

经济管理院校试用教材

电子技术概论

全国经济管理院校
工业技术学研究会 编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书为全国高等院校经济类专业的试用教材。全书共分九章,内容包括:电子技术的特点和发展动态;半导体器件基础知识;晶体管交流放大器;正弦波振荡器;脉冲数字电路基础;整流和稳压电路;可控硅元件及应用;电子工业企业及仪器仪表的管理。

本书由浅入深,除了作教材外,亦可作为工矿企业经济管理人员参考书。

经济管理院校试用教材

电子技术概论

全国经济管理院校
工业技术学研究会 编

上海科学技术出版社出版
(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印十二厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10.5 字数 243,000

1985 年 9 月第 1 版 1985 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—15,700

统一书号: 15119·2451 定价: 2.00 元

前 言

经中央有关领导部门批准成立的全国经济管理院校工业技术学研究会,是经济管理院校从事工业技术学教学和科研工作者的全国性学术组织,其任务是统一组织从事工业技术学教学、科研工作者交流、研究该学科在教学和科研方面的经验和成果,推动学科的发展,促进课程的建设和改革。

经济管理院校开设工业技术学课程的专业很多,包括:工业经济,工业企业管理,管理工程,物质管理,基本建设经济,国民经济计划,工业统计,工业会计,财政,金融,物价,劳动经济,政治经济等。根据经济类专业的要求,工业技术学课程在课程设置、内容选择及教学法等各方面与工科专业有明显不同的特点,在总体上它要反映工业生产的一般或典型的规律,具体则要反映各有关工业部门生产技术的基本规律,包括:部门特点,生产过程及其组织,工艺方法、原理及其选择等。选材上特别强调要从组织、管理者的角度突出组织和经济分析的研究和论述,内容上既要有适合经济工作者需要的广度,又要求具有管理工作者的要求的一定深度。

尽管经济类各专业的教学计划在工业技术学课程设置的门数上有所不同,而在开设同一课程的学时分配上仍较接近。但从全国经济管理院校来说,至今尚缺乏一套适合于经济管理专业要求的统一教材,为了适应当前各类经济管理院校以及其他各种形式在职经济管理人员学习本课程的需要,一九八三年一月于江西南昌召开了全国经济管理院校工业技术学教材编写会议,统一研究并组织了四本教材即《机械制造概论》、《钢铁生产概论》、《电工电力概论》、《电子技术概论》的编写工作,并于同年五月至八月分别在南京、大连、成都和长春集中讨论制订了各课统一大纲,并确定各书的编写分工。

《电子技术概论》编写分工如下:第一、二章由江西财经学院李福苟编写;第三章由北京经济学院于星元编写;第四章与实验二由吉林工业大学张国明编写;第五章与实验一由上海财经学院吴龙生编写;第六章与实验三由暨南大学关卓雄、戴明淡编写;第七章由湖南财经学院黄敬编写;第八章由张国明、黄敬编写;第九章由吉林工业大学张国明编写。本书由张国明、于星元主编,吴龙生统校。

由于我们水平有限,经验不足,错误及不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

全国经济管理院校
工业技术学研究会
一九八四年十一月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第二章 半导体器件基础知识	4
2-1 半导体基本知识	4
2-2 PN 结	7
2-3 晶体二极管	9
2-4 晶体三极管	11
习题	18
第三章 晶体管交流放大器	19
3-1 单管交流放大器的组成	19
3-2 放大器的工作原理和基本分析方法	21
3-3 偏置电路和工作点的稳定	29
3-4 用等效电路法分析放大器	32
3-5 多级放大器	35
3-6 放大器中的负反馈	38
3-7 射极输出器	41
3-8 低频功率放大器	43
习题	49
第四章 直流放大器	51
4-1 直接耦合直流放大器	51
4-2 差动放大电路	53
4-3 具有恒流源的差动放大电路	56
4-4 集成电路运算放大器	57
4-5 运算放大器的应用	60
习题	63
第五章 正弦波振荡器	65
5-1 LC 振荡电路中的振荡现象	65
5-2 LC 振荡器的基本原理	68
5-3 LC 振荡器电路	71
5-4 LC 振荡器的应用实例	75
习题	76
第六章 脉冲数字电路基础	78
6-1 RC 电路	7
6-2 晶体管的开关特性	
6-3 门电路	
6-4 双稳态电路	

6-5 集成电路触发器	97
6-6 寄存器	100
6-7 计数器	101
6-8 译码器和数字的显示	104
习题	108
第七章 整流和稳压电路	110
7-1 单相半波及全波整流电路	110
7-2 三相桥式整流电路	113
7-3 滤波电路	115
7-4 硅稳压管及稳压电路	119
习题	124
第八章 可控硅元件及应用	125
8-1 可控硅元件的构成及工作原理	125
8-2 可控硅的伏安特性及控制特性	126
8-3 双基极二极管触发电路	128
8-4 单相半控桥式整流电路	130
第九章 电子工业企业及仪器仪表的管理	133
9-1 电子工业企业的任务、责任和权益	133
9-2 电子工业企业管理的内容	134
9-3 企业经营管理好的标志	136
9-4 仪器仪表的日常管理	138
实验	142
一、万用表的使用方法及晶体管的简易测试	142
二、单管低频电压放大器	145
三、数字电路	147
附录	153
一、半导体器件型号命名方法	153
二、常用半导体器件的参数	154
三、集成电路型号命名方法	158
四、数字化转速量测系统	158

第一章 绪 论

我国经济建设的发展,特别是我国四个现代化宏伟目标的实现,需要大批既懂得社会科学又懂得自然科学的人材。现代经济建设和现代管理科学理论都证明了现代管理人员必须具备相当程度的自然科学知识。随着科学技术的发展,企业中科学技术的作用大大提高,技术进步的速度大大加快,新材料、新工艺、新产品层出不穷。这在企业管理中必然要反映这些科学技术的发展规律。只有掌握这些规律,才能正确分析企业的经济活动,及时准确地作出科学的结论。另一方面,当先进的科学技术转化为经济实力的时候,必然伴随新型产业的出现,以及管理机构和管理方式的变革。当前,一场新的技术革命正在世界兴起,其中,电子技术的发展,尤为引人注目。其理论学科《电子学》,几十年来发展之迅速,范围之广泛为任何其它科学所不及。电子学不仅使电子工业成为国民经济发展的强大动力,而且它已经渗透到工农业生产、国防建设、企业管理、社会服务、教育及日常生活等各个方面。为了适应世界新技术革命和我国四化建设的发展,管理人员学习电子学知识是十分必要的。

1. 电子学的发展概况

电子学兴起于本世纪 30~40 年代。1873 年麦克斯韦提出了电磁波学说,为无线电技术的发展奠定了理论基础。上世纪末所发明的第一架火花式发报机,首次将电磁波应用于无线电通信,为无线电技术开辟了新纪元。后来,真空二极管和三极管的相继出现,不仅使通信技术有了很大的改进,而且为早期电子技术的发展开辟了道路。随着对真空管(第一代电子器件)的深入研究,电子运动理论逐步建立,新型真空电子器件纷纷出现,应用领域也在不断扩展。1945 年以后,工业电子学的出现,使电子学的应用扩展到工业生产。所以,电子学早期涵义被认为是研究由电子运动所组成的器件,利用这些器件组成的电路和系统被广泛应用在通信、广播和工业控制中。

随着科学技术的发展,新型电子器件不断涌现。50 年代晶体管(第二代电子器件)以其体积小、重量轻、耗电低、寿命长、工作可靠等突出优点逐步取代真空管,但真空管也正在向着大功率应用和其它一些特殊应用方面发展。到了 60 年代,出现了第三代电子器件——集成电路。

集成电路是一种采用特殊工艺,把晶体二极管、三极管和电阻等元件直接制作在一小块晶片上,并组成具有一定功能的新型电子器件。它实现了材料、元件、电路三者间的统一,同传统的电子元件的设计与生产方式、电路结构有着本质的不同。集成电路的出现和应用开创了电子学向微电子学突飞猛进的新时代。

另一方面,电子技术同光技术相结合产生了光电子学;同机械技术相结合产生机械电子学;同生命科学相结合将产生仿生电子学与生物电子学等等。

因此,电子技术的发展,特别是集成电路和计算机技术的发展使电子学具有更新更广的涵义,它不仅包括人们所熟悉的通信和电子系统(如通信、广播、电视、雷达、导航,电子对抗等整机以及高频、微波和热设备)以及信息的传递和处理,电路和电磁场的理论和技术,各类

真空和固态电子元器件等,而且还包含了象自动控制、电子计算机这样一些新兴学科,并和信息论、控制论、系统工程等学科互相交织和渗透。

进入 80 年代以后,电子技术的发展主要是集成电路技术和计算机技术的发展。

集成电路经历了小中规模到大规模、超大规模的发展阶段。人们将每个芯片上包含一千到一万个门电路称为“大规模集成电路”,将每个芯片上包含一万到十万个门电路称为“超大规模集成电路”。超大规模集成电路第一代 64 千位存贮器已经批量生产,而第二代的 256 千位存储器也已进入了试制阶段。

集成电路工业是一种现代科学技术高度密集、超净、超纯、超精细的制造业。大规模及超大规模集成电路的生产必须借助于计算机进行系统集成的设计、高自动化的生产与测试。因此,大规模、超大规模集成电路被誉为整个现代工业基础的“金字塔尖上的明珠”。

展望 90 年代,将会开发出比大规模、超大规模集成电路的功能有飞跃提高的新型功能器件,其研究和开发的重点是超晶格器件,三维集成电路和增强集成电路。

所谓超晶格器件,是一种利用晶体呈现新电子效应(负阻效应)的器件,关键是要使晶体的极限结构控制到原子级。超晶格器件能在常温下进行超高速、超高频工作,速度和频率性能可望比现有半导体器件提高 10~100 倍。

由于现有二维平面结构,超大规模集成电路的集成度将趋向饱和点,为了进一步提高集成度,人们提出了三维集成电路的设想,重点是迭层高密度集成电路和迭层多功能集成电路。

所谓增强集成电路是指抗辐射性、耐高温性、耐振动冲击等性能特别增强的集成电路。目的是要装备出在宇宙空间、原子反应堆、飞机等特殊环境中可靠工作的电子设备。

集成电路的广泛应用,迅速推进了其它电子技术部门的发展。如邮电通信中的微波通信、卫星通信、分散处理的网络式通信等;雷达技术向数字化方向发展;自动测试技术迅速趋于智能化;

集成电路的发展也促进了材料技术的发展。除了现有的半导体材料、记录存贮用磁性材料、各种电子陶瓷材料以外,正在研制和开发的材料有光导纤维、半导体激光以及各种传感材料。

大规模和超大规模集成电路在计算机技术中的应用,使电子计算机开始向第四代过渡,出现了各种单片或多片式微型计算机,以及由大规模集成电路或微处理机组合的所谓“超小块”结构计算机系统。

随着计算机的普及,计算机技术与通信技术相结合,出现了计算机网络。它使应用程序和通信程序分散,以及通信管理分级分层等。

我国的电子科学技术和电子工业,自解放后在党和政府的关怀下,获得了很大的发展,逐步建立了我国完整的电子工业体系和电子科研机构。

在科研方面,已经取得了一些接近世界先进水平的成就,例如我国人造卫星的发射和回收、大规模集成电路的研制、我国千万次大型计算机和亿次巨型计算机相继研制成功。

在电子工业生产方面,已经能够生产各类数字微波通信设备、大容量同轴载波通信设备、卫星通信地面站、机载和船载通信导航电子设备、光通信设备等。

在集成电路方面,近年来有了很大的发展。象多晶硅、单晶硅、超净高纯化学试剂等几百种原辅材料进展很快,现基本能满足当前科研和生产的需要。

在其它方面,如投影光刻机、高能离子注入机、综合测试设备等高、大、精、尖的大型设备都相继研制成功,有的设备的某些指标已达到国际水平。

目前,我国电子技术水平与国际先进水平相比,还处于相对落后阶段。为了建立强大的电子工业,我国决定把电子工业放到战略重点的地位,在当前兴起的第四次产业革命中,努力赶超世界先进水平。

2. 电子学的特点

随着电子学迅猛发展,其应用几乎涉及人类活动的一切领域。因此,电子学的广泛性、快速性、多样性的发展,不能不认为这是它的特点之一。当前,以集成电路和微处理机为中心的微电子技术的蓬勃发展,使电子产品更新、周期缩短,同时小型化、多功能化、高性能化、智能化以及低消耗、低耗能一直作为产品追求的目标;以智能机器人为中心的所谓微电子革命正把人们带到全自动化时代。这是电子学发展的特点之二。电子学以其独有的力量为人类提供信息资源,造福于人类社会。

由此可见,电子科学技术,特别是电子计算机的高度发展及其在生产领域中广泛应用,不仅可以模拟人的感觉和思维,把人们从大量的、繁重的、简单的劳动中解放出来,而且可以逾越人体机能的限制,在检测、计算、判断、控制等方面,完成人们无法承担的任务,为我们提供崭新的生产手段,有效的科学实验和组织管理方法,把生产自动化提高到一个新的水平,从而获得当代最高的劳动生产率。

第二章 半导体器件基础知识

半导体器件是近几十年才发展起来的新型电子器件。随着半导体技术的飞速发展,半导体器件由开始的晶体二极管、晶体三极管等简单器件发展到目前的半导体集成电路、大规模及超大规模集成电路。在生产和应用上都达到了一个新的水平和规模。

在半导体器件产品中,目前应用最广的仍是晶体二极管和晶体三极管。因此,本章先讨论半导体的基本知识,然后介绍晶体二极管和三极管,为以后学习其它的半导体器件及电子电路打下基础。

2-1 半导体基本知识

1. 什么是半导体

自然界中,各种物体,按其导电能力来讲,可分为导体,半导体,绝缘体三大类:

(1) 导体 如金属中的银、铜、铝等很容易导电,被称为导体。这是因为在金属内部存在大量的可以自由移动的带电粒子的缘故。

(2) 绝缘体 如塑料、橡胶、陶瓷等很难导电,被称为绝缘体。这是因为绝缘体内部几乎没有可以自由移动的带电粒子的缘故。

(3) 半导体 它的导电能力介于导体和绝缘体之间,如硅、锗、硒等元素和砷化镓等化合物。我们知道,半导体内部存在的可以自由移动的带电粒子数量介于导体与绝缘体之间。如果以表征不同物体导电性能的电阻率这个物理量来划分导体、半导体和绝缘体,则它们的电阻率范围如下:

导体: $10^{-6} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$

半导体: $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$

绝缘体: $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上

半导体的导电能力与金属相比,它们的电阻率不仅在量上有所不同,而且更重要的是具有质的区别。

1) 金属的电阻率随着温度上升而增加,半导体的电阻率随温度上升而减小。

2) 金属的电阻率与温度关系较小,一般温度每上升 1°C ,其电阻率仅增加 $0.4 \sim 0.5\%$,而半导体的电阻率受温度影响显著,温度每上升 1°C ,其电阻率减小约 $3 \sim 6\%$ 。

3) 光照不影响金属的电阻率。但有些半导体对光照反应很敏感,有光照时,电阻率大大减小,无光照时,就象绝缘体那样不导电。

4) 金属导体内含有杂质几乎不影响它的导电能力。但在半导体内掺入微量的某种杂质,将使电阻率显著减小。

正是由于半导体具有如上特性,人们才可以制造出半导体热敏元件和光敏元件,以及二极管、三极管、场效应管、可控硅、半导体集成电路等等各种半导体器件。

那么, 半导体为何有如此特性呢? 下面以硅、锗这两种使用最多的半导体材料为例, 分析一下半导体物质的内部结构和导电机理。

2. 本征半导体

本征半导体是指纯净的内部原子排列非常有规则的半导体。将硅或锗材料提炼纯净, 通过所谓“拉单晶”的过程, 使整块半导体内部的原子排列非常规则, 即成为“单晶体”。由于用来制造半导体器件的半导体材料都具有这种晶体结构, 故又称之为晶体, 用它制造的管子又称为晶体管。

硅和锗都是四价元素, 原子最外层都是四个电子(称为价电子)。它们离原子核最远, 因而受原子核的束缚最小, 稍受外界影响(如温度升高使电子动能增大)就容易摆脱原子核的束缚而成为自由电子。图 2-1 是它们的原子结构平面示意图。

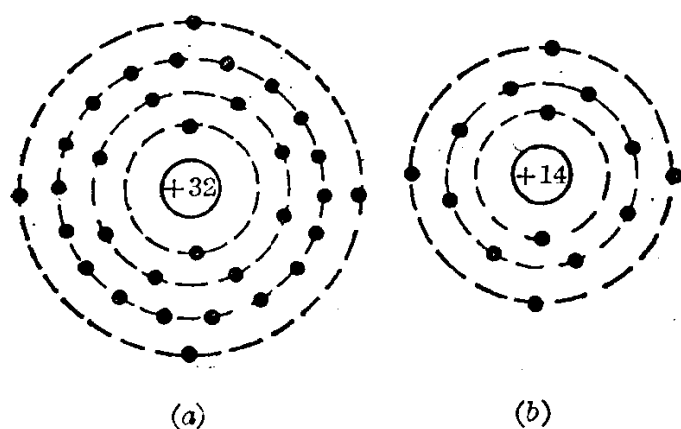


图 2-1 锗和硅原子结构平面示意图

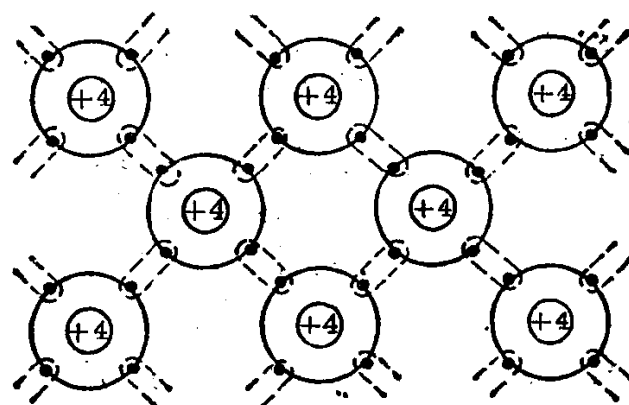


图 2-2 锗或硅单晶体结构平面示意图

当大量的硅或锗原子整齐排列而形成单晶体时, 每一个原子与相邻的四个原子相结合, 每个原子中的价电子同时受到本身原子核与相邻原子核的共同作用, 于是每两个相邻的原子各有一个价电子为两者所共有, 形成一对电子对(原子间的这种结构称为共价键结构)。每两个相邻原子都靠一对共价键结合在一起。因此, 每个原子都有四对共价键将它与相邻的四个原子结合在一起, 构成了一个比较稳定的共价键结构。图 2-2 是硅或锗单晶体的共价键结构平面图(实际原子的排列是立体的, 每一个原子的四个邻近的原子各占据四面体的一个顶点)。

在绝对零度(-273°C)时, 所有的价电子都束缚在共价键内。图 2-2 中所表示的正是这种情况。此时, 本征半导体中没有自由电子, 相当于绝缘体。但是一般环境温度都比绝对零度高得多, 共价键中价电子都具有一定的能量。例如在室温下, 就有相当数量的价电子受热的激发, 获得足够的能量, 摆脱原子核的束缚, 脱离共价键而成为自由电子。温度越高, 获得足够能量的价电子越多, 本征半导体内的自由电子也就越多。

当共价键中的价电子成为自由电子以后, 便在该共价键中留下一个空位置, 这种空位置称为空穴, 空穴所在的那个原子由于失去了电子而变成正离子, 或者说, 哪里有空穴, 那里便

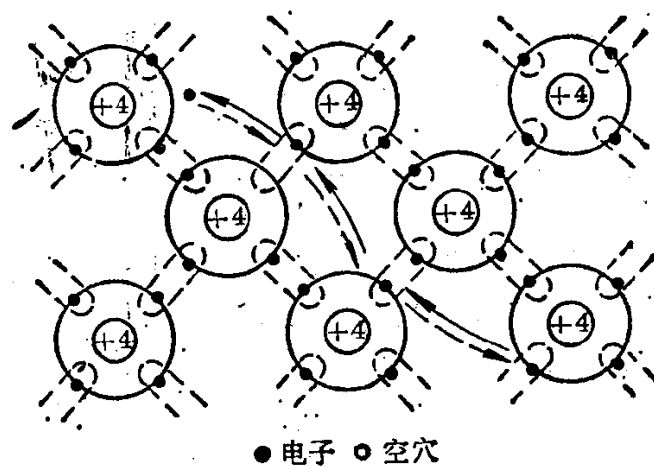


图 2-3 热运动产生的电子-空穴对

显出带正电,因此可以认为空穴是带正电荷的。显然,在本征半导体中,自由电子(带负电)和空穴(带正电)是成对产生的,形成所谓电子-空穴对。这种现象称为本征激发,如图 2-3 所示。

在激发的同时,自由电子也会跳回到空穴中,这个过程称为电子与空穴的复合。在一定温度下,激发与复合达到动态平衡,本征半导体中自由电子与空穴便维持一定的数目。

半导体中,自由电子可以自由移动,空穴亦是如此。有空穴的原子很容易从相邻原子那里拉过一个价电子来补充这个空穴。同时,失去了价电子的相邻原子的共价键中就出现了另一个空穴。同理,它又可以由另一个原子中的价电子来填补,而在该原子中又出现一个空穴。这样依次进行下去,就象空穴在运动,并且它的运动方向正好与填补空穴的价电子运动方向相反。因为空穴是带正电的,所以空穴的运动可以认为是正电荷的运动。应当指出,空穴的运动,实质上是在共价键内受束缚的价电子填补空穴所产生的运动。以空穴的运动来代替这种受束缚的价电子的运动,是为了将这种价电子的运动与自由电子的运动相区别。通常,在半导体内,自由电子和空穴都作无规则的运动,因而不形成电流。当在半导体两端加上电压时,自由电子就跑向电源的正极,空穴跑向负极。这样,在半导体内就存在两种带电粒子即自由电子与空穴的运动,这种运动形成了两种电流:一是自由电子的定向运动所形成的电子电流;二是空穴的定向运动所形成的空穴电流。两种电流的方向是相同的(虽然自由电子和空穴的运动方向刚好相反)。由于自由电子和空穴都运载电荷,因此统称它们为“载流子”。半导体中不仅存在电子导电,而且存在空穴导电,这正是半导体导电方式的最大特点。

在常温下,本征半导体中的载流子数目是非常少的。如在室温(300K)时,每 3×10^{12} 个硅原子中才有一对电子-空穴对,每 2×10^9 个锗原子中才有一对电子-空穴对。因此,本征半导体能力是极差的。

3. 杂质半导体

在本征半导体中,例如在硅单晶体中,可以用扩散的方法掺入少量其它元素的原子。由于所掺元素的原子数很少,对半导体基体而言,它被称为“杂质”。掺有杂质的本征半导体称为杂质半导体或掺杂半导体。掺杂之后,整个半导体晶体结构基本不变,杂质原子很稀疏地分布在半导体中,占据一些硅原子的位置,形成一个杂质原子与周围四个相邻的硅原子的共价键结构。

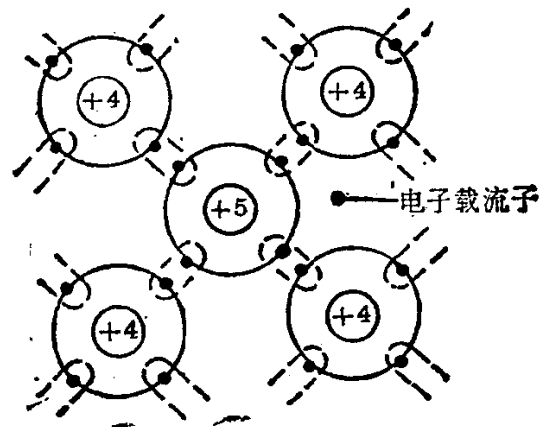


图 2-4 N 型半导体

杂质半导体,根据所掺杂质的不同,可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

(1) N 型半导体 在本征硅(或锗)中掺入少量的五价元素,如磷元素。磷原子最外层有五个价电子。当磷原子在晶体中与四个相邻的硅原子相结合时,它将以四个价电子与硅原子的价电子组成四对共价键,其多余的一个价电子必然在共价键之外,原子核对它的束缚力较弱,因而很容易摆脱原子核的束缚而成为自由电子,该磷原子则成为不能移动的正离子,如图 2-4 所示。在常温下,几乎所有掺入的磷原子中多余的那个价电子都会成为自由电子。因此在同一温度下,半导体中的自由电子较本征半导体的大量增多,其电阻率大大下降,亦即其导

电能力大大增加。这种半导体的主要导电方式是自由电子导电，故称之为电子半导体或N型半导体。

在N型半导体中，除掺入杂质所产生的自由电子外，还存在着原来本征激发所产生的少量电子-空穴对。不过，由于自由电子数目增多，使得电子与空穴的复合增加，从而使为数很少的空穴进一步减少。所以，在N型半导体中，自由电子占多数，称为多数载流子(简称多子)；空穴是少数，称为少数载流子(简称少子)。

(2) P型半导体 在单晶硅(或锗)中掺入三价元素，如硼元素。硼原子也会取代一个硅原子的位置，但它的最外层电子只有三个。因此，在硼原子与硅原子构成的共价键中，因缺少一个电子而产生了一个空穴，如图2-5所示。这个空穴对周围产生影响，附近硅原子共价键中的电子，很容易跳过去

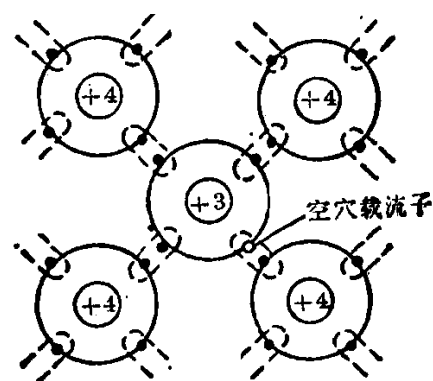


图2-5 P型半导体

填补这个硼原子的空穴，使硼原子成为负离子，同时在附近造成一个空穴。这样，在半导体中就产生了大量的空穴，其电阻率也将大大地下降。这种半导体将以空穴导电为主要导电方式，所以，称为空穴半导体或P型半导体。其中空穴密度远大于自由电子密度，故空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

应当注意，不论是N型半导体还是P型半导体，由于所掺杂质原子都是中性原子，故不论杂质半导体内带电粒子数目如何变化，宏观地看，整个晶体仍然是不带电的。

2-2 PN 结

由上述可知，掺入杂质对提高半导体的导电能力起着主导作用，但掺杂的意义还远不止于此。只有当以某种方式使得P型半导体与N型半导体相结合，在它们相接触的交界面上形成一层所谓PN结的时候，才充分体现了掺杂的意义，由此才产生了晶体二极管、三极管等半导体器件。因此，PN结也是一切半导体器件的共同基础。掌握PN结原理，尤为重要。

1. PN 结的形成

在一块晶片上，采用某些工艺方法，使得晶片的两侧分别形成P型半导体和N型半导体，而在它们两者的交界面上就会形成PN结。图2-6是形成PN结的示意图。

图中，在P型半导体内，空穴是多数，以“ $\circ$ ”表示，自由电子是少数，以“ $\cdot$ ”表示，同时以 $\ominus$ 表示三价杂质原子(如硼原子)得到一个电子所形成的负离子。在N型半导体内，空穴是少数，自由电子是多数，表示方法刚好相反，同时以 $\oplus$ 表示五价杂质原子(如磷

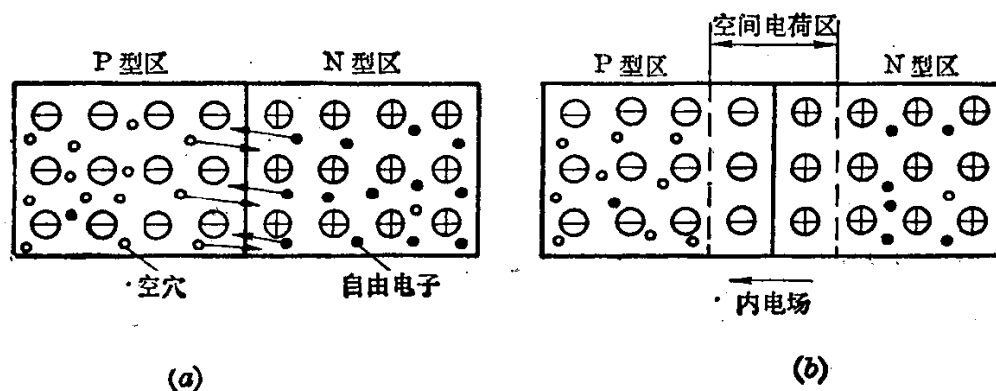


图2-6 PN 结的形成

原子)失去一个电子所形成的正离子。显然,在交界处两边,同种载流子的密度相差很大。在这种密度差的作用下,P区多数载流子空穴必然要向空穴极少的N区散开。扩散首先在界面附近进行。当靠界面附近P区的空穴扩散到N区之后,立即被N区的自由电子复合,同时在界面附近的P区一侧显露出不能移动的杂质负离子,形成了一个负电荷层。同样,N区的多数载流子自由电子也要向自由电子极少的P区扩散,并被P区的空穴复合,同时在界面附近的N区一侧显露出杂质正离子,形成了一个正电荷层。于是在交界处两侧便形成了一个空间电荷层,这个空间电荷层就是PN结。

显然,多数载流子向对方扩散越多,空间电荷层就越宽。是不是直到界面两边的电子和空穴密度都均匀分布了,扩散才停止下来呢?不是的。这是因为界面两侧的正负电荷在交界处形成了一个内电场,其方向是从带正电荷的N区指向带负电荷的P区,如图2-6(b)所示。可见由P区向N区扩散的空穴以及由N区向P区扩散的自由电子在空间电荷层内部都将受到内电场的阻碍。空间电荷层越宽,内电场则越强,多数载流子的扩散运动所受的阻碍作用就越大。不仅如此,对于少数载流子(即P区的自由电子和N区的空穴)而言,内电场将推动它们越过空间电荷层,进入对方。这种在电场作用下,少数载流子有规则的运动称为漂移运动。

由此可见,在交界面处,发生着下面两种既相联系又相矛盾的运动趋向:

- (1) 多数载流子因密度差所产生的扩散运动,同时形成空间电荷层,建立内电场。
- (2) 少数载流子在内电场的作用下所产生的与扩散方向相反的漂移运动。

在PN结开始形成的时刻,多数载流子的扩散运动占优势,随着扩散运动的进行,空间电荷层逐渐加宽,内电场逐渐加强,使得少数载流子的漂移运动逐渐增强而多数载流子的扩散运动逐渐减弱。最后,扩散运动与漂移运动达到动态平衡,即有多少载流子扩散进入对方,便有相同数量的载流子漂移回来。换句话说,即由多数载流子扩散形成的扩散电流与少数载流子漂移形成的漂移电流,方向相反,大小相等。此时,空间电荷层的宽度基本稳定,

PN结就处于相对稳定的状态。

2. PN结的单向导电性

把已形成PN结的半导体晶体接上外部电源,则PN结的导电性能如何?下面来讨论这个问题。

如果在PN结上加正向电压,即将电源的正极接P区,负极接N区,如图2-7(a)所示。此时,电源所产生的外电场在晶体

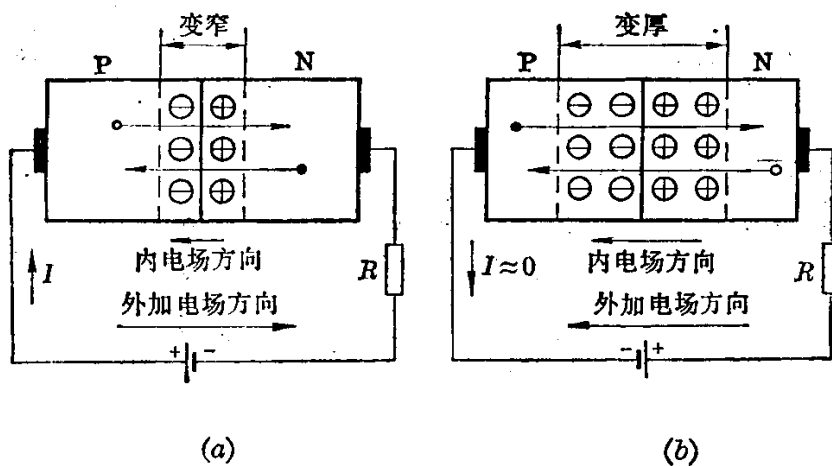


图2-7 PN结的正反向电压

内部的方向与PN结的内电场方向相反。在外电场的作用下,P区的空穴进入空间电荷层,抵消了一部分负电荷;同时,N区的自由电子也进入空间电荷层,抵消了一部分正电荷。于是整个空间电荷层变窄,内电场被削弱,它对少数载流子的漂移运动减弱,多数载流子的扩散运动增强,形成了较大的扩散电流(包括空穴扩散电流和电子扩散电流,两者电流方向相同),其方向由P区指向N区。这种多数载流子形成的扩散电流称为正向电流。外部电源则不断地向半导体提供电荷,维持这一正向电流。当外部电压升高,内电场将进一步

削弱,正向电流就要增大。在一定范围内,电压越高,正向电流越大。

如果在PN结上加反向电压,即将电源的正极接N区,负极接P区,如图2-7(b)所示。则电源外电场与PN结内电场方向一致。外电场将空间电荷层P区一侧的空穴和N区一侧的自由电子向背离空间电荷层的方向驱使,使得更多的正负离子显露出来,正负电荷增加,空间电荷层变宽,内电场增强。于是,多数载流子的扩散运动难以进行,只有少数载流子作漂移运动,即在外电场的作用下,P区的自由电子和N区的空穴都不断地越过PN结进入对方,外电路电源也不断给予电荷补充,因而形成反向电流,其方向是由N区指向P区。由于反向电流是由少数载流子漂移运动所形成,而少数载流子是由本征激发所产生的,因此,反向电流具有三个特点:一是反向电流很小;二是在温度不变时,少数载流子密度不变,所以所加反向电压在一定范围内变化,反向电流基本不变;三是温度越高,反向电流越大。这是因为本征激发情况受温度影响很大的缘故。因此,半导体器件温度特性较差。

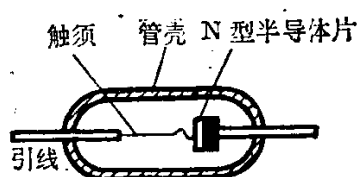
由上述可知,PN结加正向电压时,PN结可以通过较大的正向电流,PN结呈现一个较小的正向电阻;PN结加反向电压时,只有很小的反向电流通过,PN结呈现一个很大的反向电阻。因此说,PN结具有单向导电特性。

2-3 晶体二极管

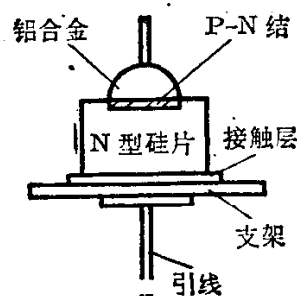
1. 基本结构

目前,晶体二极管种类很多,但其基本结构都是由PN结加上欧姆接触电极、引出线和管壳构成。常用的有点接触型,面接触型和平面型等二极管。

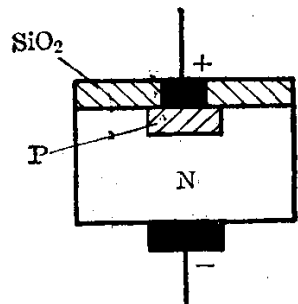
(1) 点接触型二极管 其管芯结构见图2-8(a)。用一根细金属丝压在锗或硅的晶片上(一般是用N型锗,制造锗管),通过电处理,部分金属原子掺入晶片中,从而形成PN结。其特点是金属触丝很细,PN结的接触点小,不能通过很大的电流。正由于触点小,结的面积小,结电容亦小,因此工作频率高。主要用于高频和小功率的场合,如检波、脉冲电路或小电流的整流。



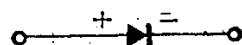
(a) 点接触型



(b) 面接触型



(c) 平面型



(d) 二极管的符号

图2-8 二极管结构和符号

(2) 面接触型二极管 管芯结构见图2-8(b)。它是采用合金法将合金小球经高温熔化在晶片上,形成PN结。其特点是PN结面积大,允许通过较大的电流,但其结电容大,只能在较低的频率下工作。一般用来作低频电路的整流。目前,最常用的是硅合金整流管,其工作温度可达150~200°C。

(3) 硅平面型二极管 其管芯结构见图2-8(c)。它是采用扩散等工艺在晶片上形成PN结的。PN结面积较大的,结电容大,可以通过较大电流,适用于大功率整流。结面积较小的,结电容小,适用于在脉冲数字电路中作开关管。

二极管的符号如图2-8(d)所示。

2. 二极管伏安特性

所谓二极管伏安特性就是指加到二极管两端的电压与通过二极管的电流之间的关系曲线。它反映了二极管的电特性,在电子技术中被广泛应用。图 2-9 中画出了硅二极管的伏安特性曲线。该曲线分为三个部分来讨论:

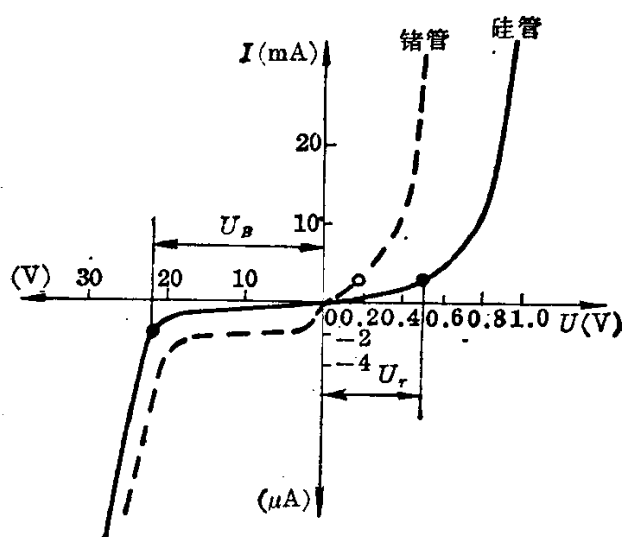


图 2-9 二极管的伏安特性曲线

和 0.2 V 左右。当二极管的电流较大时,电流与电压的关系近似直线关系,并且电流增长迅速。

(2) 反向特性部分 在二极管两端加上反向电压,二极管内少数载流子的漂移运动形成了很小的反向电流。一般硅二极管的反向电流在几个微安以下,锗管的反向电流比硅管大几十到几百倍。由前面对 PN 结的分析知道,二极管的反向电流,在一定的反向电压值范围内,其大小基本不随反向电压而变化,在曲线上表示为呈水平直线,所以通常称之为反向饱和电流(锗二极管的反向特性不完全呈水平,这是由其它原因而引起的漏电流造成的)。另一个特点是二极管的反向饱和电流受温度影响显著。

(3) 反向击穿部分 当二极管两端所加反向电压大到超过某个值时,二极管的反向电流突然急剧增加。这种情况称为二极管的反向电击穿(即 PN 被击穿)。这是因为外电场过强,在 PN 结内有可能将大量价电子从共价键中拉出(掺杂较大时容易出现),或者是强电场使电子运动加速,与原子碰撞,将大量的电子从原子中击出,两者的结果都会产生新的大量的电子-空穴对,少数载流子数目急剧增加,使得反向电流急剧增加。这个引起击穿的电压称为反向击穿电压。如果二极管所加反向电压接近或超过此值,则有可能产生击穿,如不采取保护措施,将产生永久性的损坏。

应当指出,在半导体器件产品中,有的也正是利用了 PN 结的反向击穿特性,制造一些特殊用途的二极管,如稳压二极管。

3. 主要参数

二极管的参数与其伏安特性曲线一样,都是用来表征二极管特性的。因此,了解二极管参数是很重要的。二极管主要参数有下列几个:

(1) 最大整流电流 I_{OM} 最大整流电流是指二极管长时间使用时,允许流过二极管的最大正向平均电流。若流过二极管的电流超过了这个允许值,二极管将因 PN 结过热而损坏。一般点接触型二极管的最大整流电流在几十毫安以下。面接触型二极管的最大整流电流较大,如整流硅二极管 2CZ11 的最大整流电流为 1 A。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 最高反向工作电压是指为保证二极管不被击穿而给出的

最高反向电压,一般是反向击穿电压的 $1/2$ 或 $2/3$ 。如 2CP10 硅二极管的最高反向工作电压为 25 V,而反向击穿电压约为 50 V。点接触型二极管的最高反向工作电压一般是数十伏,面接触型二极管可达数百伏。

(3) 最大反向电流 I_{RM} 最大反向电流是指在二极管两端加上最高反向工作电压时的反向电流值。反向电流越小,说明二极管的单向导电性能越好,并且受温度的影响越小,管子工作越稳定。硅管的反向电流较小,一般在几个 μA 以下。锗管的反向电流较大,一般在几十 μA 至几百 μA 。

2-4 晶体三极管

1. 基本结构

晶体三极管的基本结构是由两个 PN 结构成的管芯,加上外接引线和管壳就组成了完整的三极管。目前,最常见的有合金管和平面管。图 2-10(a)是锗低频合金管的管芯结构图。在很薄的 N 型锗半导体晶片两侧分别用铟金属球,以高温烧结,冷却后在锗晶体中间部分形成的是 N 型锗,而两侧部分形成的是 P 型锗,结果形成了以两个 PN 结组成的 PNP 型晶体三极管,如 3AX 系列。图 2-10(b)是硅平面管的管芯结构图。它是利用光刻、扩散等工艺在 N 型硅片上形成具有两个 PN 结的 NPN 型的晶体三极管,如 3DK、3DG 类。目前,我国生产的 PNP 型的三极管多为锗管, NPN 型的多为硅管。

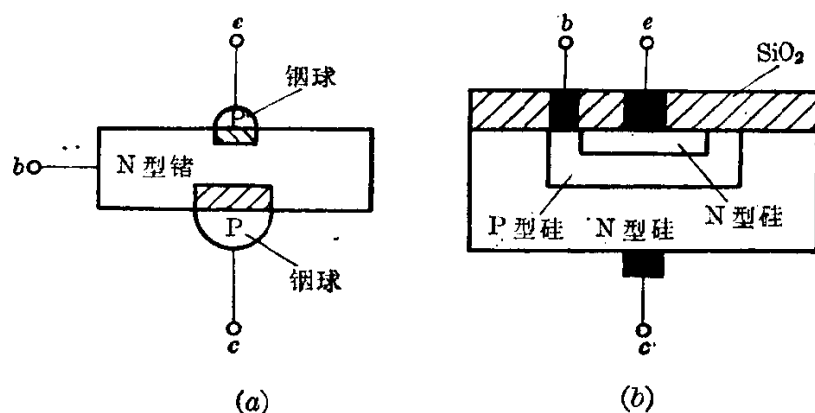


图 2-10 三极管的结构

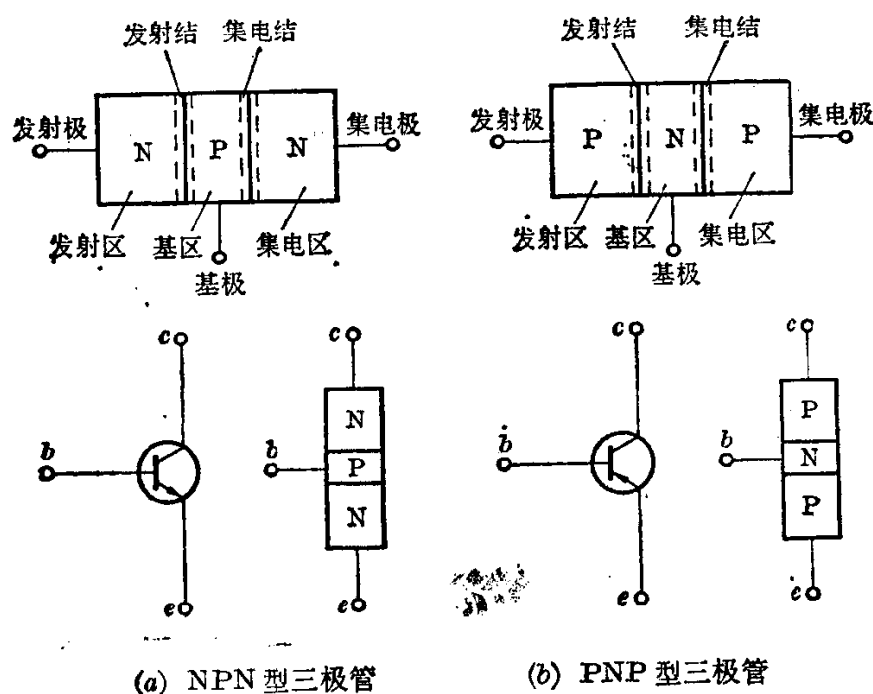


图 2-11 晶体三极管结构示意图和符号

符号的箭头方向表示了电流流动的方向,并以箭头向内者表示 PNP 型,以箭头向外者表示 NPN 型。

PNP 型与 NPN 型晶体三极管的工作原理相同, 只是在工作时, 外接电源的极性相反。

下面以 NPN 型为例来分析晶体三极管的特性。

2. 电流分配关系

将一个 NPN 型三极管按图 2-12 那样接上电源。这种接法称为晶体管的共发射极接法。图中, 以晶体管为中心, 组成两个回路。由电源 E_b , 可调电阻 R_b , 晶体管的基极, 发射极以及电流表组成的回路称为基极回路。由电源 E_c , 晶体管集电极, 发射极以及电流表组成另一回路称为集电极回路。发射极是两个回路的公共端, 故称为共发射极接法。

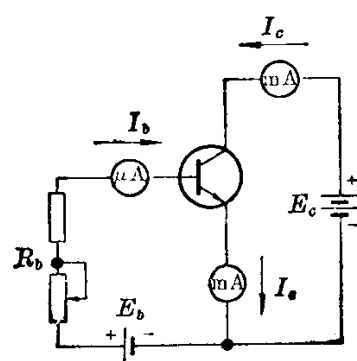


图 2-12 三极管电流放大实验电路

为了使晶体三极管能够起放大作用, 所接电源必须使三极管的发射结加上正向电压(又称正向偏置), 集电结加上反向电压(反向偏置)。在基极回路, 电源 E_b 的正极与三极管的基极相接, 故发射结为正向偏置。在集电极回路, 电源 E_c 的正极与三极管的集电极相接。图中, 因为 E_c 大于 E_b , 集电极电位高于基极电位, 所以集电结就是反向偏置(对 NPN 型而言)。通过晶体管各极的电流方向如图所示。

改变可变电阻 R_b , 可以得到一组相应变化的基极电流 I_b , 集电极电流 I_c 和发射极电流 I_e 。现将电流表上所测得的数据列于表 2-1。

表 2-1 晶体管电流测量数据

$I_b(\text{mA})$	-0.001	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
$I_c(\text{mA})$	0.001	0.01	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
$I_e(\text{mA})$	0	0.01	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

由表 2-1 可以看出三极管各极电流之间的分配关系:

1) $I_e = I_b + I_c$, 符合节点电流定律。由于 I_b 很小, 所以 $I_e \approx I_c$ 。

2) 当 I_b 从 0.04mA 变到 0.06mA 时, I_c 则从 1.5mA 变到 2.3mA, I_c 的变化量是 I_b 的变化量的 40 倍。这就是说基极电流的微小变化, 可以引起集电极电流的较大变化。利用晶体三极管各极电流的这种分配关系, 可以使晶体三极管具有电流放大作用。

3) 当 $I_b = 0$ (将基极开路) 时, $I_c = I_e$ 。此时的 I_c 称为集电极与发射极之间的穿透电流, 记为 I_{ce0} 。从表 2-1 可知, 三极管的 $I_{ce0} = 0.01\text{mA} = 10\mu\text{A}$ 。

4) 当 $I_e = 0$ (将发射极开路) 时, $I_c = -I_b$ 。此时的 I_c 称为集电极与基极之间的反向饱和电流, 记为 I_{cb0} 。从表中可知, 三极管的 $I_{cb0} = 0.001\text{mA} = 1\mu\text{A}$ 。

3. 放大原理

晶体三极管为什么会有电流放大作用呢? 下面将从其内部载流子运动规律来解释它的放大原理。我们仍以共发射极接法为例, 将 NPN 型三极管的结构图及与电路的连接画于图 2-13 中。

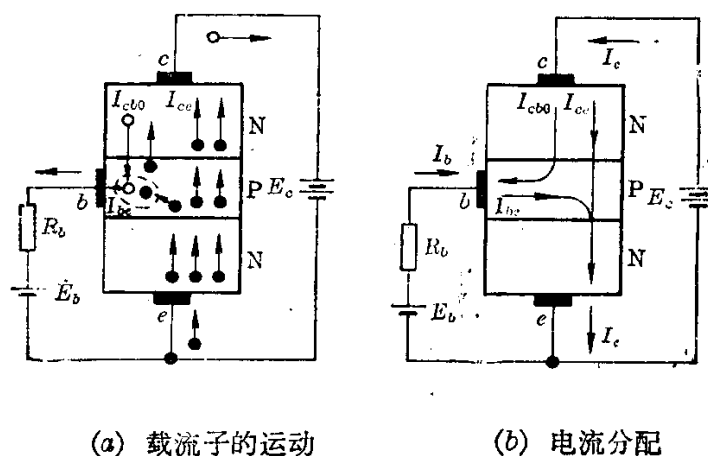


图 2-13 三极管内部电流