



面向 21 世纪高职高专规划教材

模拟电子技术

MONI DIANZI JISHU

王宝锐◎主编

航空工业出版社



教育部 21 世纪课程教材
教育部 21 世纪课程教材

模拟电子技术

第 2 版

（第 2 版）

清华大学出版社

32. 图 8-47 是外接扩流功率管保护的稳压电路, 请指出功率管 T₁ 的

保护电路。

面向 21 世纪高职高专规划教材

模 拟 电 子 技 术

主 编 王宝锐

图 8-47

图 8-47

图 8-47 是外接扩流功率管保护的稳压电路, 请指出功率管 T₁ 的

保护电路。

2008.6

ISBN 978-7-80243-146-1

图 8-47 是外接扩流功率管保护的稳压电路, 请指出功率管 T₁ 的

保护电路。

模拟电子技术

Moni Dianzi Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关里 14 号 100029)

发行电话: 010-64812612 010-64812613

航空工业出版社

北京市科委备案: 京科备字[2008]第 1 号

定价: 28.00 元

北 京

内容提要

本书是为高校计算机应用及电子技术专业编写的电子技术基础教材。

全书共八章,分别讲述半导体二极管和三极管、半导体三极管交流放大电路、放大器中的反馈、场效应管及其放大电路、直接耦合放大电路、集成运算放大器、正弦波振荡电路及直流稳压电源,每章后均附有思考与练习。

本书可作为高职高专院校教材,也可供计算机应用、电子技术的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 王宝锐主编. —北京:航空工业出版社,
2008.6

ISBN 978-7-80243-146-1

I. 模… II. 王… III. 模拟电路—电子技术 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 070919 号

模拟电子技术

Moni Dianzi Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行电话: 010-64815615 010-64978486

北京市科星印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2008 年 6 月第 1 版

2008 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787×960

1/16

印张: 19.25

字数: 356 千字

印数: 1—5000

定价: 28 元

前 言

当代电子技术的迅速发展，为人民的物质、文化生活提供了优良的条件。如家庭影院、数码摄像机、空调、手机、电子计算机等进入家庭。让人们的生活更丰富多彩。

至于电子技术在科学技术领域的应用，更起着龙头的作用。如航空航天技术、通信工程、测控技术、信息技术等比比皆是。

为了适应电子科学技术的飞速发展和 21 世纪高等教育对高素质人才的需要，本书在相关优秀教材的基础上，总结了多年来课程改革的教学经验，特别是考虑到高职高专院校学生的特点和需要，编写了这本《模拟电子技术》。内容力求少而精，注重实际应用。既要使学生掌握基础知识和基本方法，又要培养学生理论联系实际，学习对电路进行定性分析的综合能力。为了便于学生自学和系统复习，给出了每章内容小结，指导学生全面领会教学要求，并突出应该掌握的重点。

由于编者水平和能力所限，加之修改时间紧迫，书中具体内容若有疏漏、欠妥和错误之处，敬请读者批评、指正。

编 者
2008 年 6 月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管	1
第一节 半导体基础知识	1
一、本征(纯净)半导体	1
二、N型半导体和P型半导体	3
三、PN结	5
第二节 半导体二极管(晶体二极管)	8
一、结构与类型	8
二、伏安特性	9
三、二极管方程	11
四、二极管的电容效应	12
五、二极管的主要参数	13
第三节 半导体三极管(晶体三极管)	14
一、原理结构与符号	14
二、半导体三极管的放大作用	16
三、半导体三极管的特性曲线和三种工作状态	18
四、半导体三极管的主要参数	21
附录一 半导体器件型号命名方法	26
附录二 几种半导体二极管的主要参数	27
附录三 几种半导体三极管的主要参数	28
本章小结	28
思考与练习	29
第二章 半导体三极管交流放大电路	33
第一节 单管交流电压放大电路	33
一、电路组成及元件作用	33
二、电路的工作原理	34
三、直流通路与交流通路	37
第二节 放大电路的静态分析方法	38
一、近似计算法	38
二、图解法	39
第三节 放大电路的动态分析方法	42
一、图解法	42

二、微变等效电路法	50
第四节 工作点稳定的典型电路	61
一、温度对放大器工作点的影响	61
二、分压式射极偏置电路的第一种形式	63
三、分压式射极偏置电路的第二种形式	67
四、分压式射极偏置电路的第三种形式	69
第五节 多级放大电路	70
一、耦合方式	70
二、多级放大器的组成	73
三、多级放大器的动态量估算	74
第六节 放大器的频率特性	77
本章小结	82
思考与练习	83
第三章 放大器中的反馈	89
第一节 反馈的基本概念和负反馈放大器的一般关系式	89
第二节 负反馈对放大器性能的改善	91
第三节 反馈的类型及判别方法	93
第四节 负反馈放大器的计算举例	97
一、串联电流负反馈放大电路	97
二、射极输出器(典型的共集电路)	100
第五节 深反馈电压放大倍数的近似计算	113
第六节 放大器的自激振荡及其消除	115
本章小结	118
思考与练习	119
第四章 场效应管及其放大电路	126
第一节 场效应管(Field Effect Transistor 缩写为 FET)	126
一、结型场效应管(JFET)	126
二、MOS 场效应管	134
三、使用场效应管的注意事项	140
四、场效应管和半导体三极管比较	141
五、场效应管的微变等效电路	142
第二节 场效应管放大电路	143
一、共源极放大电路	144
二、源极输出器(典型的共漏极电路)	149

第三节 场效应管放大电路应用举例	150
附录四 几种场效应管的主要参数	152
本章小结	154
思考与练习	155
第五章 直接耦合放大电路	160
第一节 直接耦合放大电路的特殊问题	160
一、静态工作点的设置与级间电位配合	160
二、零点漂移	162
第二节 差动放大电路	163
一、典型的差动放大电路	163
二、几种其他输入——输出方式的讨论	168
三、具有晶体管恒流源的差动放大电路	170
四、场效应管差动放大电路	172
第三节 功率放大电路	173
一、功率放大器的特殊问题	173
二、功率放大器的分类	174
三、双电源供电的乙类互补对称电路	176
四、双电源供电的甲乙类互补对称电路	181
五、双电源供电的甲乙类准互补对称电路	183
六、采用一个电源的甲乙类互补对称电路	183
本章小结	184
思考与练习	185
第六章 集成运算放大器	190
第一节 集成运放的内部电路结构	190
一、内部结构	190
二、主要参数	192
第二节 集成运放分析要领及三种基本连接方式	194
一、分析集成运放的两个要领	194
二、集成运放的三种基本连接方式	195
第三节 集成运放的运算功能	200
一、加法运算	200
二、积分运算	201
三、微分运算	202
四、对数运算和指数（反对数）运算	203

五、乘法运算	204
第四节 集成运放的应用举例	207
一、电子模拟计算	207
二、电压、电流变换	208
三、电压比较器	210
四、矩形波发生器(多谐振荡器)	211
附录五 几种线性组件的参数	213
本章小结	214
思考与练习	214
第七章 正弦波振荡电路	222
第一节 正弦波振荡电路的振荡条件和电路组成	222
一、振荡条件	222
二、正弦波振荡电路的组成	223
第二节 RC 正弦波振荡电路	224
一、电路组成	224
二、RC 串并联电路的选频特性	224
三、振荡的建立与稳定	227
四、振荡输出的频率	227
第三节 LC 正弦波振荡电路	228
一、LC 并联网络的选频特性	228
二、LC 正弦波振荡电路	231
第四节 石英晶体正弦波振荡电路	232
一、石英晶体的基本特性、等效电路和频率特性	233
二、石英晶体正弦波振荡电路	236
本章小结	238
思考与练习	238
第八章 直流稳压电源	241
第一节 桥式整流、电容滤波电路	241
一、桥式整流电路	242
二、电容滤波电路	245
第二节 硅稳压管及其稳压电路	249
一、硅稳压管	249
二、硅稳压管稳压电路	252
三、稳压电源的主要质量指标	255

第三节 带放大器的串联反馈式稳压电源	258
一、基本电路	258
二、一般情况讨论	260
第四节 集成稳压电源	266
一、CW7800 系列概述	267
二、CW7800 系列内部电路组成和工作原理	267
三、CW7800 系列应用电路接法举例	269
第五节 开关稳压电源	272
一、方块图及工作原理	273
二、实用电路举例	274
第六节 无工频变压器开关稳压电源	277
一、概述	277
二、电路组成及工作原理	277
三、典型电源分析	278
附录六 几种硅稳压管的主要参数	283
附录七 电阻的标称值和电阻的彩色编码	284
附录八 CW7800 系列电参数	286
附录九 几种典型脉宽调制器型号与厂家	287
本章小结	287
思考与练习	288

第一章 半导体二极管和三极管

第一节 半导体基础知识

一、本征（纯净）半导体

1. 硅（Si）和锗（Ge）的原子结构

半导体是一种导电性能介于导体和绝缘体之间的物质。目前常用的半导体材料是硅和锗。其原子结构示意图如图 1-1 所示。

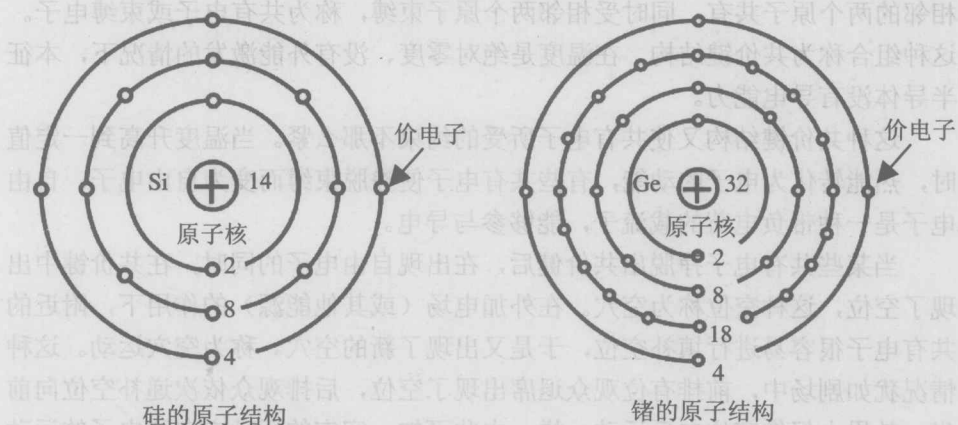


图 1-1 半导体原子结构示意图

硅的原子核有 14 个正电荷，外面有 14 个电子，分三层。最外层有 4 个电子，这四个外层电子称为价电子。价电子受原子核的束缚力最小。锗的原子核有 32 个正电荷，外面有 32 个电子，分四层。最外层有 4 个价电子，由于它们最外层都有 4 个价电子，故都属于四价元素。

2. 本征半导体的导电结构——电子-空穴对

纯净的半导体称为本征半导体。当本征半导体 Si、Ge 等材料被制成单晶体时，其原子排列变得非常整齐，称为晶体点阵，如图 1-2 所示。

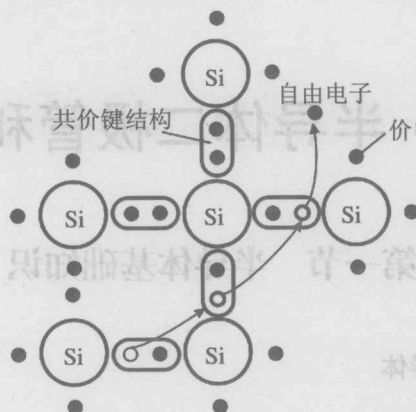


图 1-2 单晶硅的共价键结构

图中，每一个 Si 原子与相邻的 4 个 Si 原子结合，每个原子最外层的一个价电子与另一个原子最外层的一个价电子组成一个电子对。这个“电子对”为相邻的两个原子共有，同时受相邻两个原子束缚，称为共有电子或束缚电子。这种组合称为共价键结构。在温度是绝对零度、没有外能激发的情况下，本征半导体没有导电能力。

这种共价键结构又使共有电子所受的约束不那么紧。当温度升高到一定值时，热能转化为电子的动能，有些共有电子便挣脱束缚而变为自由电子。自由电子是一种带负电荷的载流子，能够参与导电。

当某些共有电子挣脱出共价键后，在出现自由电子的同时，在共价键中出现了空位，这种空位称为空穴。在外加电场（或其他能源）的作用下，附近的共有电子很容易进行填补空位，于是又出现了新的空穴。称为空穴运动。这种情况犹如剧场中，前排有位观众退席出现了空位，后排观众依次递补空位向前坐，效果上好像空位向后运动一样。由此可知，空穴的运动方向和电子的运动方向相反，而电子是带负电荷，缺少电子的空穴实质是带正电荷的。因此，可以认为空穴的运动是正电荷的运动。

由此可见，空穴也能自由运动而参与导电，在这个意义上，空穴和电子一样也是一种载流子，是带正电荷的载流子。因此，半导体中有两种载流子，一种是带负电荷的自由电子，一种是带正电荷的空穴。

在本征半导体中，受热或光的激发产生一个自由电子，必然相伴产生一个空穴。电子和空穴成对产生。这种现象称为本征激发。电子 - 空穴对就是本征半导体的导电结构。电子 - 空穴对的多少与温度和半导体的材料有关。

在一定的温度下，本征半导体便有一定数量的电子 - 空穴对产生。当本征

半导体有外加电压时，这些电子、空穴向相反方向运动形成电流，故半导体中的电流是电子电流和空穴电流之和。由于本征半导体中，电子-空穴对很少，这种电流极微弱，没有实用价值。为了提高导电能力，需要在本征半导体中掺入杂质。

二、N 型半导体和 P 型半导体

如果在本征半导体中，掺入少量其他元素的原子，这些原子对本征半导体而言称为杂质。掺有杂质的半导体称为杂质半导体，它可以大大提高半导体的导电性能。

例如：

1. 单晶硅中掺入微量 5 价磷 (P) 元素

利用化学方法，比如扩散法在单晶硅中掺入微量磷元素。由于掺入的磷原子数量比硅原子少得多，所以半导体的晶体结构基本不变。仅是在某些晶格点阵的位置上硅原子被磷原子代替了。由于磷原子有 5 个价电子(称为 5 价元素)，一个磷原子与相邻 4 个硅原子组成共价键时，多余的 1 个价电子不受共价键约束，仅受磷原子核的吸引，故其吸引力很微弱。只要有较小的外能作用，就能使它挣脱原子核的吸引变成自由电子构成电子载流子，造成杂质半导体中的电子载流子数目大大增加。这种杂质半导体称为电子型半导体或 N 型半导体。N 是英文 Negative (负) 的首字母。

由于杂质磷掺入单晶硅中能供出自由电子，称这类杂质为施主杂质。磷原子供出 1 个自由电子就变成了带正电的正离子被嵌在晶格中不能自由运动。N 型半导体的结构示意图和简化示意图如图 1-3 所示。



图 1-3 N 型半导体

在 N 型半导体中，除了掺杂能形成大量自由电子外，在一定温度下，由本征激发还要产生少量电子 - 空穴对。其中的自由电子加入由磷杂质形成的大量自由电子的行列共同组成电子载流子。其中的空穴构成空穴载流子。由于空穴数量远少于自由电子数量，故在 N 型半导体中，自由电子称为多数载流子，空穴称为少数载流子。故 N 型半导体的导电机构以电子载流子为主。

2. 单晶硅中掺入微量 3 价硼 (B) 元素

硼是 3 价元素，有 3 个价电子。用化学方法（如扩散法）将微量硼掺入单晶硅中。每个硼原子与相邻 4 个硅原子组成共价键时，其中有一个共价键缺少一个价电子，即自然形成一个空穴。因此，在这种掺杂半导体中，形成很多空穴，称为空穴型半导体或 P 型半导体。其中 P 是英文 Positive（正）的首字母。

由于硼杂质的掺入，提供了带正电荷的空穴，在外能作用下，可使晶体结构中附近的共有电子填补其空位，使硼原子成为带负电的负离子嵌在晶格中，不能运动。由于硼原子能接受电子，故称硼杂质为受主杂质。

在一定温度下，由本征激发还要产生少量电子 - 空穴对，其中的空穴加入由硼杂质形成的大量空穴的行列组成空穴载流子。其中的电子构成电子载流子。由于空穴载流子的数量大于电子载流子的数量，故在 P 型半导体中，空穴载流子称为多数载流子，电子载流子称为少数载流子，故 P 型半导体的导电机构以空穴载流子为主。

P 型半导体的结构图和简化示意图如 1-4 所示。

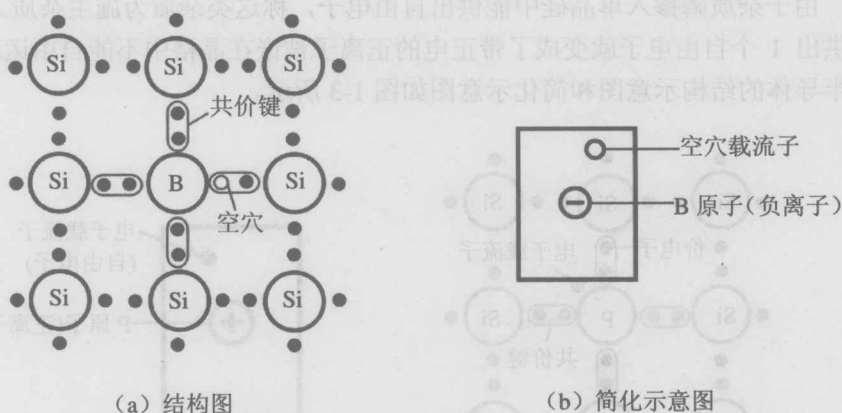


图 1-4 P 型半导体

纯净（本征）半导体掺杂后，导电性能大大提高。

例如：纯硅的原子密度（单位体积的晶体中包含的原子数称为原子密度）

是在 $10^{22}/\text{cm}^3$ 这个数量级。在常温下，其载流子的浓度（即单位体积晶体中包含的载流子数称为载流子浓度）是在 $10^{10}/\text{cm}^3$ 这个数量级。若掺杂百万分之一即掺杂 $10^{22} \times 10^{-6}/\text{cm}^3 = 10^{16}/\text{cm}^3$ （掺入的杂质浓度），则掺杂后其多数载流子的

浓度与纯硅的载流子浓度比是 $\frac{10^{16}/\text{cm}^3}{10^{10}/\text{cm}^3} = 10^6$ 即载流子浓度提高了一百万倍。

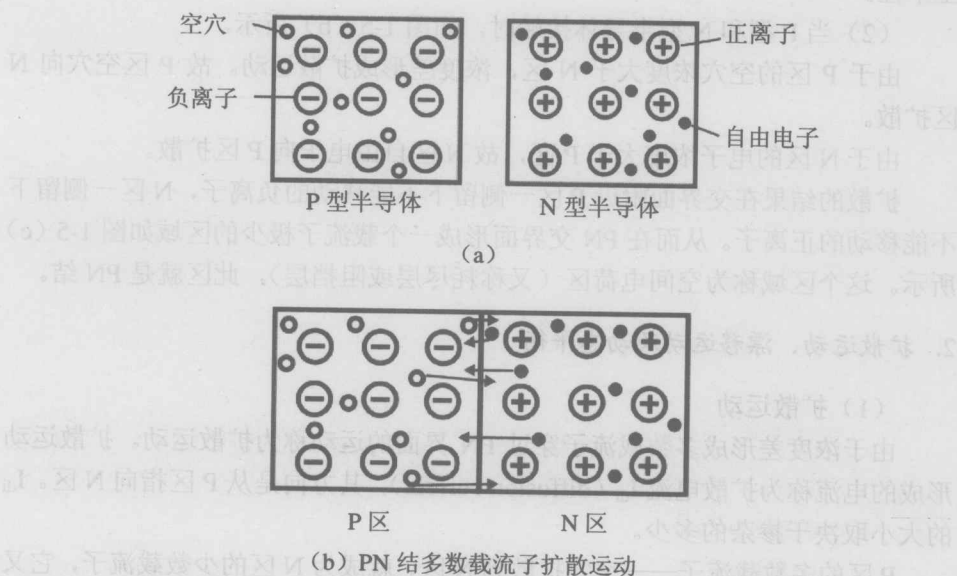
这个简单估算说明掺杂能大大提高半导体的导电性能。因此，要提高半导体的导电能力，最有效的方法是半导体内掺入微量杂质。

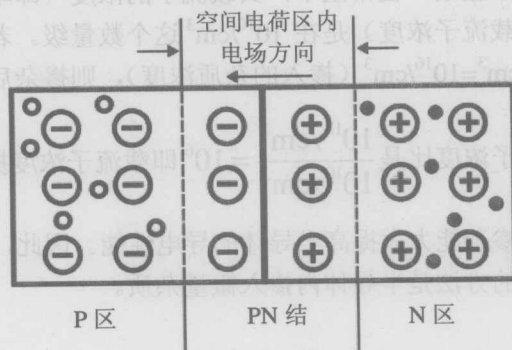
三、PN 结

1. PN 结的形成

PN 结是由 P 型半导体和 N 型半导体通过一定方式结合而成。这里的结合并不是简单地将两种半导体接触在一起。而是利用掺杂的方法如采用扩散法、烧结法、外延法等半导体工艺使一块完整的晶片的一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体。那么在 P 型和 N 型的交界处就形成了 PN 结。

PN 结的形成过程参见图 1-5。





(c) PN 结的形成

图 1-5 PN 结的形成过程

(1) 图 1-5 (a) 所示是 P 型半导体和 N 型半导体未接触时的情况。

P 型半导体的多数载流子是空穴，每一个空穴对应有一个负离子（如硼原子）嵌在晶格中。

N 型半导体的多数载流子是自由电子，每一个自由电子对应有一个正离子（如磷原子）嵌在晶格中。由于每种类型的半导体，正、负电荷量相等，对外呈中性。

(2) 当 P 型和 N 型半导体接触时，如图 1-5 (b) 所示。

由于 P 区的空穴浓度大于 N 区，浓度差形成扩散运动。故 P 区空穴向 N 区扩散。

由于 N 区的电子浓度大于 P 区，故 N 区自由电子向 P 区扩散。

扩散的结果在交界面附近 P 区一侧留下不能移动的负离子，N 区一侧留下不能移动的正离子。从而在 PN 交界面形成一个载流子极少的区域如图 1-5 (c) 所示。这个区域称为空间电荷区（又称耗尽层或阻挡层），此区就是 PN 结。

2. 扩散运动、漂移运动及动态平衡

(1) 扩散运动

由于浓度差形成多数载流子穿过 PN 界面的运动称为扩散运动。扩散运动形成的电流称为扩散电流 I_{di} (diffusion current)，其方向是从 P 区指向 N 区。 I_{di} 的大小取决于掺杂的多少。

P 区的多数载流子——空穴扩散到 N 区，就成为 N 区的少数载流子，它又可能与 N 区的多数载流子——电子复合，使空穴和电子同时消失。同理，N 区的多数载流子——电子扩散到 P 区，就成为 P 区的少数载流子，它又可能与 P

区的多数载流子——空穴复合，使电子和空穴同时消失。

(2) 漂移运动

由于 PN 结的 P 区一侧带负电，N 区一侧带正电，因此在空间电荷区形成一个内电场，其方向是由 N 区指向 P 区。内电场的形成将阻止两区域多数载流子继续扩散（因此 PN 结又称为阻挡层），却有利于各区域的少数载流子向对方区域运动。少数载流子在内电场作用下形成的定向运动称为漂移运动。

少数载流子作漂移运动形成的电流 I_{dr} （drift current）称为漂移电流。其方向和内电场方向一致，其大小取决于温度。由于少数载流子是由本征激发形成的，一般情况下漂移电流是很小的。

(3) 动态平衡

PN 结开始形成时，多数载流子的扩散运动占优势，漂移运动处劣势，故 $I_{di} \gg I_{dr}$ 。随着扩散运动的进行，空间电荷区逐渐加宽，内电场越来越强，使扩散运动减弱，漂移运动加强，最终将达到 $I_{di} = I_{dr}$ 即扩散电流和漂移电流大小相等、方向相反，称这种状态为动态平衡。达到动态平衡后，空间电荷区的正、负离子不再增加，空间电荷区的宽度不再增加（约为数十微米），此时 PN 结处于相对稳定的状态。若无外加电压或其他激发因素作用时，PN 结对外不显电流，即对外呈现中性。

3. PN 结的单向导电性

如果对 PN 结外施电压，当电压极性不同时，将出现两种完全不同的情况。

(1) 外施正向电压，PN 结导通。

若外施电压的正极接 P 端，负极接 N 端，如图 1-6 (a) 所示，称为 PN 结外施正向电压。外施电压 U 产生的电场称为外电场。外施正向电压时，外电场的方向是由 P 区指向 N 区，与内电场方向相反，削弱内电场，促使两区的多数载流子向对方区域运动。即 P 区的空穴向 N 区运动，进入空间电荷区时与一部分负离子中和；同时，N 区的电子向 P 区运动，进入空间电荷区时也与一部分正离子中和。于是使空间电荷区变窄，内电场进一步受到削弱，造成 $I_{di} \gg I_{dr}$ ，则多数载流子能顺利地越过 PN 结形成较大的正向扩散电流 I_{di} ，而且随着外加电压 U 的增大而增大。此时 PN 结呈现的正向电阻很小，称 PN 结处在导通状态。

(2) 外施反向电压，PN 结截止。

若外施电压 U 的负极接 P 端，正极接 N 端，如图 1-6 (b) 所示，称为 PN 结外施反向电压。

外施反向电压使 PN 结获得的外电场方向与内电场方向相同，即都是从 N