动方向。除此之外还需倒转电压源的极性。此时发射极电位相对基极电位为正数（电压 $U_{BE}$ 为负）并且集电极电位为负数（电压 $U_{CB}$ 为负！）。如果思考片刻便能很容易明白到，此时发射极-基极PN结再次工作在导通状态，而集电极-基极PN结再次在反向状态工作。

#### 总结

在这一章中描述了双极型晶体管的结构及其工作原理。可以清楚地了解到，晶体管是由两个不同极性的PN结组成。根据晶区顺序不同可分为NPN型和PNP型晶体管，三个接口端被称为发射极，基极和集电极。双极型晶体管的功能是通过用一个导通方向极化（正偏）的PN结来放大另一个PN结的反向电流而实现的。