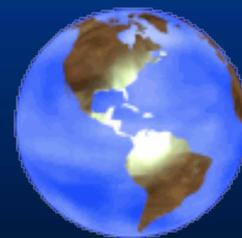


电子学基础



制作：王林炜

第一章 半导体器件的特性

- §1.1 半导体的导电特性
- §1.2 PN结
- §1.3 二极管
- §1.4 双极型晶体管
- §1.5 场效应管



§1.1 半导体的导电特性

一、本征半导体的导电特性 

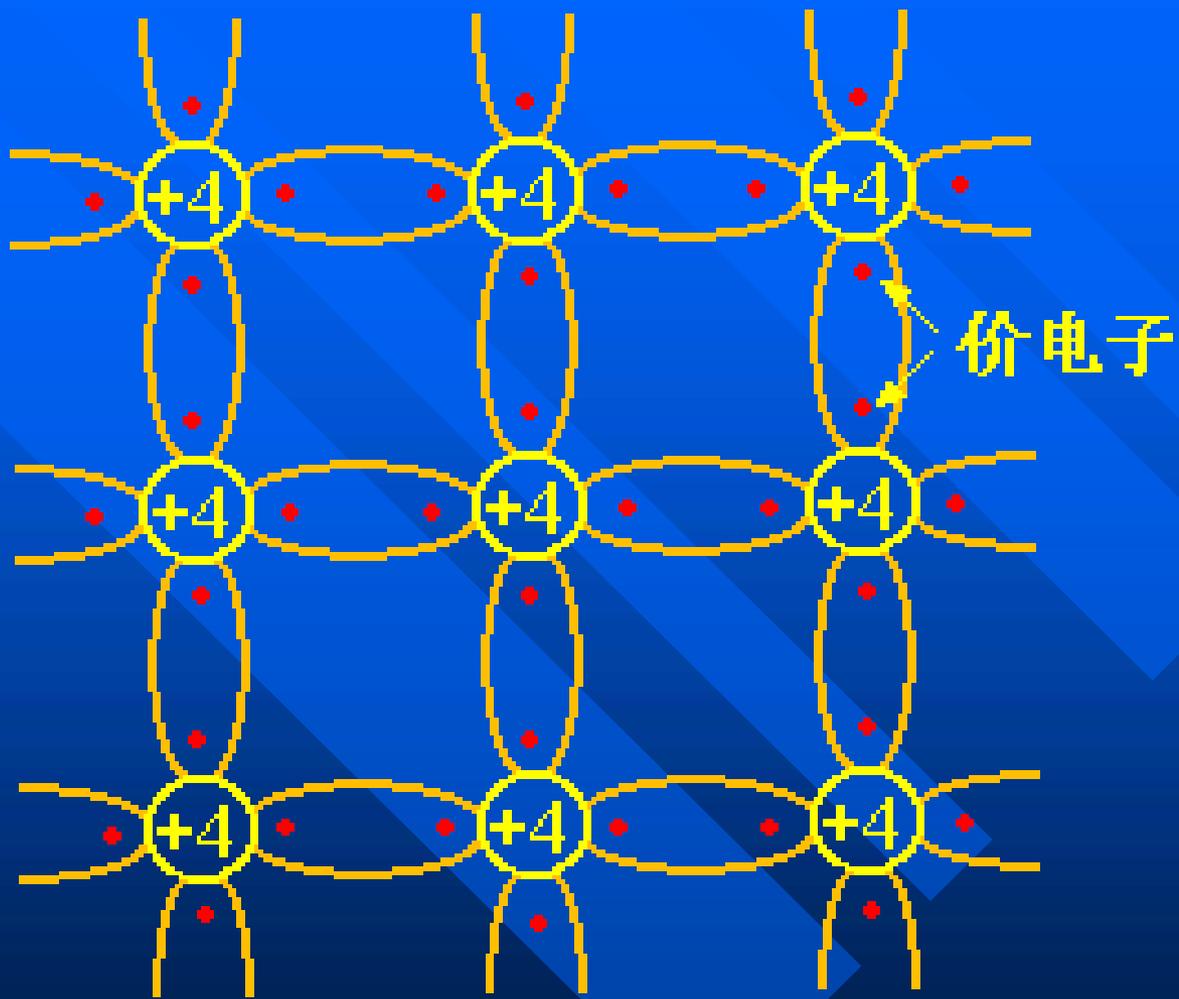
二、杂质半导体的导电特性 



一、本征半导体的导电特性

自然界的各种物质，根据其导电能力的不同，可分为导体、绝缘体和半导体三大类。通常将电阻率小于 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 的物质称为**导体**，例如铜、铝等金属；电阻率大于 $10^9\Omega\cdot\text{cm}$ 的物质称为**绝缘体**，例如橡胶、塑料等；导电性能介于导体和绝缘体之间的物质称为**半导体**。大多数半导体器件所用材料主要是硅(Si)和锗(Ge)。

半导体的导电性能由其原子结构决定。以硅、锗为例。硅的原子序数是14，锗的原子序数是32，它们有一个共同点，即都是**4价元素**，且都具有**晶格结构**。它们每个原子最外层的价电子，不仅受到自身原子核的束缚，同时还受到相邻原子核的吸引。因此价电子不仅围绕自身的原子核运动，同时也出现在相邻原子核的最外层轨道上。于是两个相邻原子共有一对价电子，组成**共价键**，如图所示。

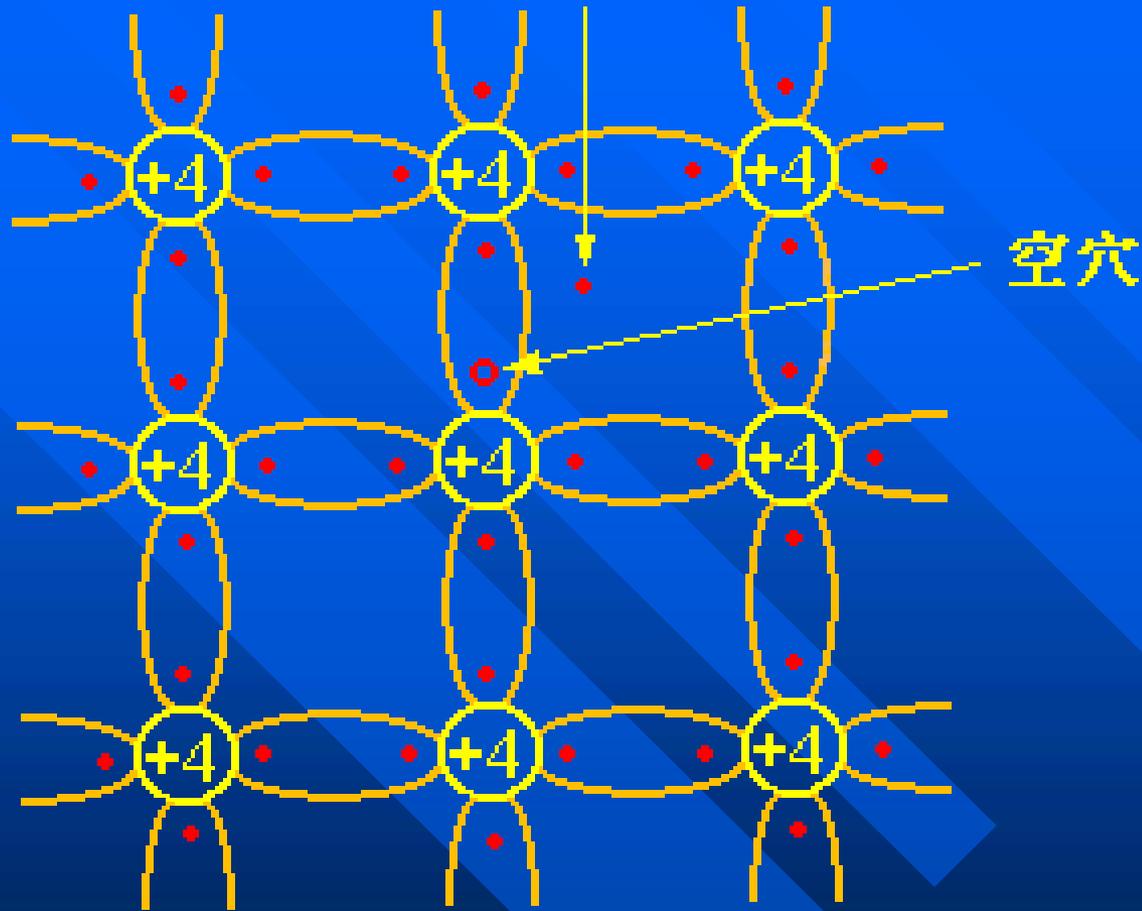


纯净的、不含其他杂质的半导体称为**本征半导体**。对于本征半导体来说，由于晶体中共价键的结合力较强，在热力学温度零度 ($T = 0\text{K}$ ，相当于 -273°C) 时，价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚，此时，晶体中没有自由电子。所以，在热力学温度零度时，本征半导体不能导电，如同绝缘体一样。

当温度升高，例如在室温条件下，将有少数价电子获得足够的能量，克服共价键的束缚而成为**自由电子**。此时，本征半导体具有一定的导电能力，但由于自由电子的数量很少，因此它的导电能力比较微弱。

当部分价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子同时，在原来的共价键中留下一个空位，称为**空穴**，如图所示。

自由电子



空穴是半导体区别于导体的重要特征

由于存在这样的空位，附近共价键中的价电子就比较容易填补近来，而在附近的共价键中留下一个新的空位，这个空位又被相邻原子的价电子填补。从效果上看，这种共有电子的填补运动，相当于带正电的空穴在运动一样。为了与自由电子的运动区分，称为**空穴运动**。

将物质内部运载电荷的粒子称为**载流子**。物质的导电能力取决于载流子的**数目**和**运动速度**。由此可见，半导体中存在**两种载流子**：带负电的**自由电子**和带正电的**空穴**。在本征半导体中，自由电子和空穴成对出现，成为**电子—空穴对**，因此，两种载流子的浓度是相同的。用 n 和 p 表示自由电子和空穴的浓度，用 n_i 和 p_i 表示本征半导体中自由电子和空穴的浓度，则有 $n_i = p_i$ 。

由于物质的热运动，半导体中的电子—空穴对不断地产生，同时，当电子与空穴相遇时又因复合而使电子—空穴对消失。在一定温度下，上述产生和复合两种运动达到了动态平衡，使电子—空穴对的浓度一定。本征半导体中载流子的浓度，除与半导体材料本身的性质有关以外，还与**温度**密切相关，且随温度的升高，基本上按**指数规律**增加。因此，本征载流子对温度十分敏感。例如硅材料每升高 8°C ，本征载流子浓度增加一倍；对于锗材料每升高 12°C ，本征载流子浓度增加一倍。由此可见，**温度**是影响半导体导电性能的一个重要因素。



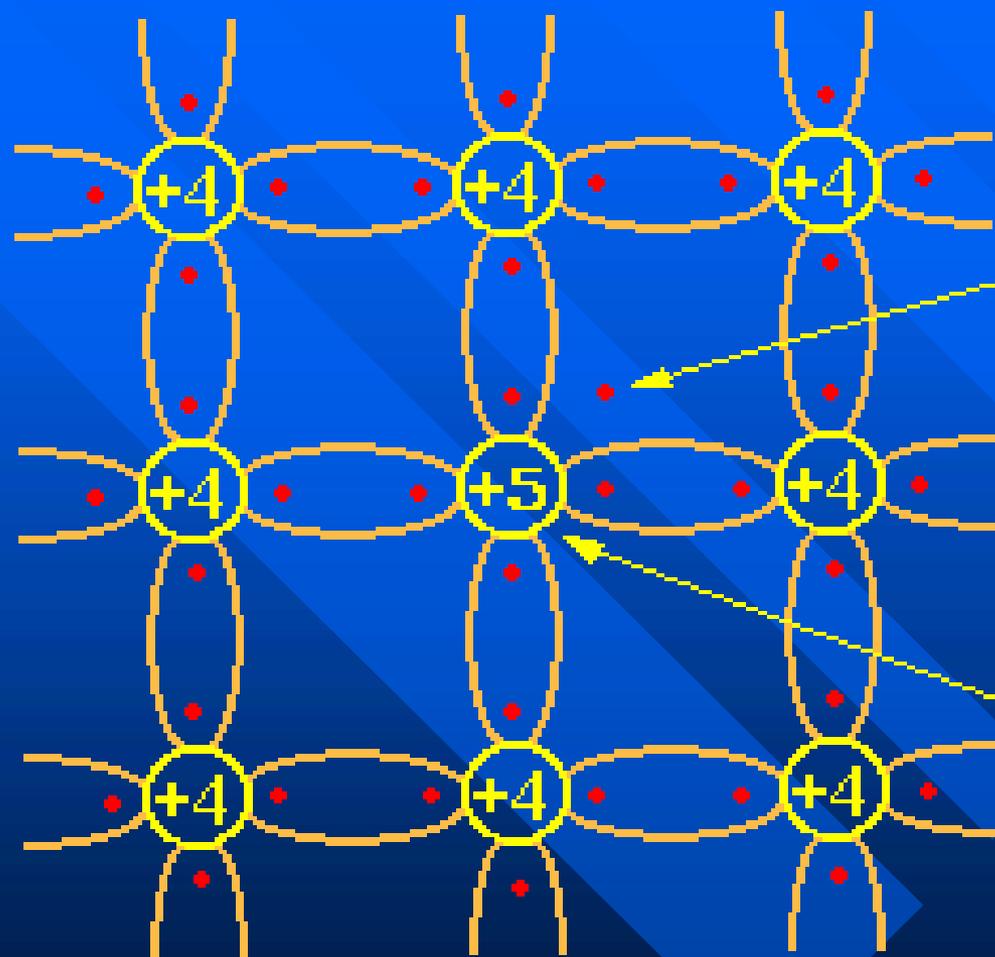
二、杂质半导体的导电特性：

本征半导体中虽存在两种载流子，但因本征载流子浓度很低，所以导电能力很差。若在本征半导体中掺入某种特定的杂质，成为**杂质半导体**，则它们的导电性能将发生显著变化。

根据掺杂的不同，杂质半导体可分为
为
N型和**P型**两种。

1、N型半导体

如果在硅或锗的晶体中掺入少量的5价杂质元素，如磷、砷、锑等，则原来晶格中的某些硅原子将被5价杂质原子代替。由于杂质原子最外层有5个价电子，因此它与周围4个硅原子组成共价键时多余一个电子。这个电子不受共价键的束缚，只受自身原子核的吸引，这种束缚较弱，在室温条件下即可成为自由电子，如图所示。



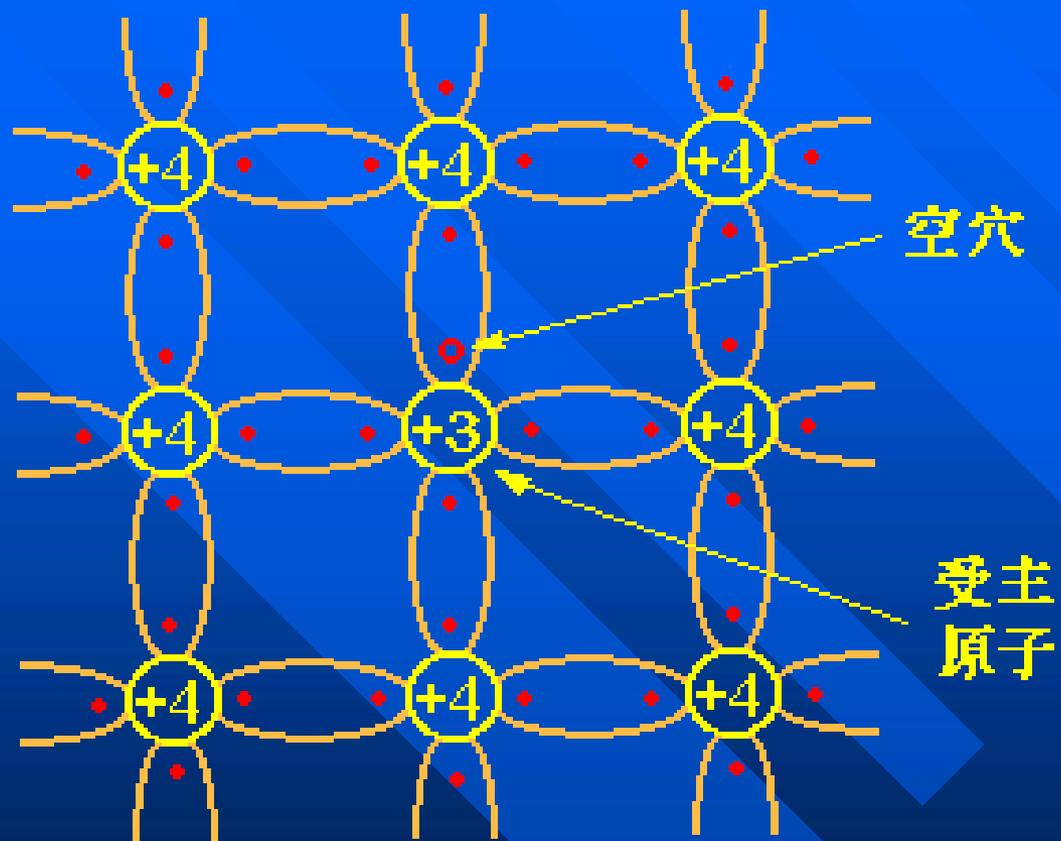
自由电子

施主原子

在这种杂质半导体中，自由电子的浓度将大大高于空穴的浓度，即 $n \gg p$ 。因此这类半导体主要依靠电子导电，故称为**电子型半导体**或**N型半导体**(由于电子带负电，故用Negative表示)，其中的5价杂质原子可以提供电子，所以称为**施主原子**。N型半导体中的自由电子称为**多数载流子**(简称**多子**)，而其中的空穴称为**少数载流子**(简称**少子**)。

2、P型半导体

如果在硅或锗的晶体中掺入少量的3价杂质元素，如硼、镓、铟等，此时杂质原子最外层有3个价电子，因此它与周围4个硅原子组成共价键时，由于缺少一个电子而形成空穴，如图所示。



因此，在这种杂质半导体中，空穴的浓度将比自由电子的浓度高的多，即 $p \gg n$ 。因此这类半导体主要依靠空穴导电，故称为**空穴型半导体**或**P型半导体** (由于电子带正电，故用 Positive 表示)，这种3价杂质原子能够产生多余的空穴，起着接受电子的作用，故称为**受主原子**。在 P型半导体中多子是空穴，少子是电子。

* 在杂质半导体中，多子的浓度主要取决于掺入的杂质浓度，且基本上等于杂质的浓度；少子的浓度虽然很低，但受温度影响显著；多子的浓度基本不受温度影响。



§1.2 PN结

一、PN结的形成 

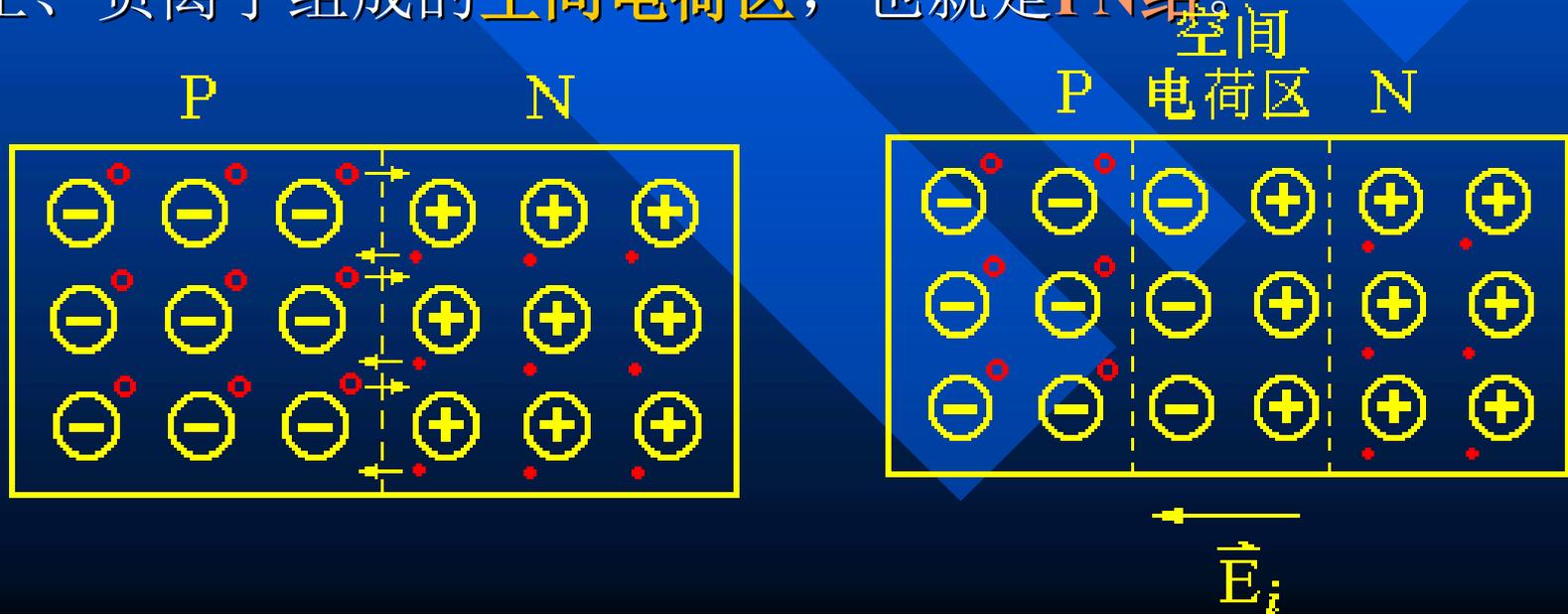
二、PN结的单向导电性 



一、PN结的形成:

如果将一块半导体的一侧掺杂成P型半导体，而另一侧掺杂成N型半导体，则在交界处将形成一个PN结(PN junction)。如图

所示，当P型与N型半导体结合时，由于P型半导体空穴浓度大，N型半导体中的自由电子浓度大，空穴将由P区向N区扩散，自由电子则由N区向P区扩散。进入P区的电子及进入N区的空穴，将发生复合而消失，于是，在交界面两侧形成一个由不能移动的正、负离子组成的**空间电荷区**，也就是**PN结**。



由于空间电荷区内载流子因扩散和复合而消耗掉了，因此空间电荷区又称**耗尽层**。空间电荷区的左侧(P区)带负电，右侧(N区)带正电，因此，在空间电荷区产生由N区指向P区的电场，称为**内电场**。内电场对应的电位差 V_D 称为**电位壁垒**。内电场的作用是阻止多子的扩散，因此又称空间电荷区为**阻挡层**。但是，这个内电场却有利于少子的运动，即有利于P区中的电子向N区运动，N区中的空穴向P区运动。通常将少子在内电场作用下的定向运动称为**漂移运动**。

由此可知，PN结中进行着两种载流子的运动：**多子的扩散运动**和**少子的漂移运动**。扩散运动产生的电流称为**扩散电流**，漂移运动产生的电流称为**漂移电流**。随着扩散运动的进行，PN结的宽度将逐渐增大；而随着漂移运动的进行，空间电荷区的宽度将逐渐减小。达到平衡时，无论电子和空穴，它们各自产生的扩散电流和漂流电流都达到相等，则PN结中总的电流等于零，空间电荷区的宽度也达到稳定。一般PN结很薄(约几微米~几十微米)。电位 V_D 的大小，**硅**材料约为**(0.6 ~ 0.8)V**，**锗**材料约为**(0.2 ~ 0.3)V**。

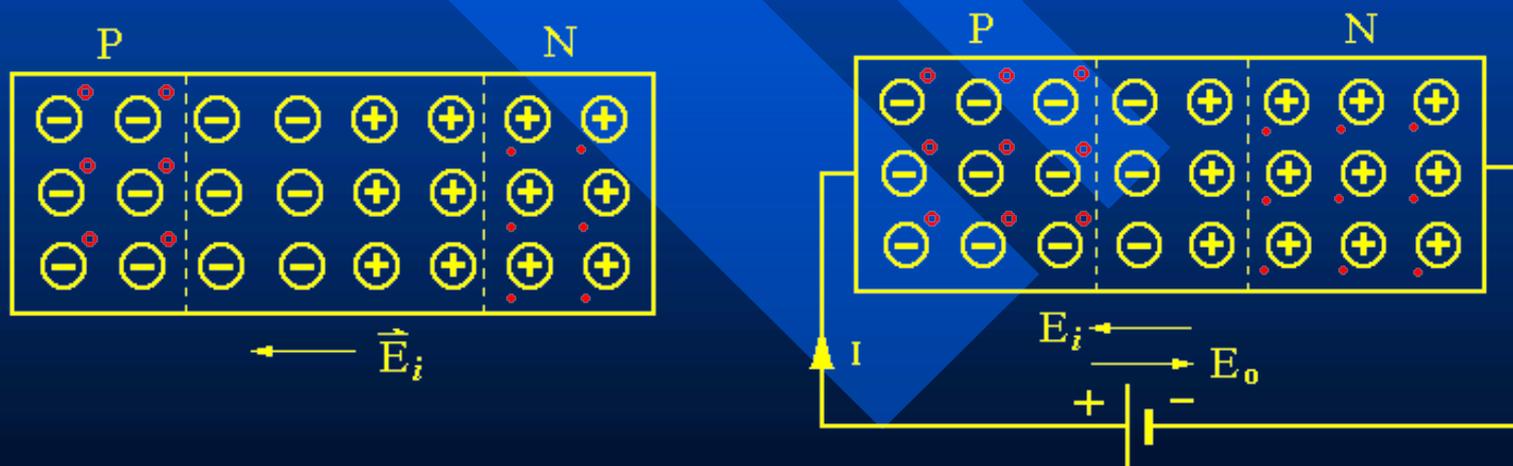


二、PN结的单向导电性：

如果PN结两端加上不同极性的直流电压，就可以打破上述的动态平衡。下面将看到其导电性能有很大差异。

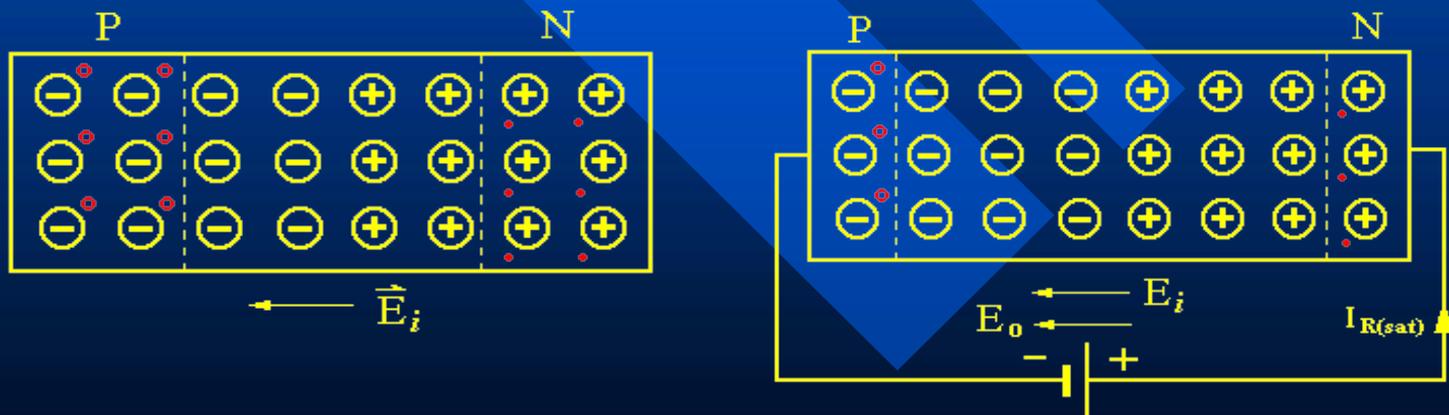
1、加正向电压，PN结导通：

当外电源的**正极接P区**，**负极接N区**时，PN结加的是正向电压，这种连接方式称为**正向偏置**。此时外电场与电场的方向相反，因而削弱了内电场，使空间电荷区变窄，有利于扩散运动的进行，而不利于漂移运动。这样P区和N区的多子就能顺利的通过PN结，同时外电源又不断的向半导体提供正、负电荷，形成较大的扩散电流。称PN结处**导通**状态，呈现的电阻很小。



2、加反向电压，PN结截止：

外电源**正极接N区，负极接P区**时，PN结加的是反向电压。这种连接方式称为**反向偏置**。这时的外电场 E_0 与内电场 E_i 方向一致，加强了内电场，空间电荷区变宽，阻止了扩散运动的进行。几乎没有多子可以通过PN结。此时回路中几乎无电流通过。称PN结处于**截止**状态，呈现很大的电阻。



由此可见，PN结正向偏置时，**导通**；反向偏置时，**截止**。这一特性，称为PN结的**单向导电性**，它是PN结最重要的电特性。



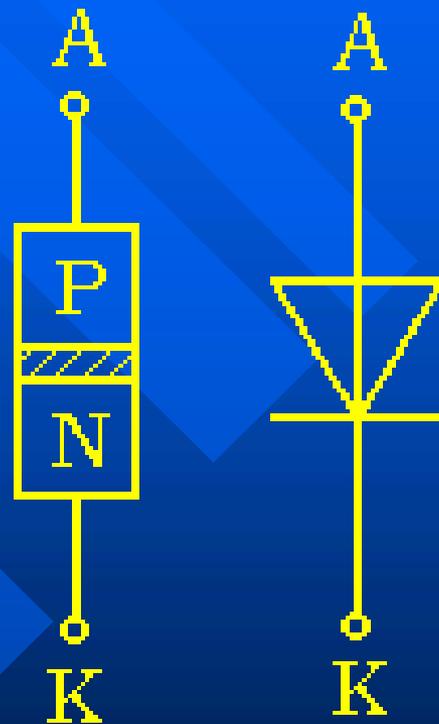
§1.3 二极管

- 一、二极管的结构 
- 二、二极管的伏安特性 
- 三、二极管的主要参数 
- 四、稳压二极管 



一、二极管的结构

在PN结两端引出相应的电极并加上外壳，就制成一个半导体二极管，如图所示。由P区引出的电极叫**正(或阳)极(A)**，由N区引出的电极叫**负(或阴)极(K)**，符号中的箭头方向表示正向导通(即电流)方向。



二极管的种类较多，按其结构可分为点接触型、面接触型、和平面型等。

点接触型二极管结电容小，工作频率高，但不能承受较高的反向电压和较大的电流。这类管子适用于高频检波和脉冲数字电路中的开关元件。

面接触型二极管PN结面积大，允许通过较大的电流，但结电容也大，适用于整流等低频电路。

平面型二极管结面积较大的可用于整流等低频电路；结面积小的适用于高频检波和脉冲数字电路。

若按材料可分为硅管和锗管。按用途分，有普通二极管、整流二极管、检波二极管、开关二极管、稳压二极管等。



二、二极管的伏安特性：

1、PN结的伏安特性

理论证明，流过PN结的电流与PN结两端的电压之间的关系为

$$i_D = I_{R(sat)} (e^{v_D/V_T} - 1) \quad (1.3.1)$$

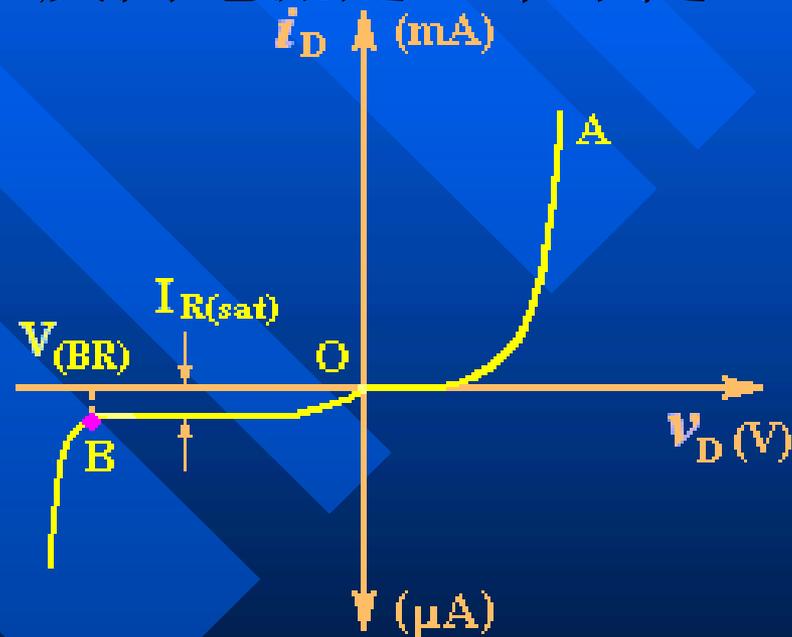
式中， $V_T = kT/q$ 称为**温度的电压当量**，

其中

k 为玻耳兹曼常数， T 为热力学温度， q 为电子的电量。在室温(300K)时，

$$V_T \approx 26\text{mV}$$

把式(1.3.1)绘成曲线，称为PN结的伏安特性曲线，如图所示。图中曲线OA段称为**正向特性**，正向电流随电压 v_D 按指数规律增加。图中曲线OB段称为**反向特性**， $i_D \approx I_{R(sat)}$ ，反向电流是一个不随反向电压变化的常数。当反向电压增大到一定数值，反向电流急剧增大，如图所示，称此现象为PN结的**反向击穿**，对应于电流开始剧增的反向电压，称为**击穿电压** $V_{(BR)}$ 。



2、二极管的伏安特性

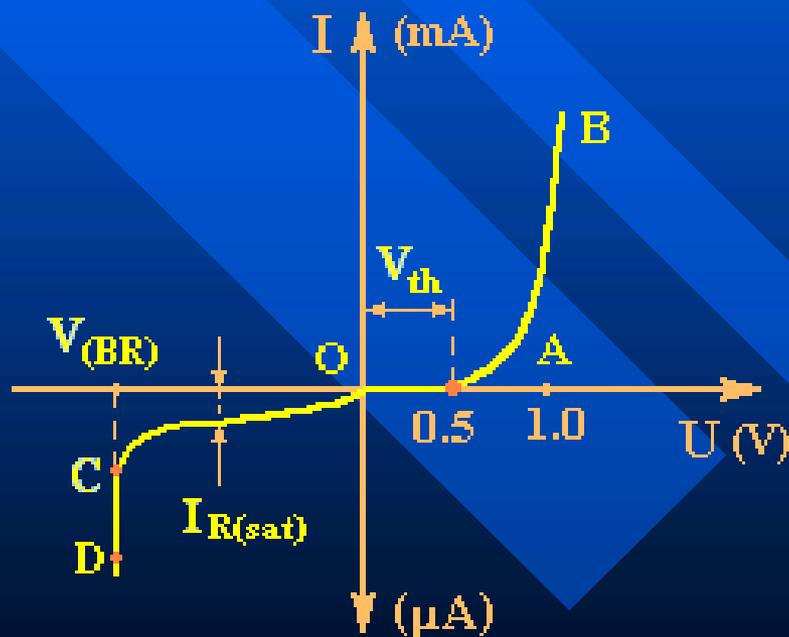
二极管的伏安特性与PN的伏安特性略有

差别，主要是因为：二极管正向偏置时，PN结以外P区和N区的体电阻、电极的接触电阻及引线电阻的存在，使正向电流有所减小；在反向偏置时，由于PN结表面漏电流的存在，使反向电流稍有增大，且随反向电压的增高略有增加。

二极管的伏安特性曲线可以用逐点测量

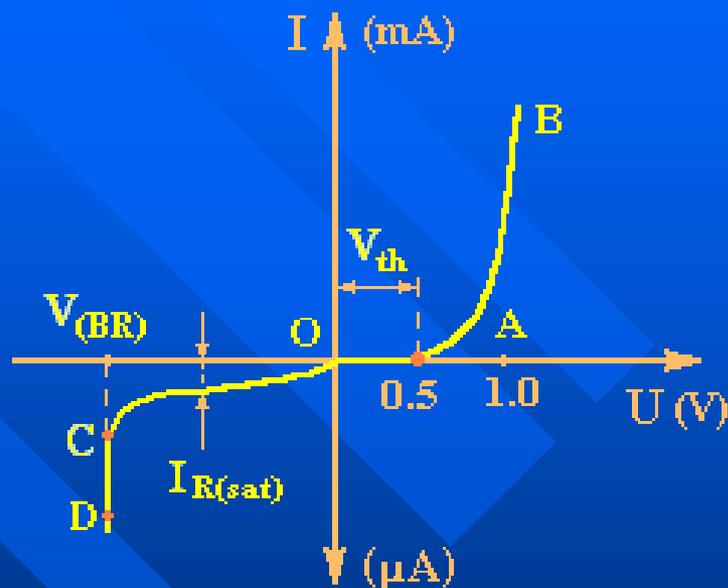
二极管(硅)的伏安特性曲线如图所示。

特性曲线分为两部分：加正向电压时的特性称为**正向特性**(图中右半部分)；加反向电压时的特性称为**反向特性**(图中左半部分)。



(1) 正向特性

当加在二极管上的正向电压比较小时，外电场不足以克服内电场对多子扩散的阻力，正向电流几乎为零(OA段)。只有当加在二极管两端的正向电压超过某一数值时，正向电流才明显增大。正向特性上的这一数值(A点)通常称为“**门限电压**”或“**开启电压**”。

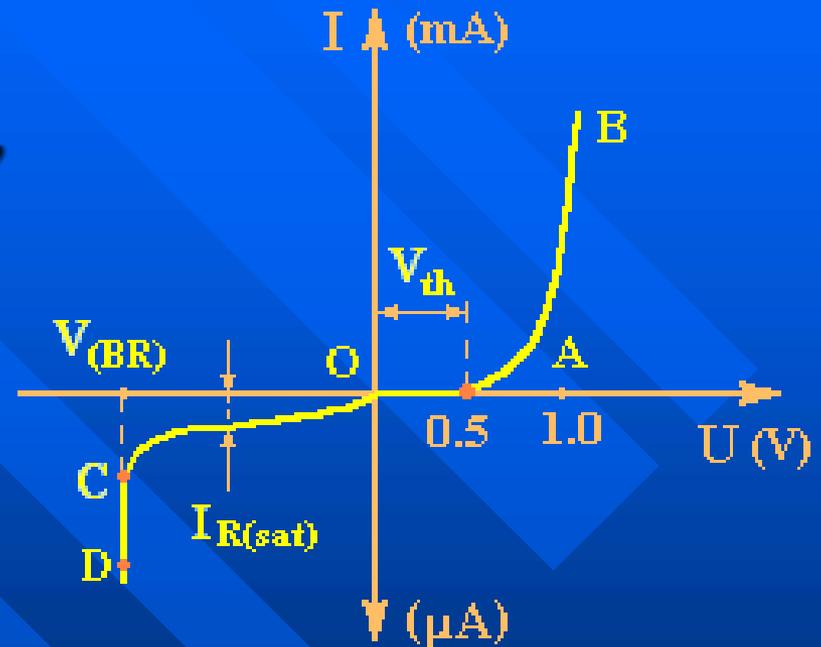


开启电压的大小与二极管的**材料**以及**温度**等因素有关。一般，**硅**二极管的开启电压为**0.5V**左右；**锗**二极管的开启电压为**0.1V**左右。

当正向电压超过开启电压以后，随着电压的升高，正向电流迅速增大。电流与电压的关系基本上是一条指数曲线。二极管正常导通工作时的管压降，硅管通常为0.7V，锗管0.3V。

(2) 反向特性

由图可见，当在二极管上加上反向电压时，反向电流的值很小。且当反向电压超过零点几伏后，反向电流不再随着反向电压的增大而增大，即达到了饱和，这个电流称为**反向饱和电流**，用 $I_{R(sat)}$ 表示。



如果使反向电压继续升高，当超过 $V_{(BR)}$ 以后，反向电流将急剧增大，这种现象称为**击穿**， $V_{(BR)}$ 称为**反向击穿电压**。其原因是外电场强制将原子最外层的价电子从键中拉出，使载流子(自由电子和空穴)数目急剧上升，而处于强电场中的载流子获得能量后，又去碰撞其他的外层电子，这种连锁反应造成了载流子突然急剧增加，从而破坏了二极管的单向导电性。即二极管击穿时，不再具有单向导电性。

必须说明一点，发生击穿并不意味着二极管被损坏，实际上，当反向击穿时，只要注意控制反向电流的数值(加限流电阻)，不使其过大，以免过热而烧坏二极管，则当反向电压降低时，二极管的性能可以恢复正常。

* P16 “限幅电路”



三、二极管的主要参数：

1、最大正向电流 I_{FM} ：指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。 I_{FM} 的数值由二极管温升(PN结的面积、材料和散热条件)所限定。管子使用时不应

超过此值，否则可能使二极管过热而损坏。

2、反向峰值电压 V_{RM} ：指二极管在正常使用时，不允许超过的反向电压的极限值。为确保管子工作安全，通常反向峰值电压 $V_{RM} = \frac{1}{2} V_{(BR)}$ 为击穿电压 $V_{(BR)}$ 的一半，即。

i、反向直流电流 $I_{R(sat)}$ ：指二极管未被击穿时的反向直流电流， $I_{R(sat)}$ 越小，管子的单向导电性越好。

4、最高工作频率 f_M :

指二极管具有单向导电性的最高工作频率。其值主要由管子的势垒电容和扩散电容的大小决定。

二极管的参数反映二极管性能好坏，是选择使用二极管的依据。二极管的类型和参数可从半导体器件手册中查出。

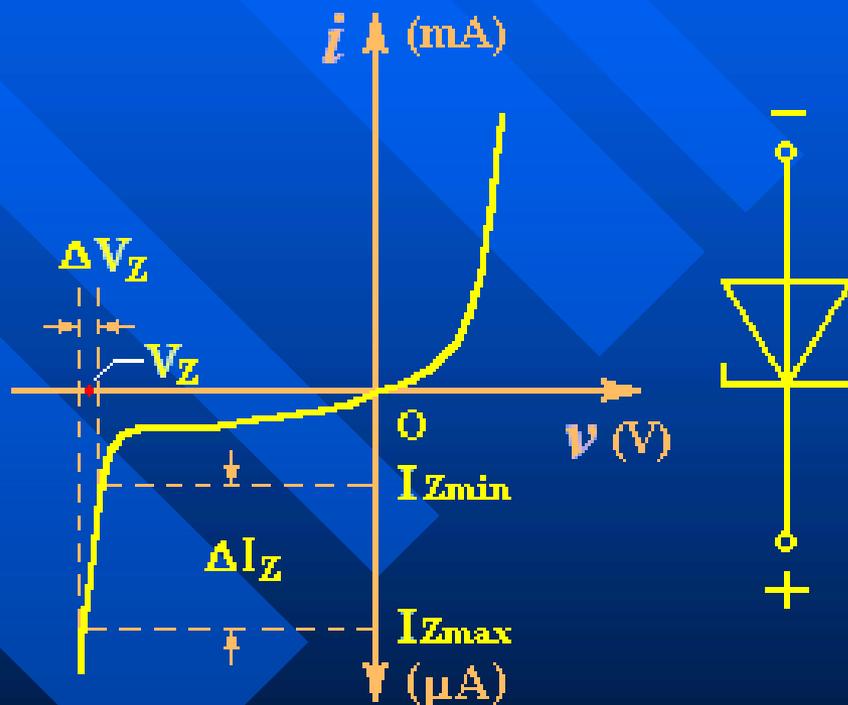


四、稳压二极管

稳压二极管简称稳压管，实质是一个面接触型硅二极管，具有陡峭的反向击穿特性，通常工作在反向击穿状态。

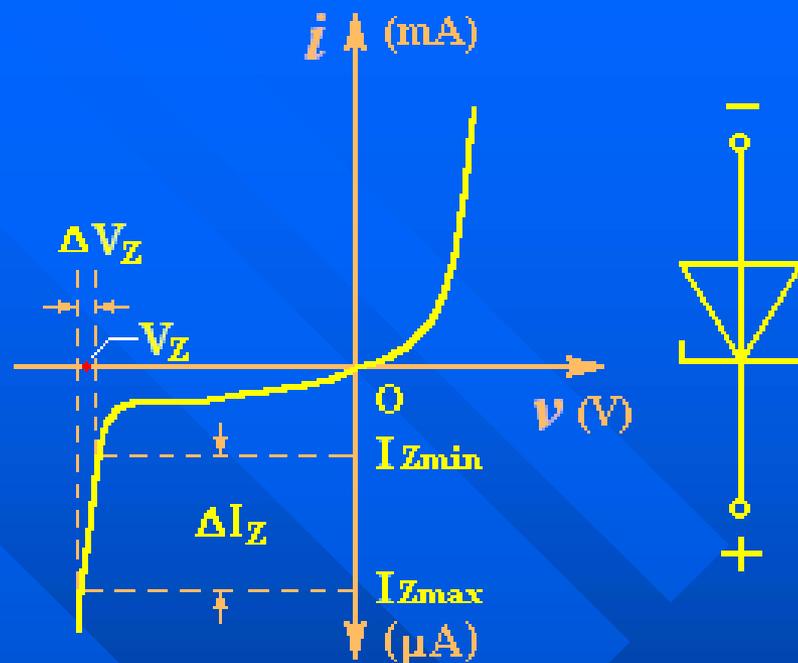
1、稳压管的伏安特性：

当稳压管处于击穿状态时，反向电流的变化量 ΔI_Z 较大时，引起管子两端的电压变化量 ΔV_Z 却很小，说明其具有“**稳压**”特性。



图中 V_Z 表示反向电压，即稳压管的稳定电压。由图可以看出击穿特性越陡，稳压管的动态电阻 r_z 越小，稳压性能越好。

$$r_z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$



稳压管除在制造工艺上保证其能在反向击穿状态下长期工作，外部电路还应有限流措施，否则，流过稳压管的电流超过其最大允许电流，稳压管就会因热击穿而损坏。

2、主要参数:

- (1) 稳定电压 V_Z : 指稳压管正常工作时的稳定电压值。
- (2) 稳定电流 I_Z : 是使稳压管正常工作时的参考电流, 若工作电流低于 I_Z , 则管子的稳压性能变差; 如果工作电流高于 I_Z , 只要不超过额定功耗, 稳压管可以正常工作 (一般说来, 工作电流较大时, 稳压管稳压性能较好。)

(3) 动态电阻 r_z ：指稳压管正常工作时的电压变化量与电流变化量之比，即

$$r_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z}$$

它是衡量稳压管稳压性能好坏的指标， r_z 越小稳压性能越好。

(4) 最大稳定电流 I_{zmax} 和最小稳定电流 I_{zmin} ：

即稳压管的最大和最小工作电流。

稳压管的稳压原理参见P17“稳压电路”



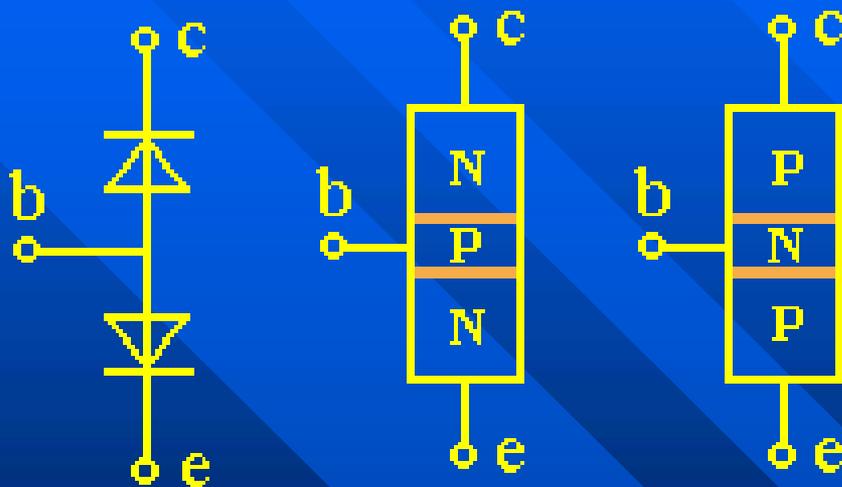
§1.4 双极型晶体管

- 一、晶体管的结构 
- 二、晶体管的放大作用 
- 三、晶体管的共射组态特性曲线 
- 四、晶体管的主要参数 



一、晶体管的结构：

双极型晶体管简称三极管或晶体管。从结构上看，晶体管相当于两个二极管背靠背地串联在一起，如图所示。



根据PN结的结合方式不同，可分为**PNP**和**NPN**两种类型；根据材料的不同，又有**硅管**和**锗管**之分。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/226220235233010132>