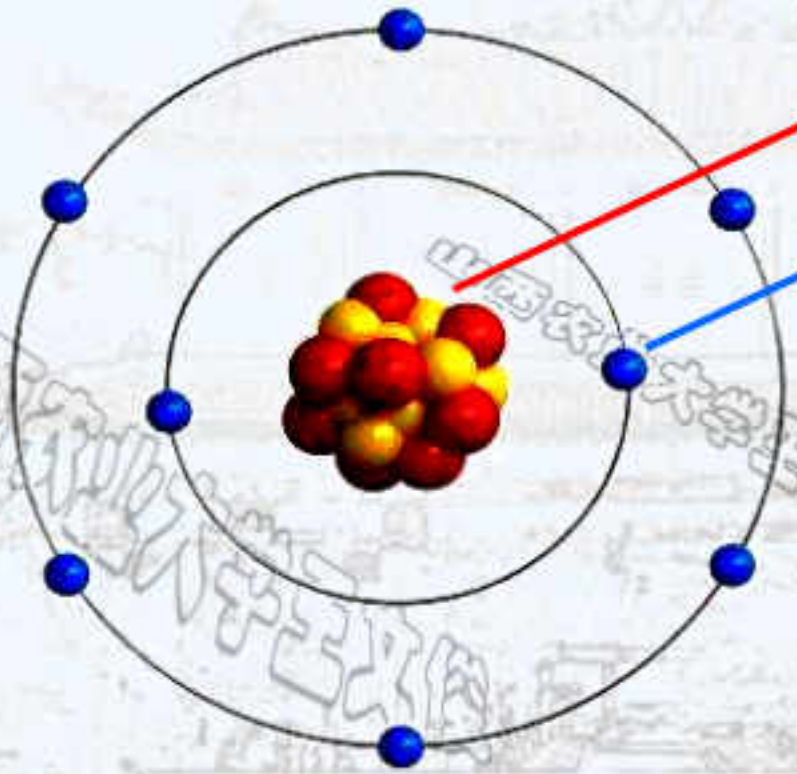
# 第1章 常用半导体器件

——王文俊

山西农业大学王文俊

# 一、本征半导体

- 1、原子的结构



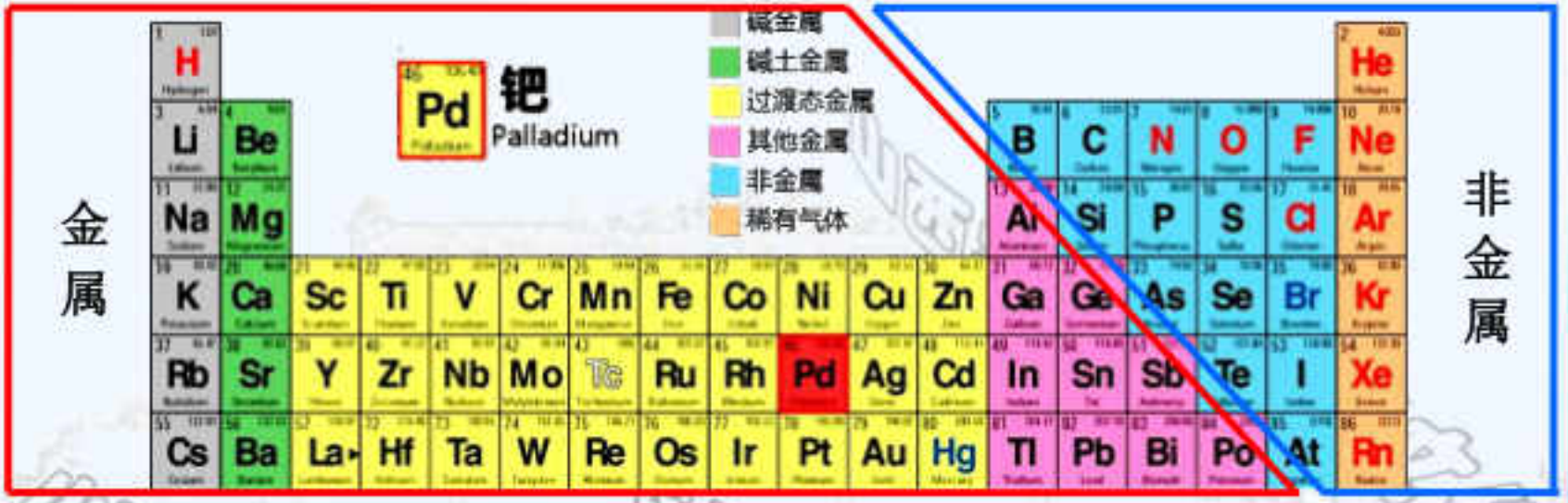
原子核：带正电(+)

核外电子：带负电(-)

受外界环境影响时，最外层电子容易脱离原子核的束缚，形成自由电子。

原子核对最外层电子吸引力的强弱，决定了物质的导电性。

- 2、半导体




| 导体 | 半导体 | 绝缘体 |
| --- | --- | --- |
| • 原子核对最外层电子束缚能力弱。<br>• 常温下存在大量的自由电子，导电能力强。<br>• 例：铁(Fe)、铜(Cu) | • 原子核对最外层电子的束缚能力介于两者之间。<br>• 导电能力介于导体和绝缘体之间。<br>• 例：硅(Si)、锗(Ge) | • 原子核对最外层电子束缚能力强。<br>• 常温下自由电子极少，导电能力极差。<br>• 例：碳(C)、磷(P) |

- 3、本征半导体

将纯净的半导体经过一定的工艺过程制成的单晶体，称为本征半导体。

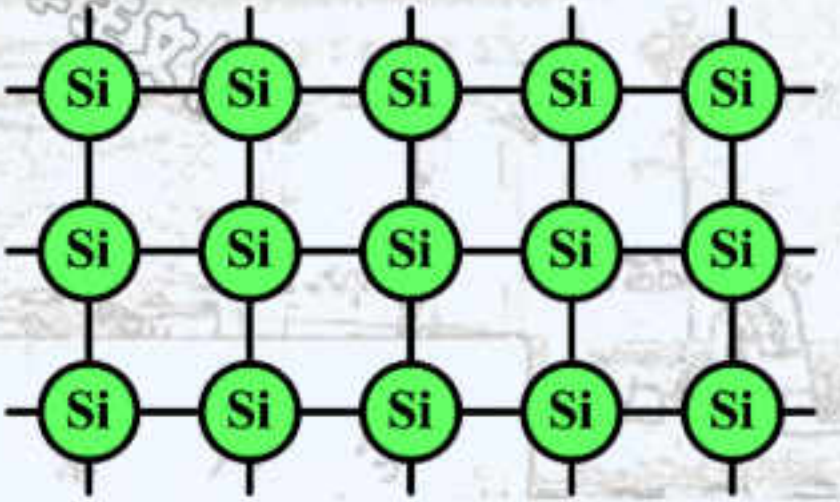
单晶硅

**晶格**

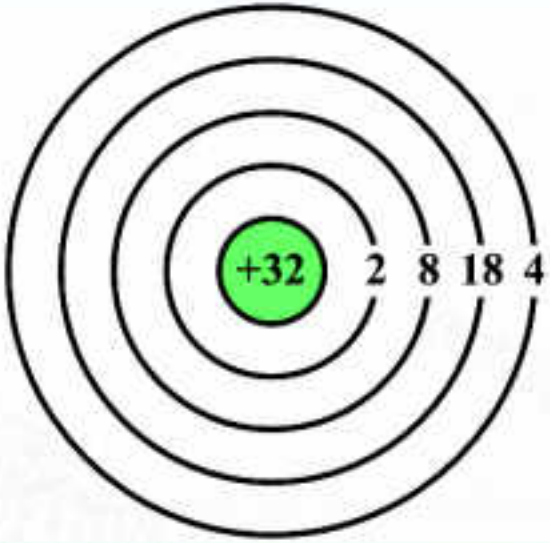
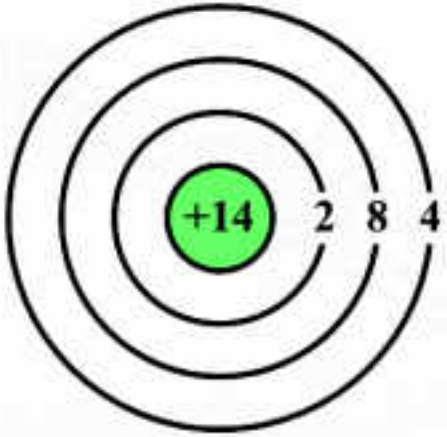
- 晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵。

单晶电池片

晶体的平面结构



- 4、原子结构的简化画法

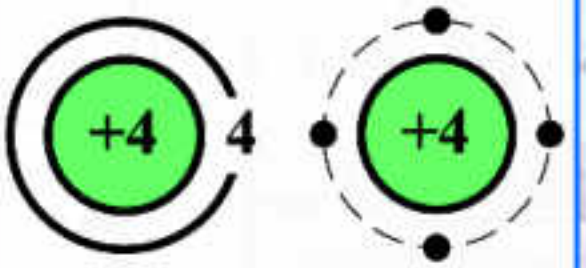
| 锗(Ge) | 硅(Si) |
| --- | --- |
|  |  |





核外电子只保留最外层电子，原子核只保留与最外层电子数相等的正电荷数。

简化画法

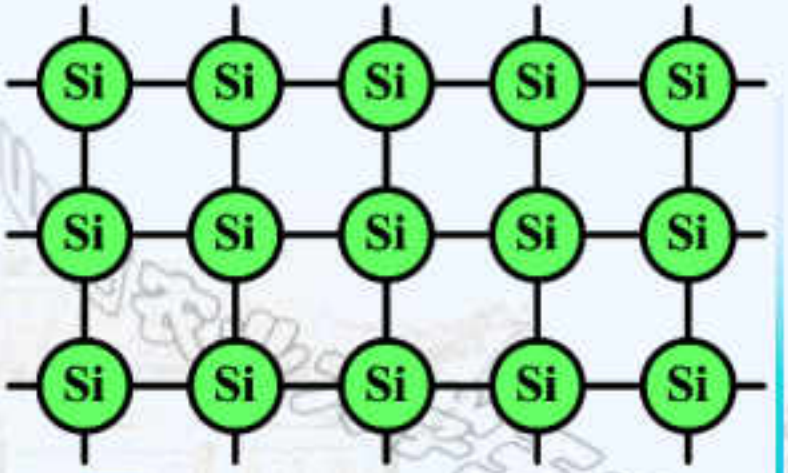


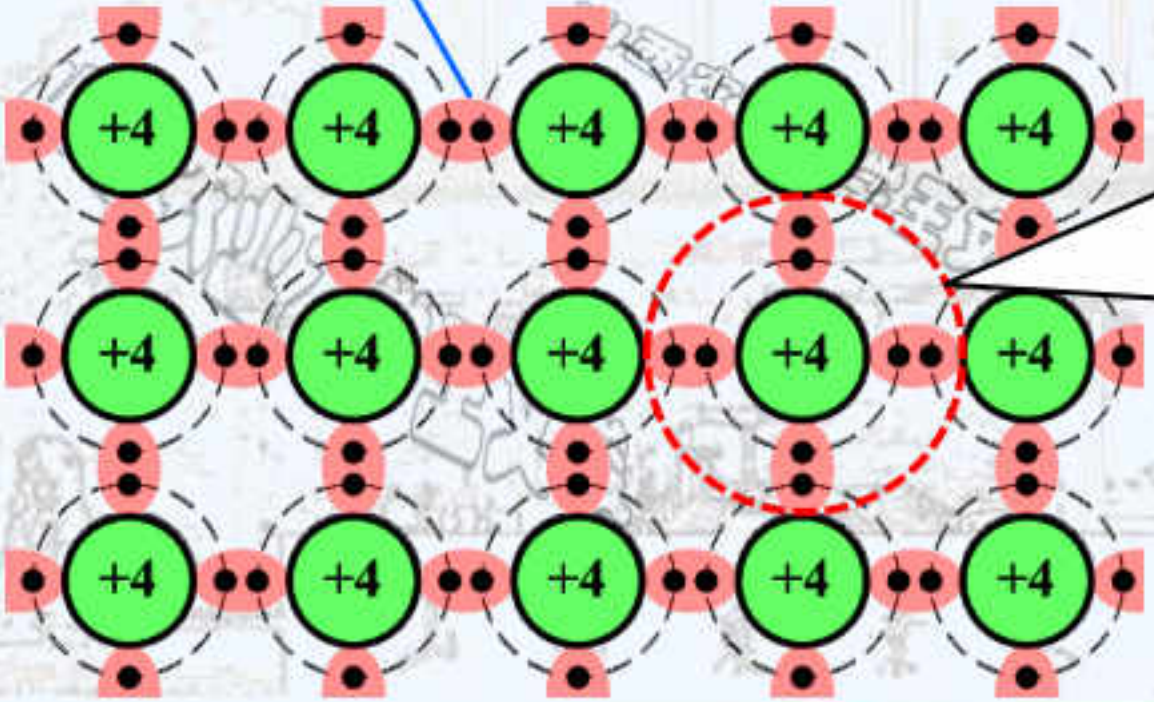
- 5、共价键

**共价键**

- 相邻原子各提供一个电子，形成共用电子对。
- 原子间通过共用电子对所形成的化学键，称为共价键。

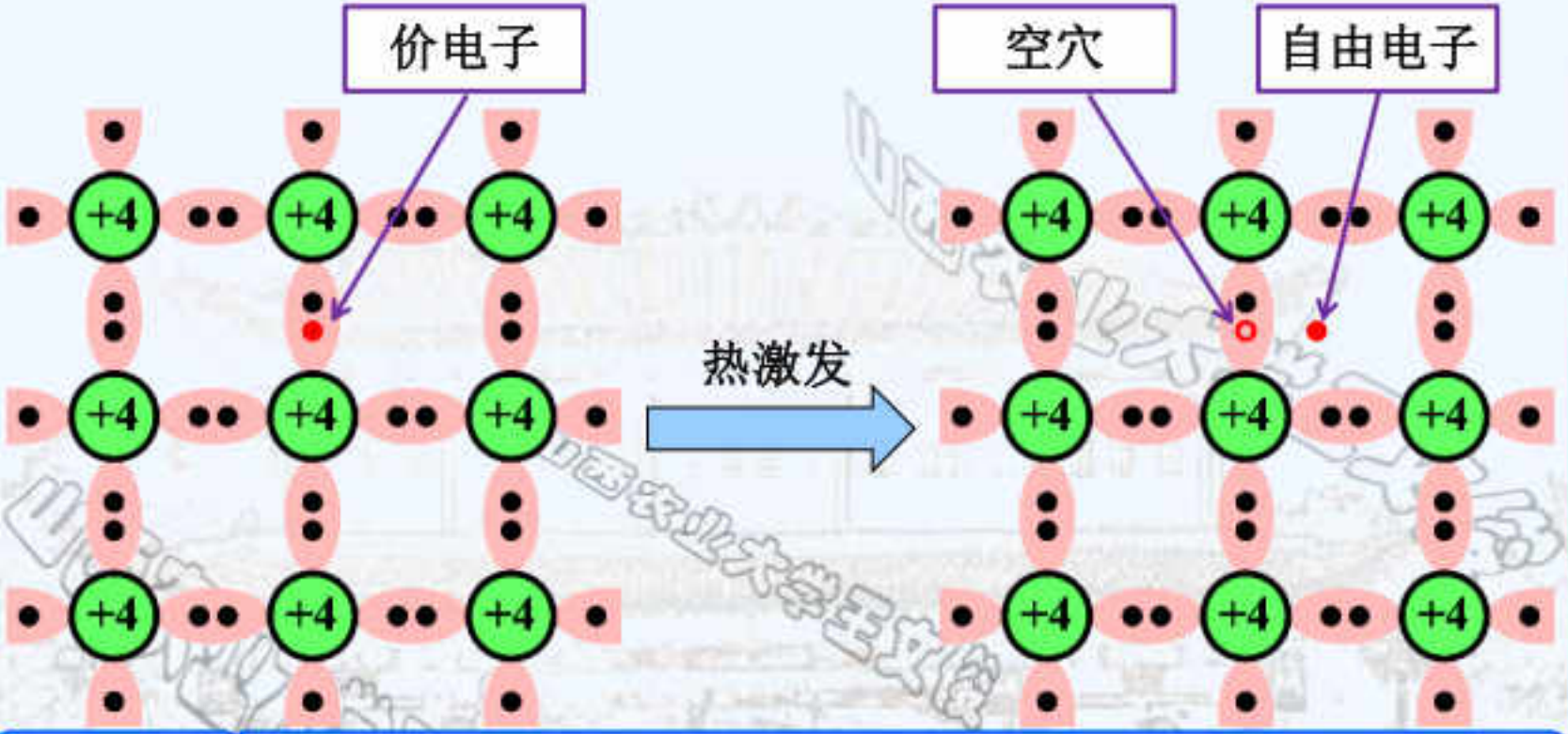
晶体的平面结构



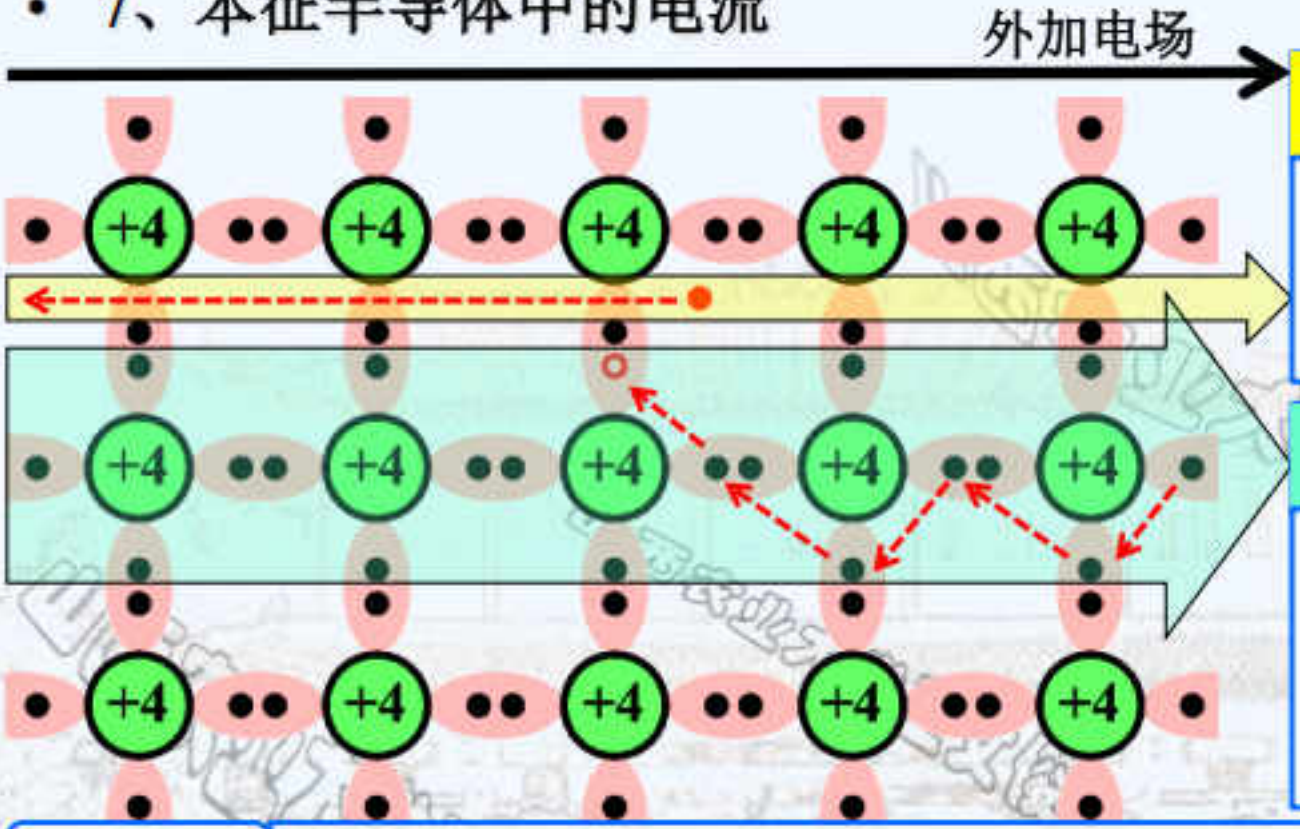

每个Si(或Ge)原子与相邻原子形成4个共价键，构成8电子稳定结构。

- 6、本征半导体中的两种载流子




| | |
|---|---|
| 自由电子 | • 价电子由于热运动，挣脱共价键的束缚变成自由电子。 |
| 空穴 | • 共价键中留下的空位置，称为空穴。空穴带正电。 |
| 数量关系 | • 本征半导体中，自由电子与空穴成对出现，数量相等。 |

- 7、本征半导体中的电流




**电子电流**

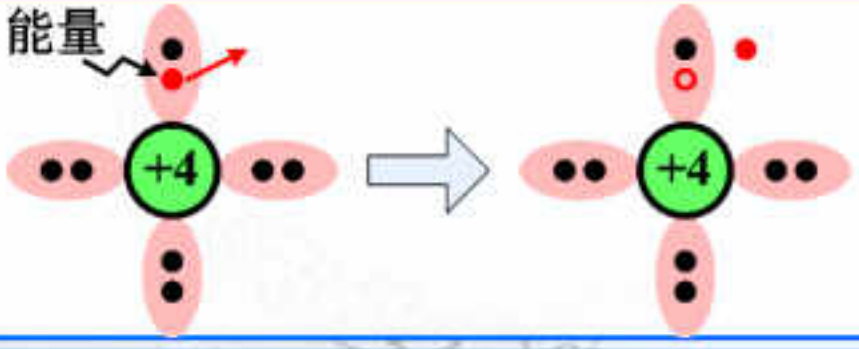
自由电子定向移动，形成电子电流。

**空穴电流**

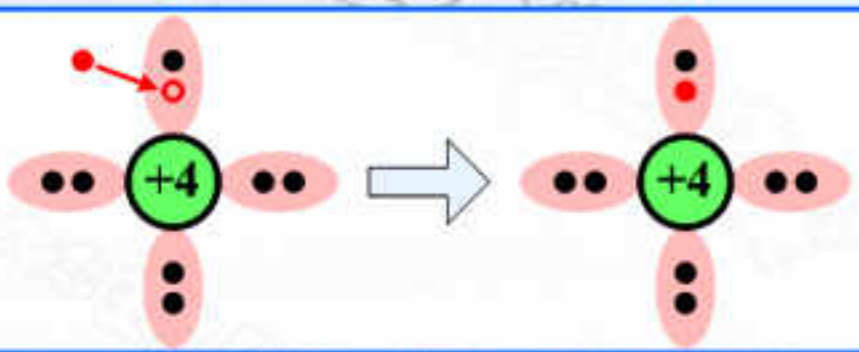
价电子按一定方向依次填补空穴，形成空穴电流。

| | |
|---|---|
| 总电流 | • 本征半导体的总电流为电子电流与空穴电流之和。 |
| 载流子 | • 运载电荷的粒子称为载流子。 |
| 与导体的区别 | • 导体只有一种载流子，只有自由电子导电。<br>• 半导体有两种载流子，自由电子与空穴均参与导电。 |

- 8、本征半导体中的载流子浓度

| 本征激发 |  |
|---|---|
| 半导体在热激发下产生自由电子和空穴的现象。 | |



| 复合 |  |
|---|---|
| 自由电子与空穴相遇后填补空穴，使两者同时消失的现象。 | |



| | |
|---|---|
| 动态平衡 | • 一定温度下，本征激发所产生的自由电子与空穴对，与复合的自由电子与空穴对数目相等，达到动态平衡。 |
| 载流子浓度 | • 一定温度下，本征半导体中的载流子浓度是一定的，并且自由电子与空穴的浓度相等。 |

- 9、温度对本征半导体中载流子浓度的影响

| | |
|---|---|
| 本征半导体载流子浓度 | $n_i = p_i = K_1 T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_{GO}}{2kT}}$ |
| $T = 0$ K | • 自由电子与空穴浓度为0，不导电（绝缘体）。 |
| $T$ 升高 | • 载流子浓度升高，导电能力增强。 |
| $T$ 降低 | • 载流子浓度降低，导电能力减弱。 |

**本征半导体导电的特点**

- 导电性能很差
- 与环境温度密切相关

利用半导体材料对温度的敏感性，制作热敏和光敏器件。

温度稳定性差，使用时需进行温度补偿，以降低温度的影响。

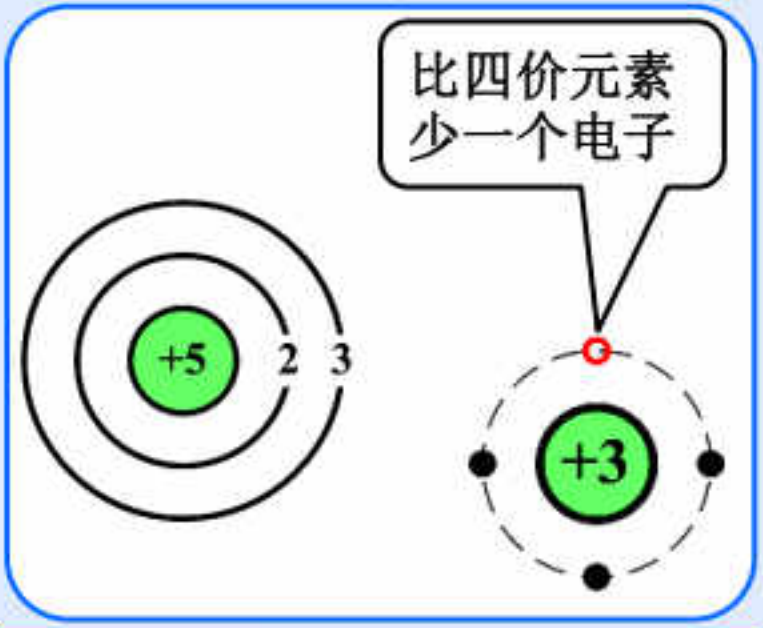
# 二、杂质半导体

- **1、杂质元素**

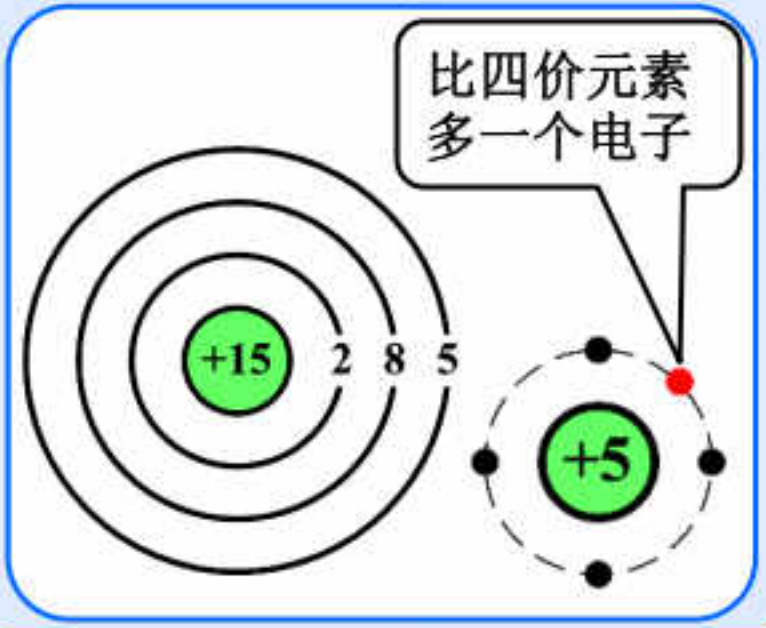
在本征半导体中，掺入少量合适的杂质元素，即可得到杂质半导体。

根据掺入杂质元素的不同，分为不同的半导体。

三价元素（如：硼）

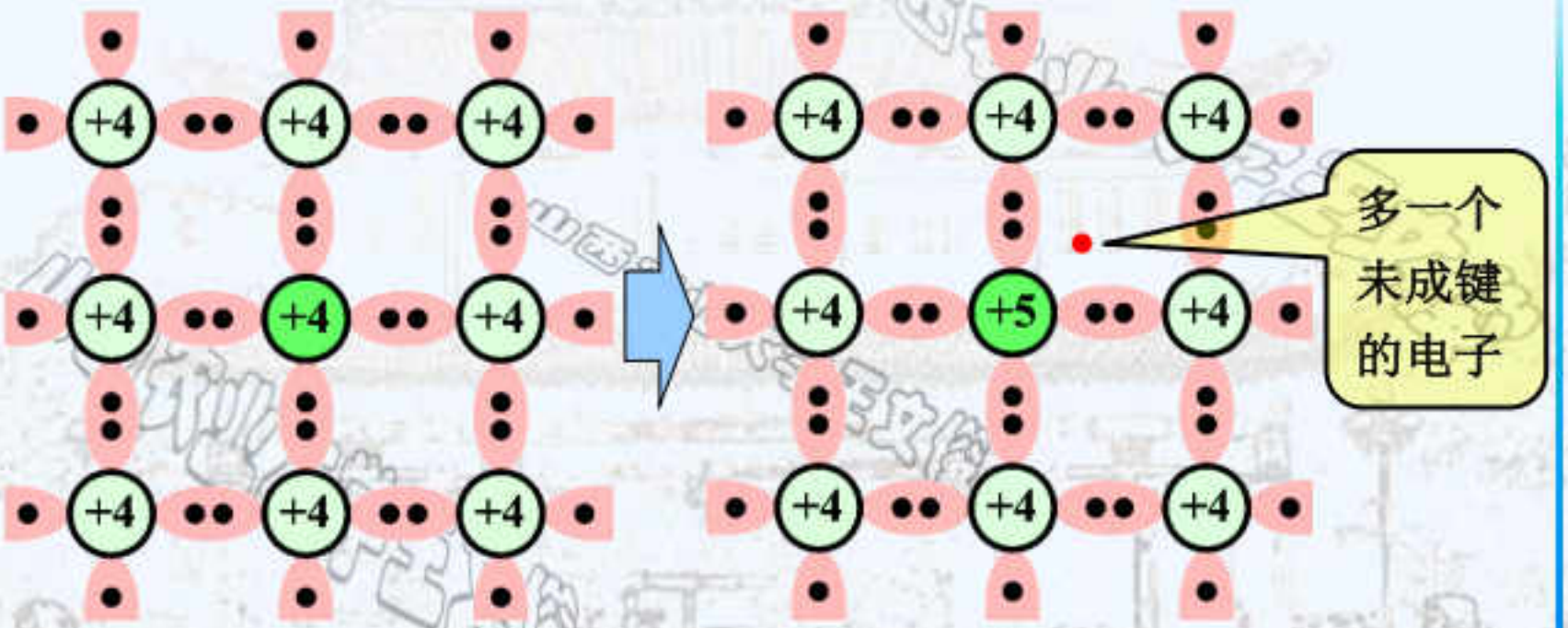



五价元素（如：磷）



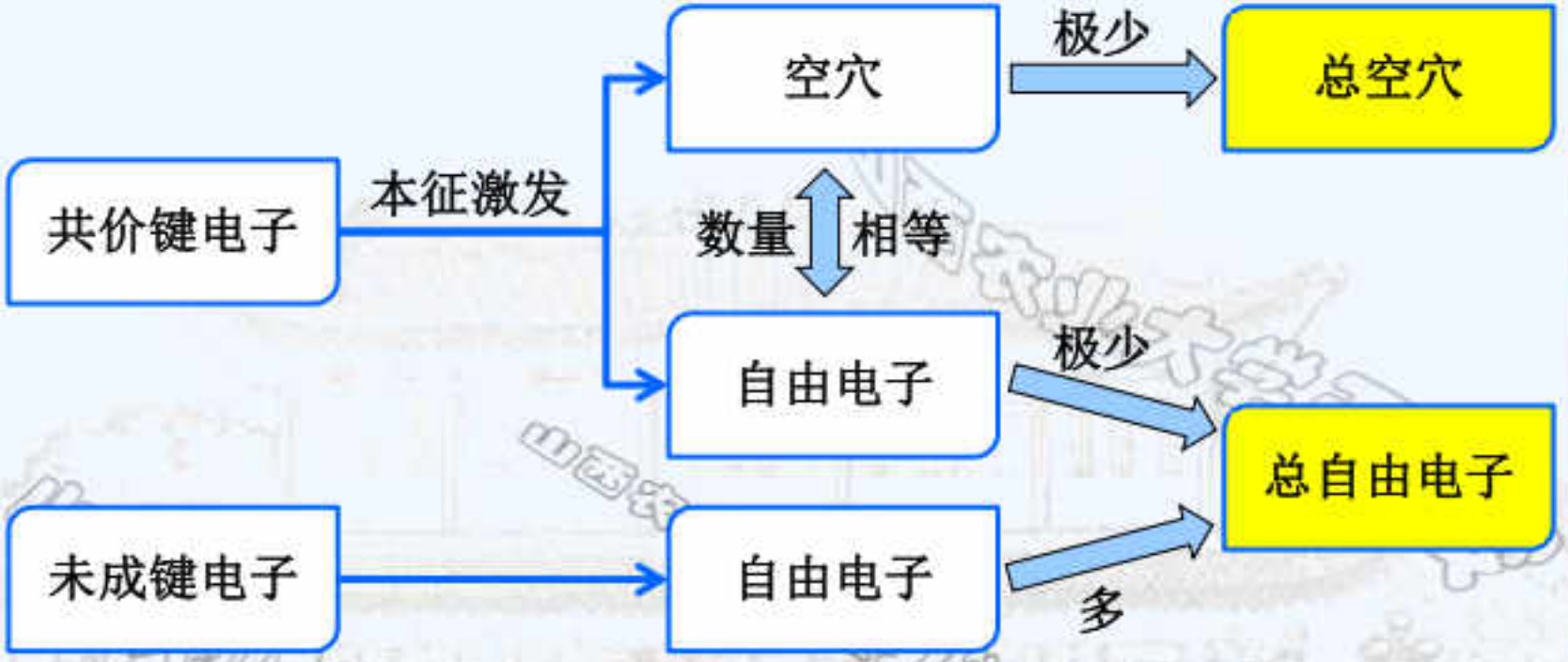
- 2、N型半导体

在纯净的硅晶体中掺入五价元素，使之取代晶格中硅/锗原子的位置，就形成了N型半导体。 (Negative, 负)




| 施主原子 | • 每个杂质原子都能提供一个未成键的电子。<br>• 由于杂质原子能够提供电子，因此称之为施主原子。 |
|---|---|

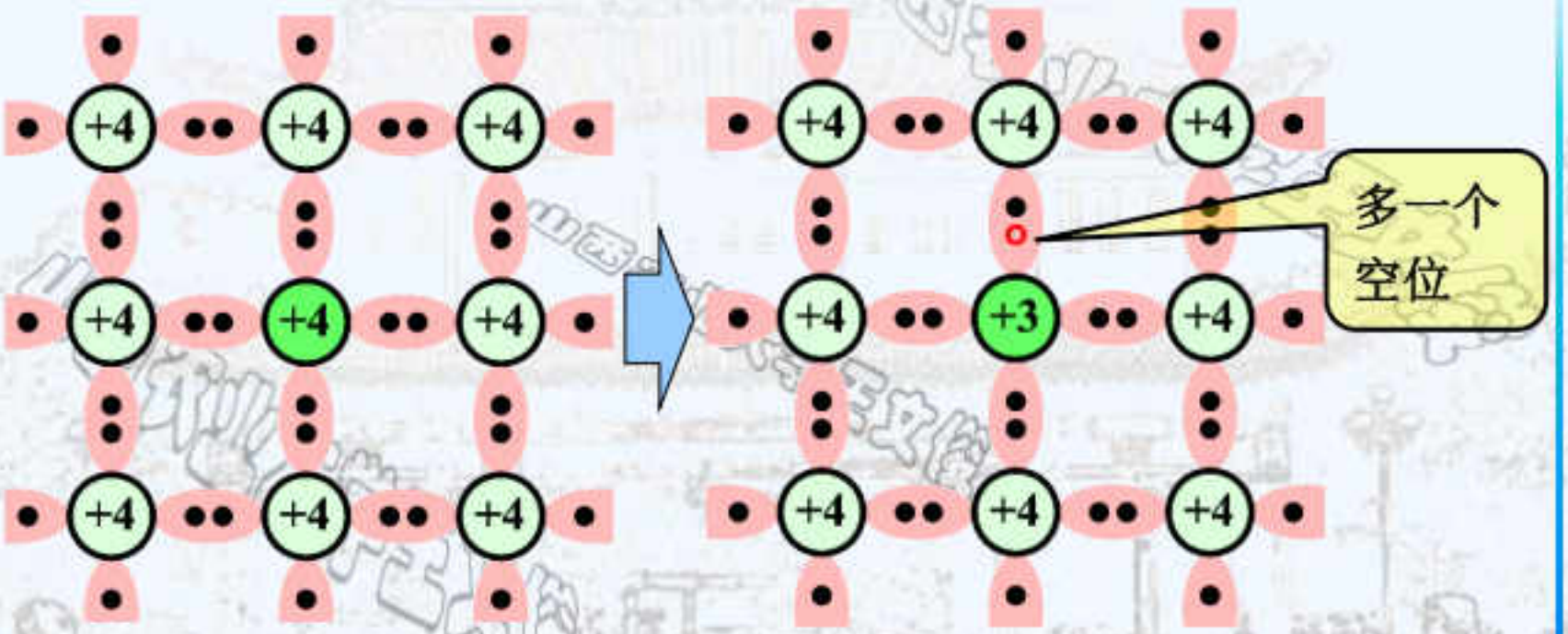
- 3、N型半导体中的载流子




| | |
|---|---|
| 多子<br>少子 | • 由于空穴数量少，因此称为少数载流子（少子）。<br>• 由于自由电子数量多，因此称为多数载流子（多子）。 |
| 导电<br>能力 | • N型半导体主要依靠带负电的自由电子（多子）导电。<br>• 掺入杂质越多，自由电子浓度越高，导电能力越强。 |

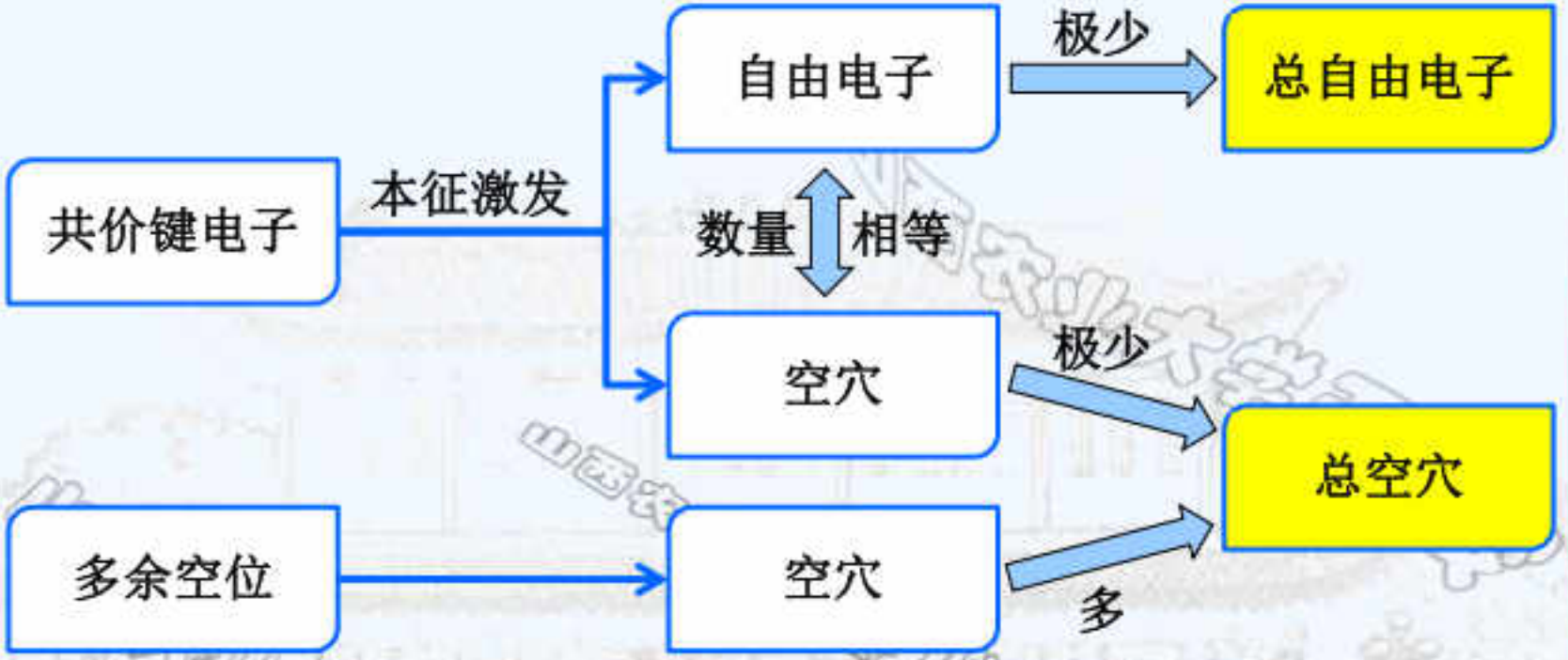
- 4、P型半导体

在纯净的硅晶体中掺入三价元素，使之取代晶格中硅/锗原子的位置，就形成了P型半导体。(Positive，正)




| 受主原子 | • 每个杂质原子都能吸收一个电子（提供一个空位）。<br>• 由于杂质原子能够吸收电子，因此称之为受主原子。 |
|---|---|

- **5、P型半导体中的载流子**




| | |
|---|---|
| 多子<br>少子 | • 由于自由电子数量少，因此称为少数载流子（少子）。<br>• 由于空穴数量多，因此称为多数载流子（多子）。 |
| 导电<br>能力 | • P型半导体主要依靠带正电的空穴（多子）导电。<br>• 掺入杂质越多，空穴浓度越高，导电能力越强。 |

- 6、载流子浓度

温度的影响

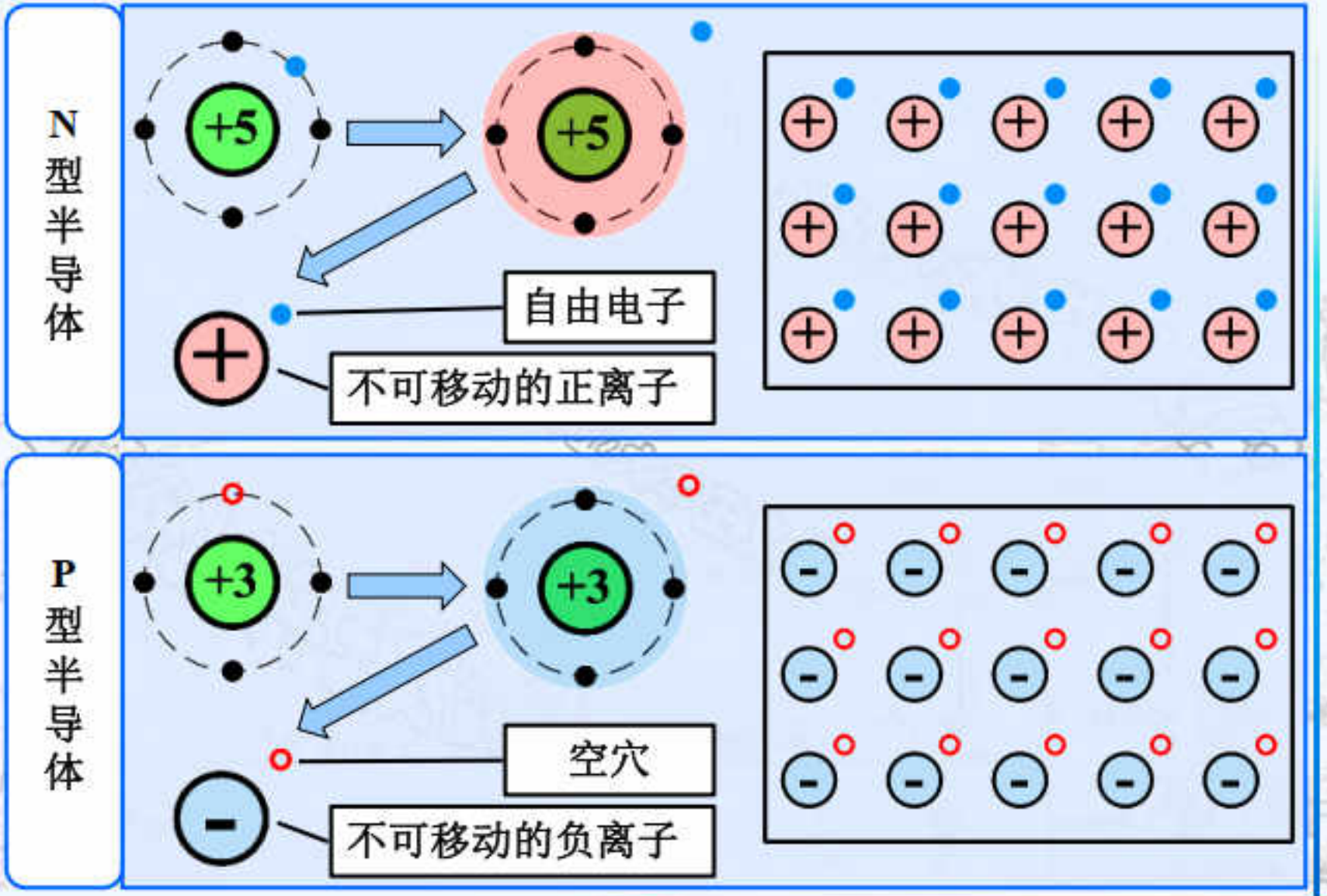
- 多子主要由所掺的杂质原子提供，其浓度约等于所掺杂质原子的浓度，受温度影响很小。
- 少子由本征激发形成，其浓度很低，但对温度非常敏感，影响了半导体器件的性能。

多子与少子的关系

掺杂浓度↑ ⇨ 多子浓度↑ ⇨ 复合速度↑ ⇨ 少子浓度↓

- 多子浓度越高，少子浓度越低。

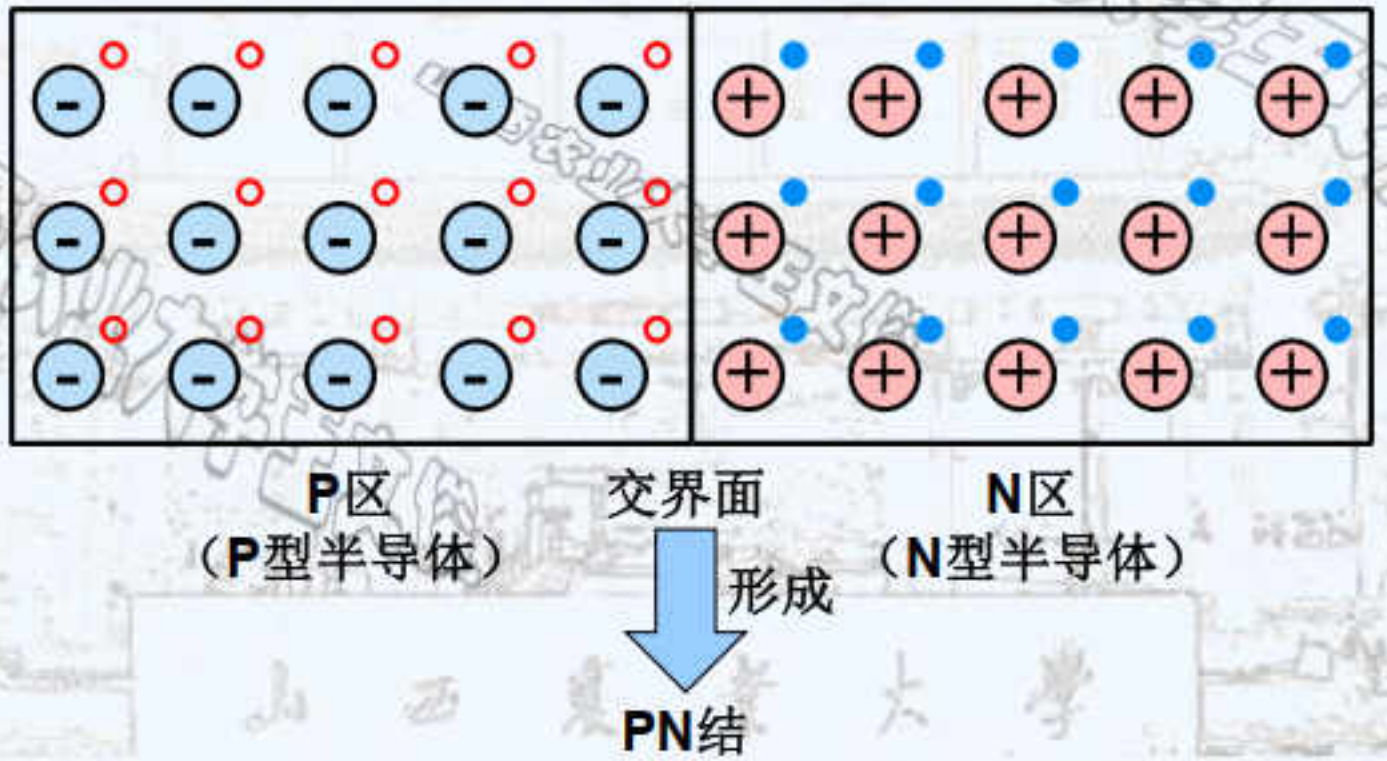
- 7、杂质半导体的简略画法



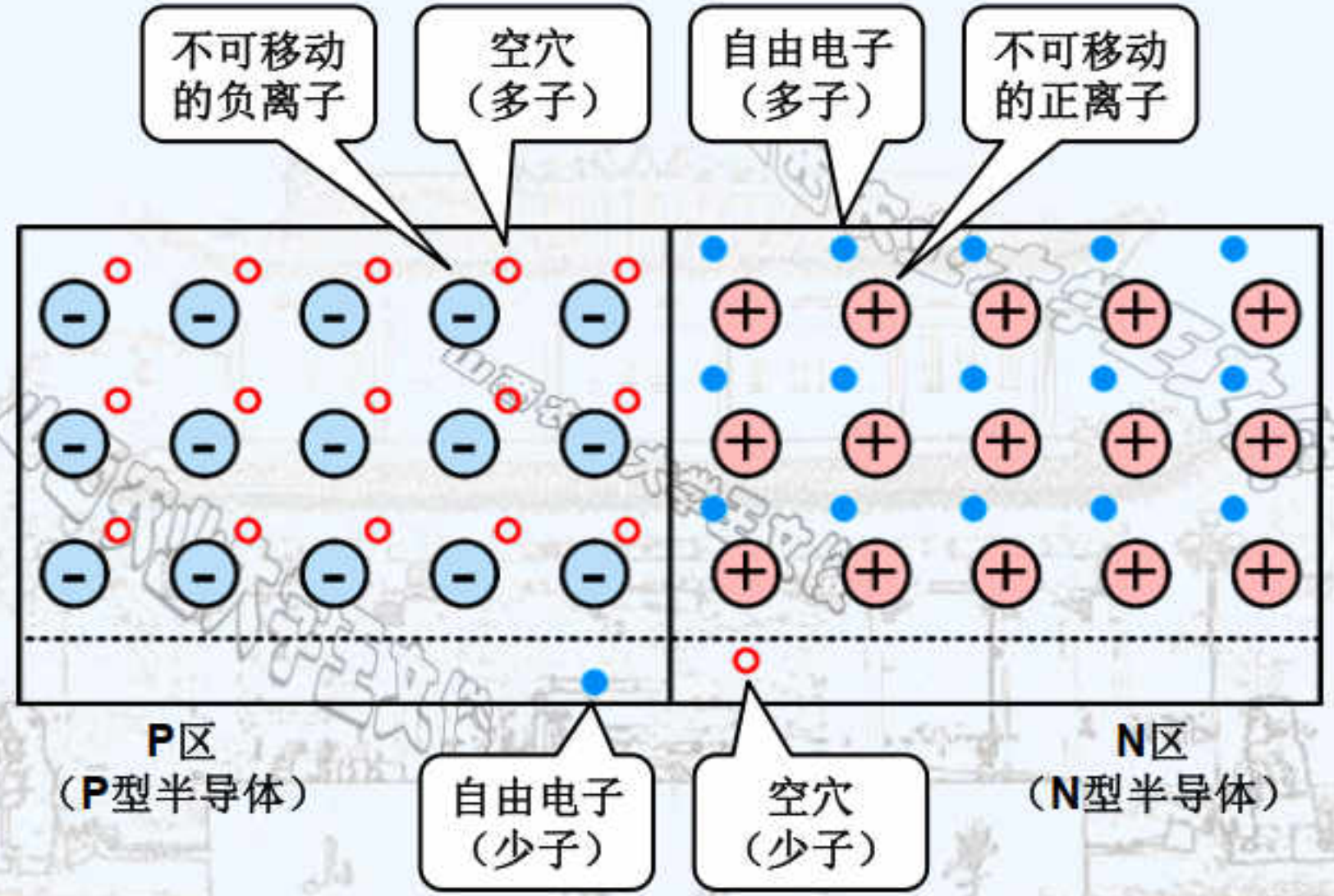
# 三、PN结

- 1、引言

采用不同的掺杂工艺，将P型半导体与N型半导体制作在同一硅片上，在它们的交界面就形成了PN结。



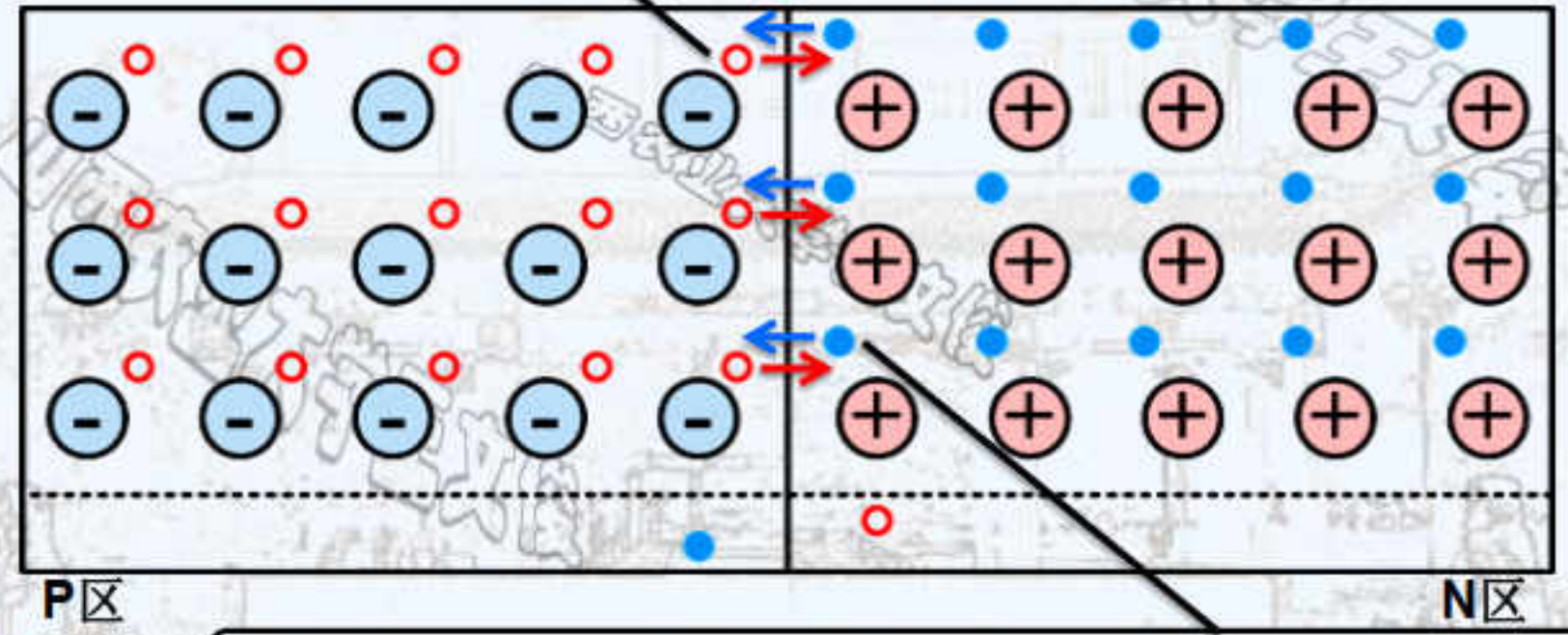
- 2、两种半导体中的载流子



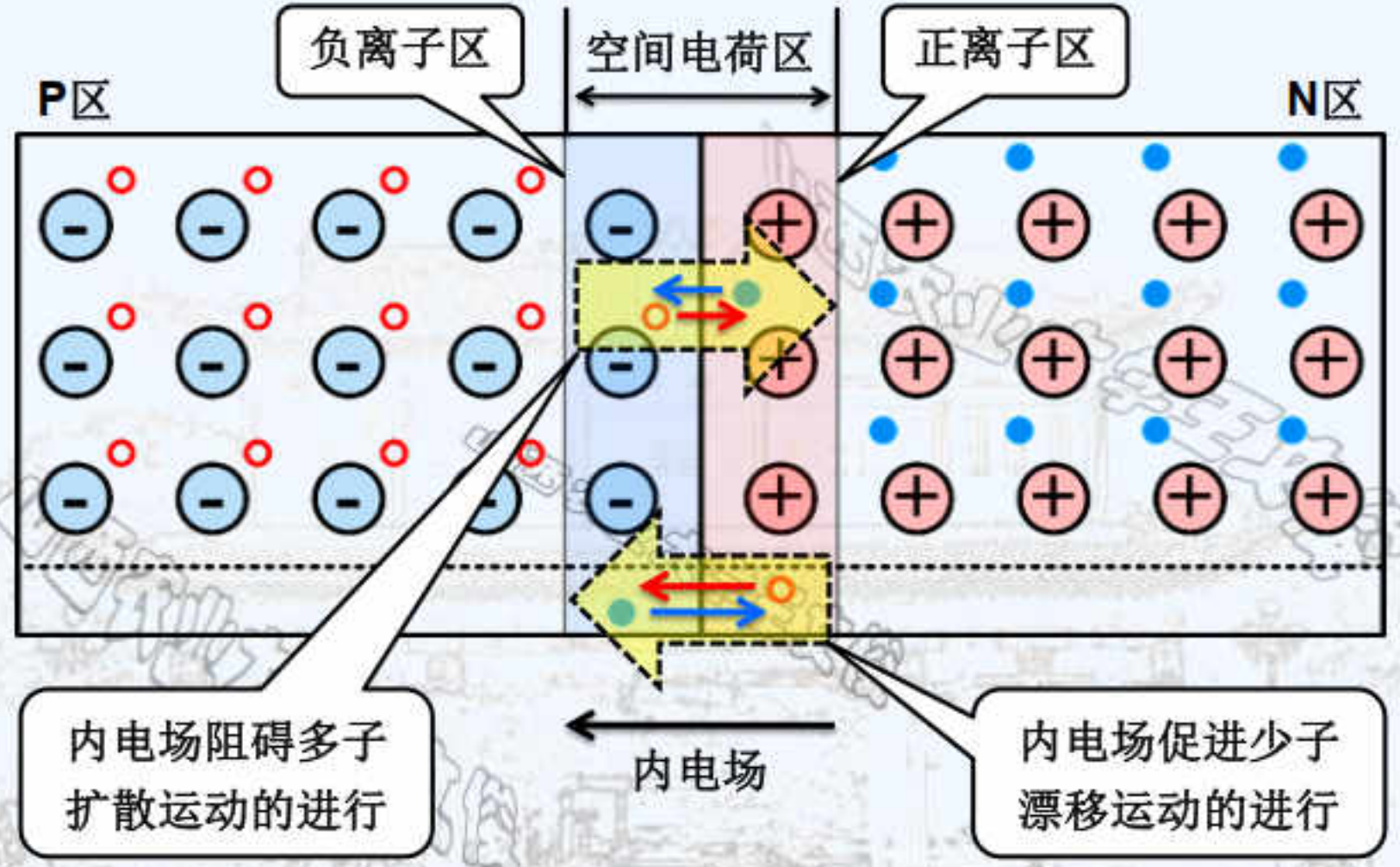
- 3、PN结的形成

物质总是从浓度高的地方向浓度低的地方运动，这种由于浓度差而产生的运动称为扩散运动。

P区的空穴（多子）向N区扩散，并与N区的自由电子复合。




N区的自由电子（多子）向P区扩散，并与P区的空穴复合。



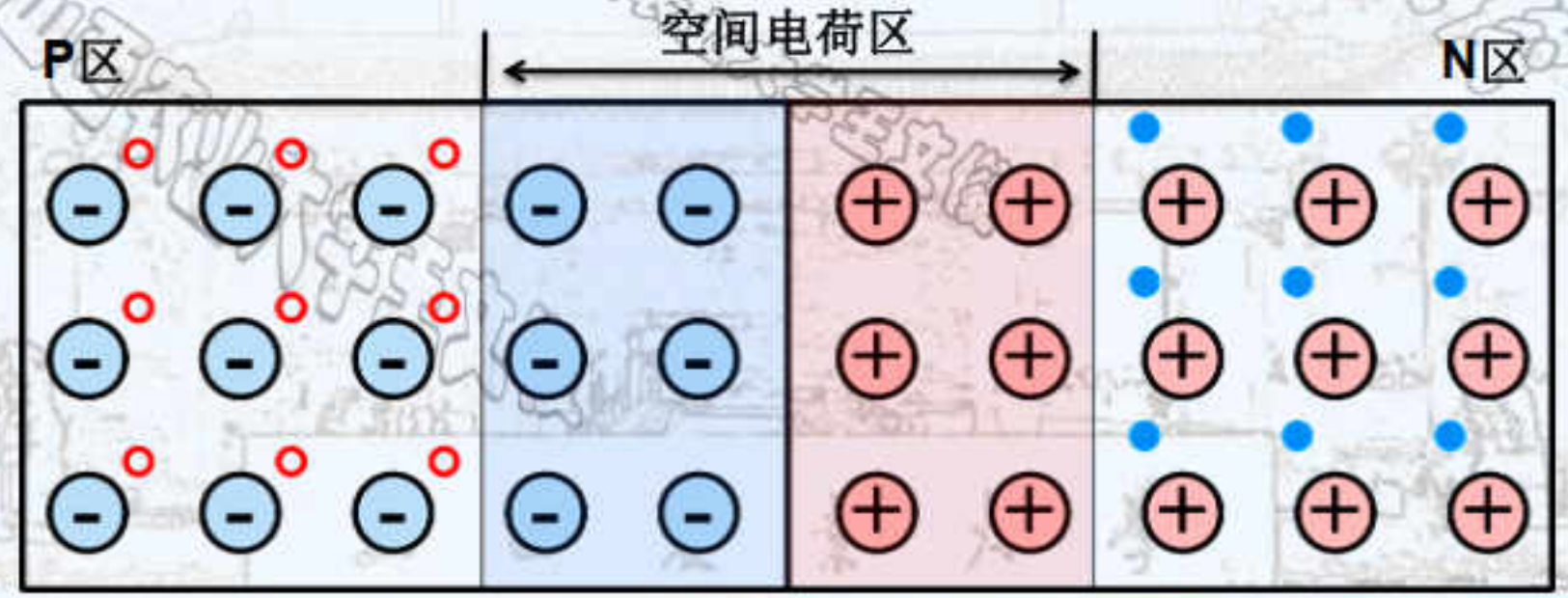

在电场力作用下，载流子的运动称为漂移运动。

多子扩散运动 —产生→ 空间电荷区（内电场）

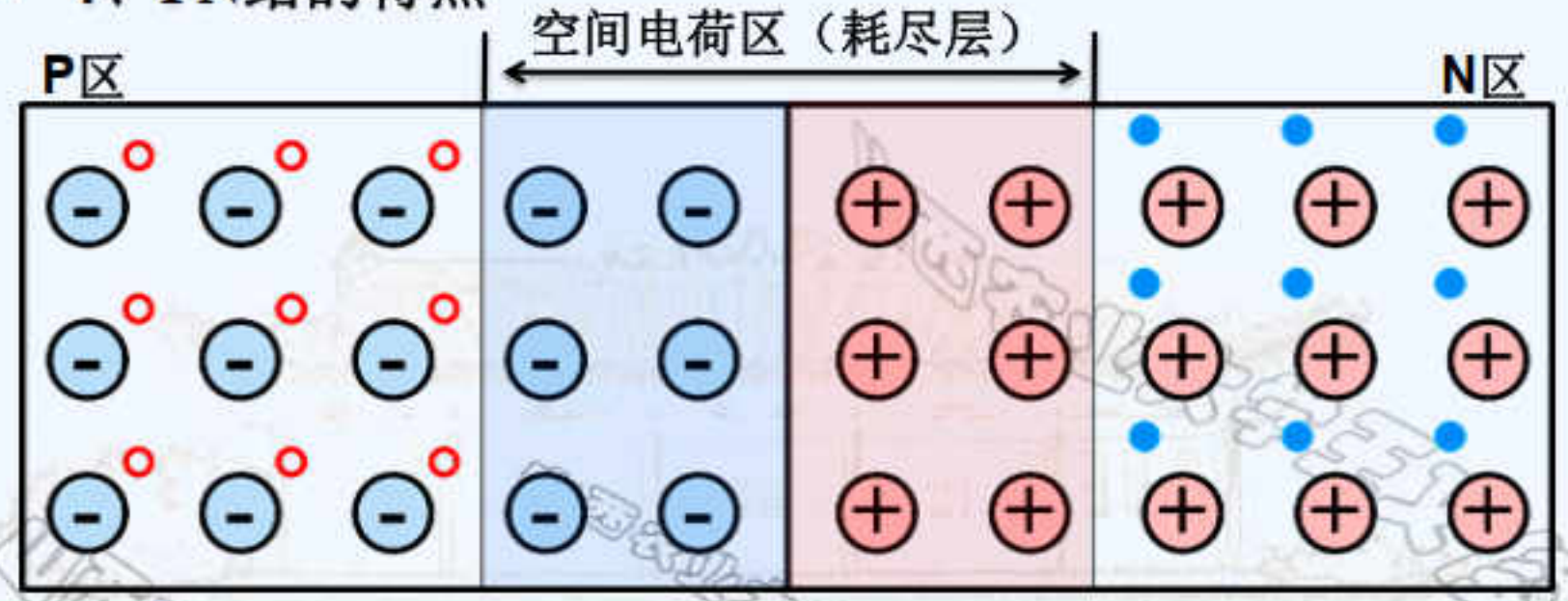
空间电荷区（内电场） —抑制→ 多子扩散运动

空间电荷区（内电场） —促进→ 少子漂移运动

在无外电场和其他激发作用下，参与扩散运动的多子的数目等于参与漂移运动的少子的数目，从而达到动态平衡，形成了**PN**结。



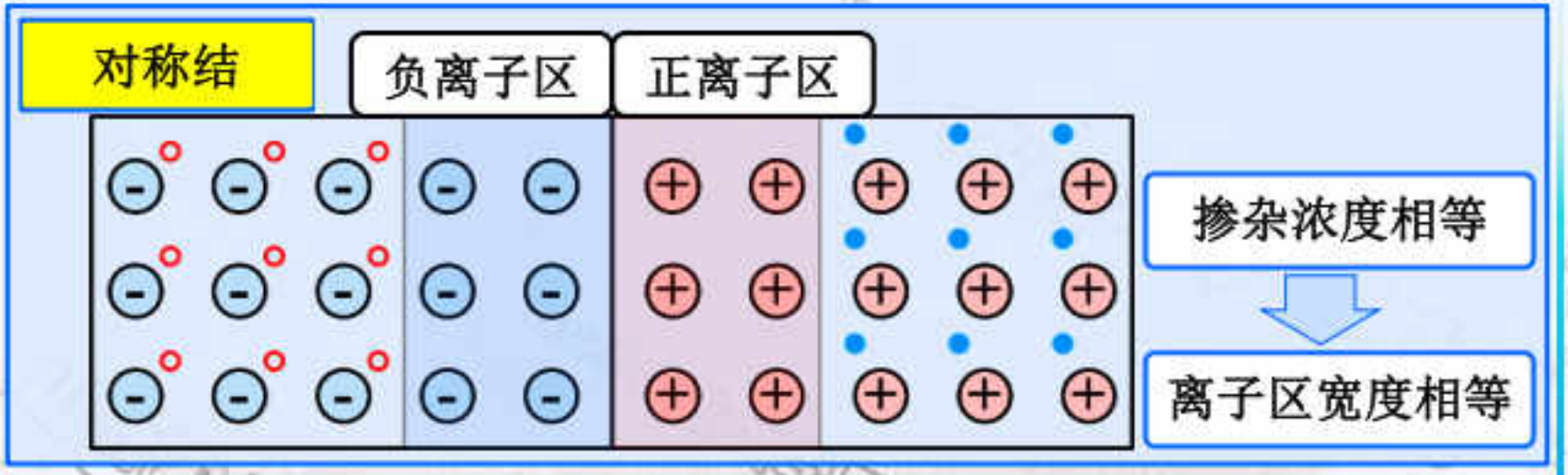
- 4、PN结的特点

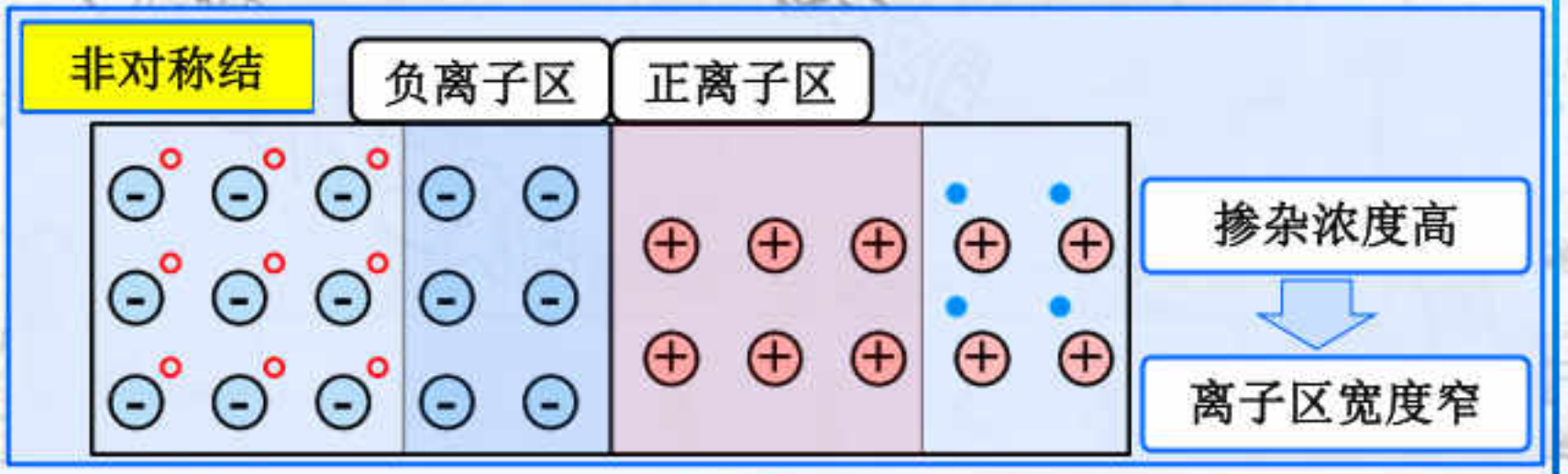



| | |
|---|---|
| PN结特点 | • ①参与扩散运动的多子数目＝参与漂移运动的少子数目<br>• ②正离子区的正电荷电量＝负离子区的负电荷电量<br>• ③由于绝大部分空间电荷区内载流子都非常少，分析时可以忽略载流子的作用，只考虑离子区的电荷，这种方法称为“耗尽层近似”。空间电荷区也称为耗尽层。<br>• ④空间电荷区具有一定宽度，具有一定的耗尽层电势 $U_{ho}$。 |

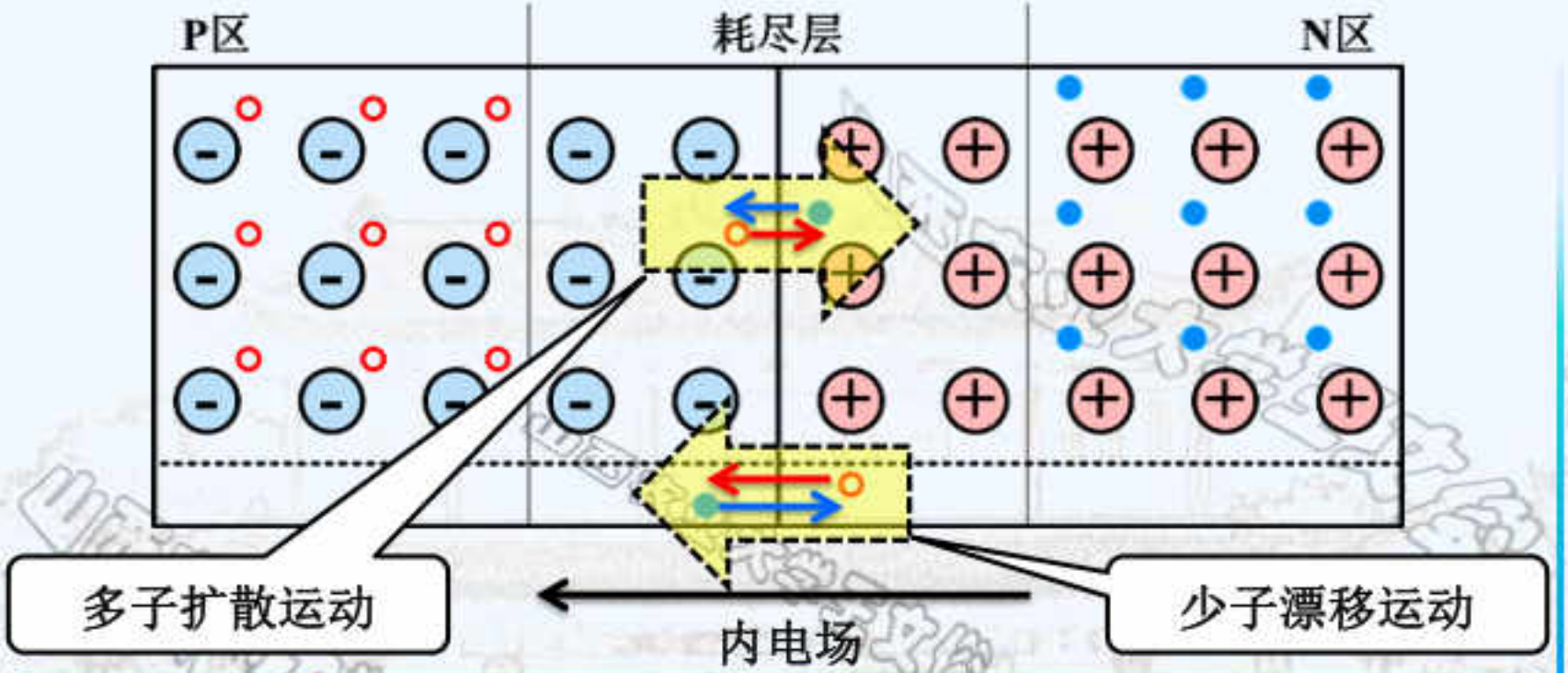
- 5、对称结与非对称结

PN结：正离子区的正电荷电量 = 负离子区的负电荷电量



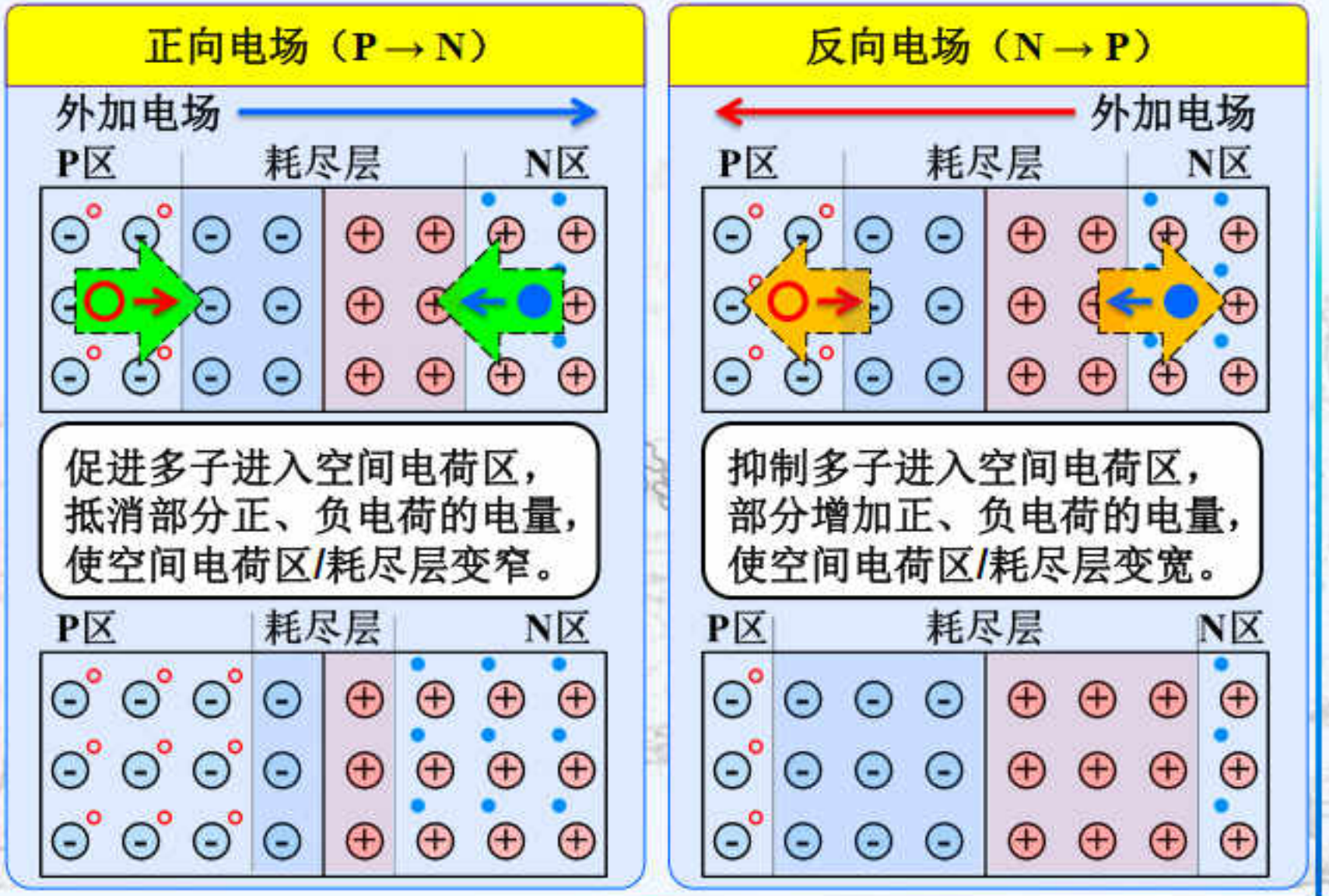



- 6、外加电场对PN结载流子运动的影响

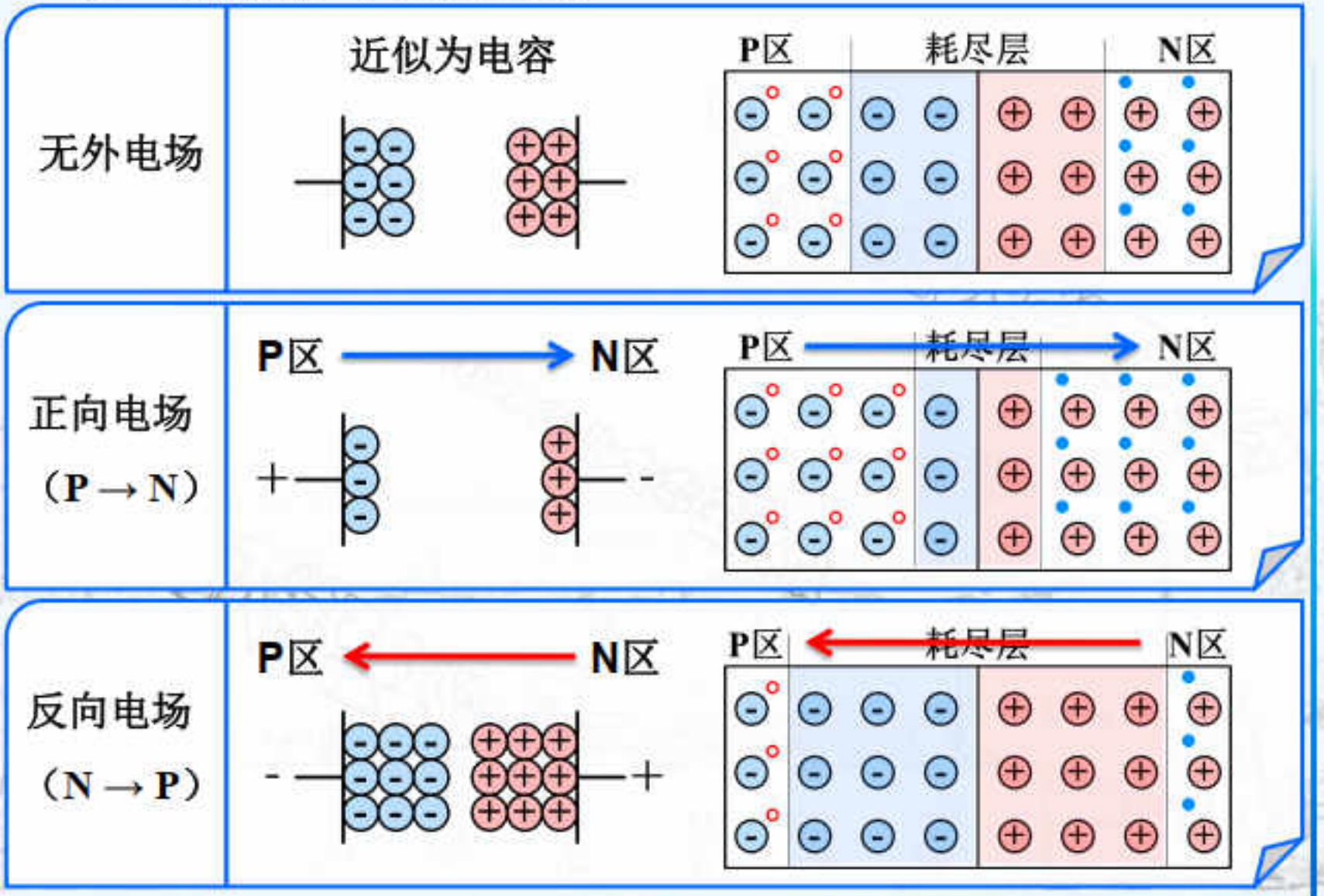



| | |
|---|---|
| 正向电场<br>（P → N） | P区 ⟶ N区<br>• 多子扩散运动增强，少子漂移运动减弱。 |
| 反向电场<br>（N → P） | P区 ⟵ N区<br>• 多子扩散运动减弱，少子漂移运动增强。 |

- 7、外加电场对PN结宽度的影响

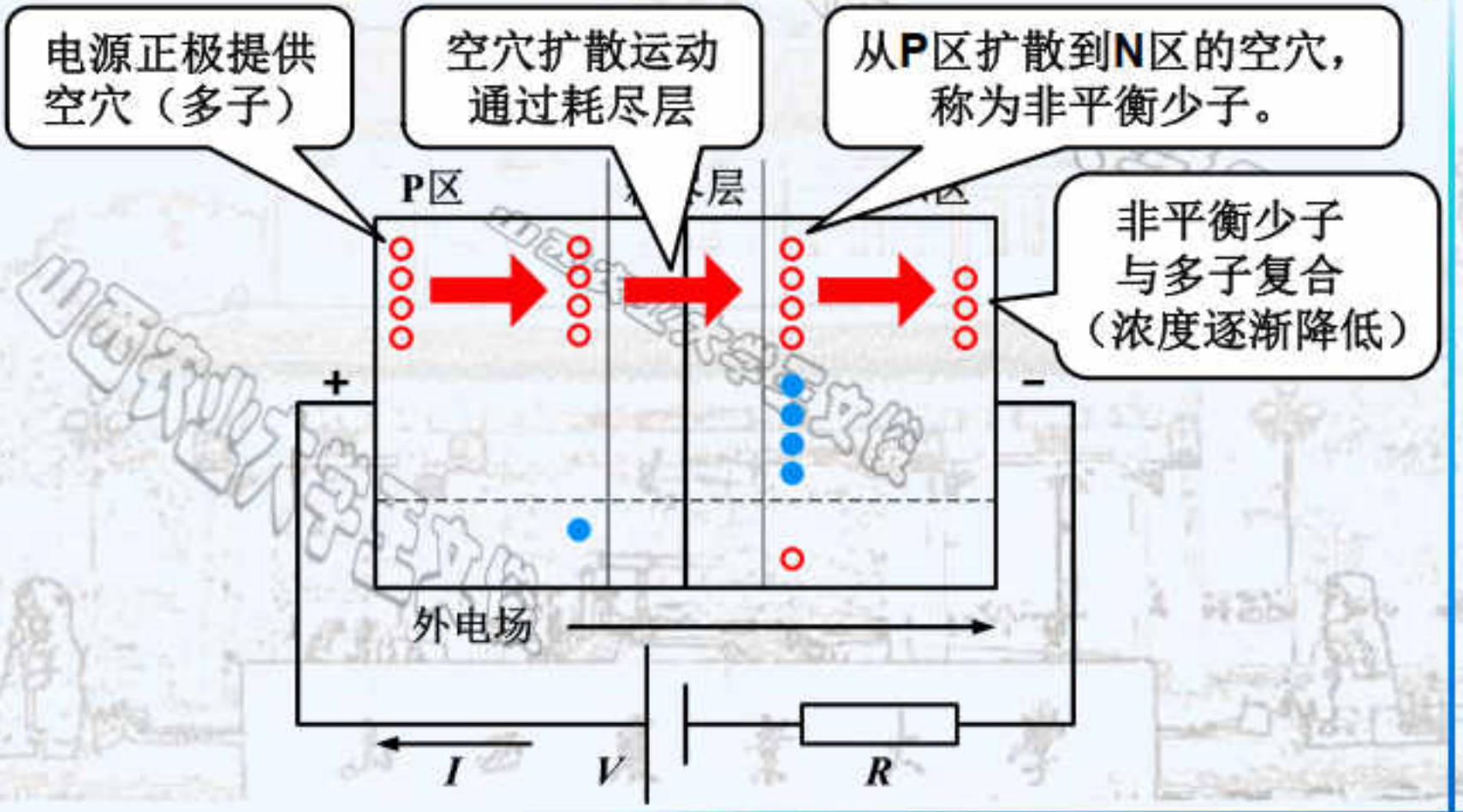


- 另一种解释（电容近似）


无外电场
近似为电容
P区
耗尽层
N区
正向电场
（P → N）
P区
N区
+
-
P区
耗尽层
N区
反向电场
（N → P）
P区
N区
-
+
P区
耗尽层
N区

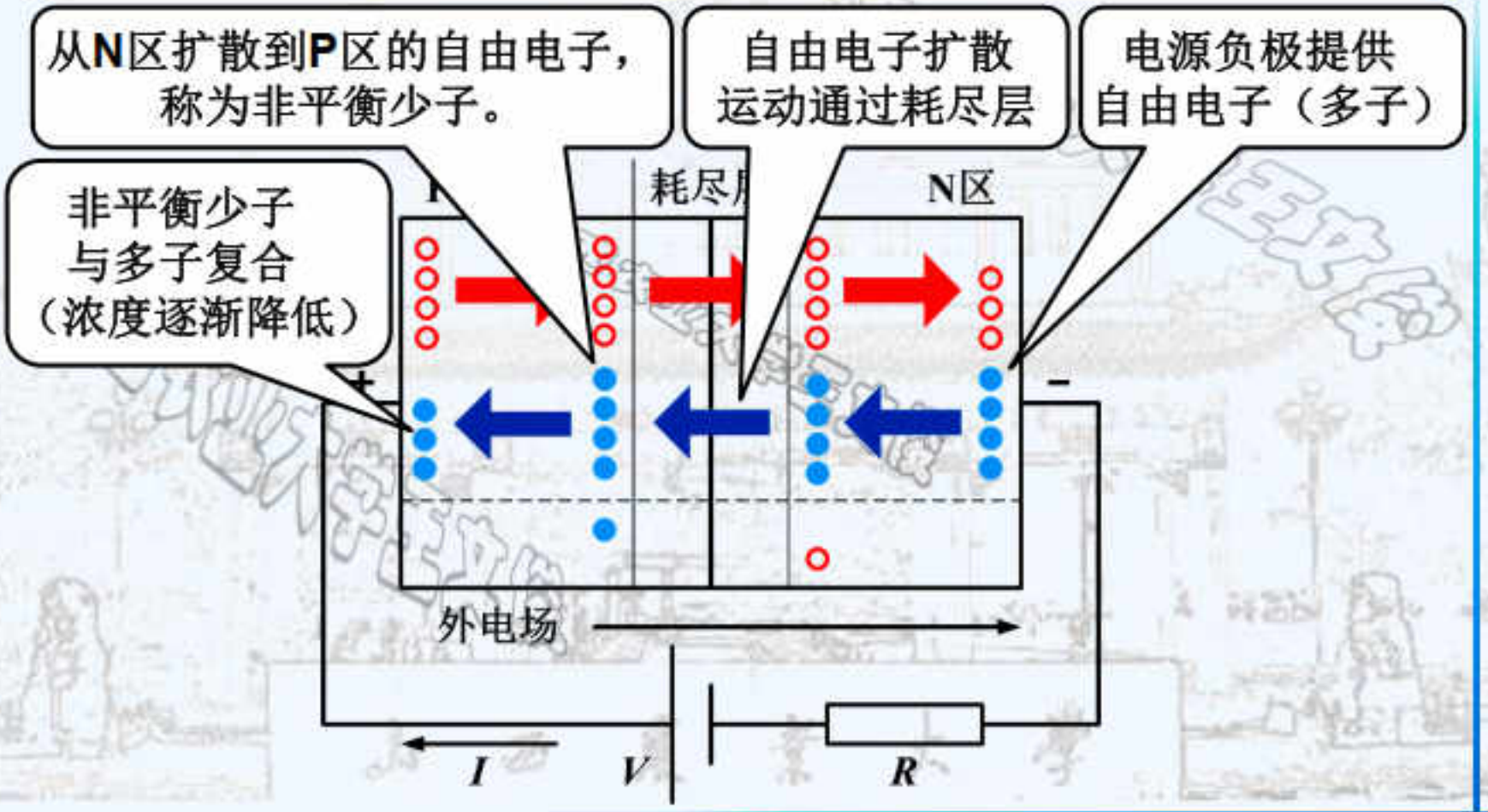
- 8、PN结的正向导通特性

当电源的正极接到PN结的P端，电源的负极接到PN结的N端，称PN结外加正向电压，也称正向接法或正向偏置。



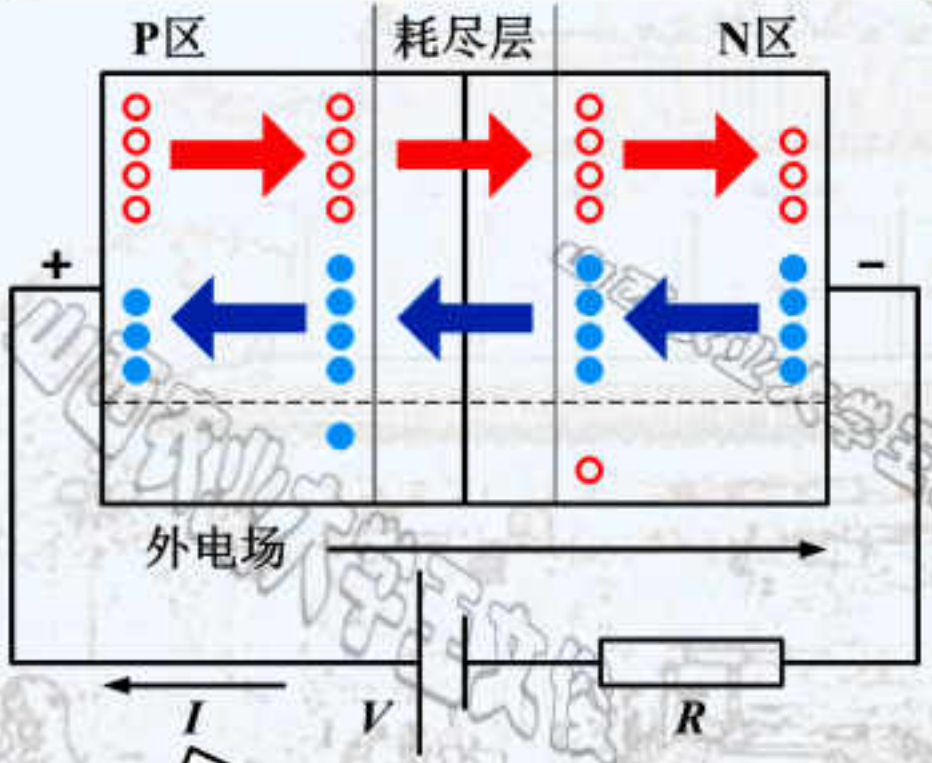
- 8、PN结的正向导通特性

当电源的正极接到PN结的P端，电源的负极接到PN结的N端，称PN结外加正向电压，也称正向接法或正向偏置。



- 8、PN结的正向导通特性

当电源的正极接到PN结的P端，电源的负极接到PN结的N端，称PN结外加正向电压，也称正向接法或正向偏置。




总电流 = 空穴电流 + 自由电子电流

PN结正向偏置

↓

多子扩散电流

↓

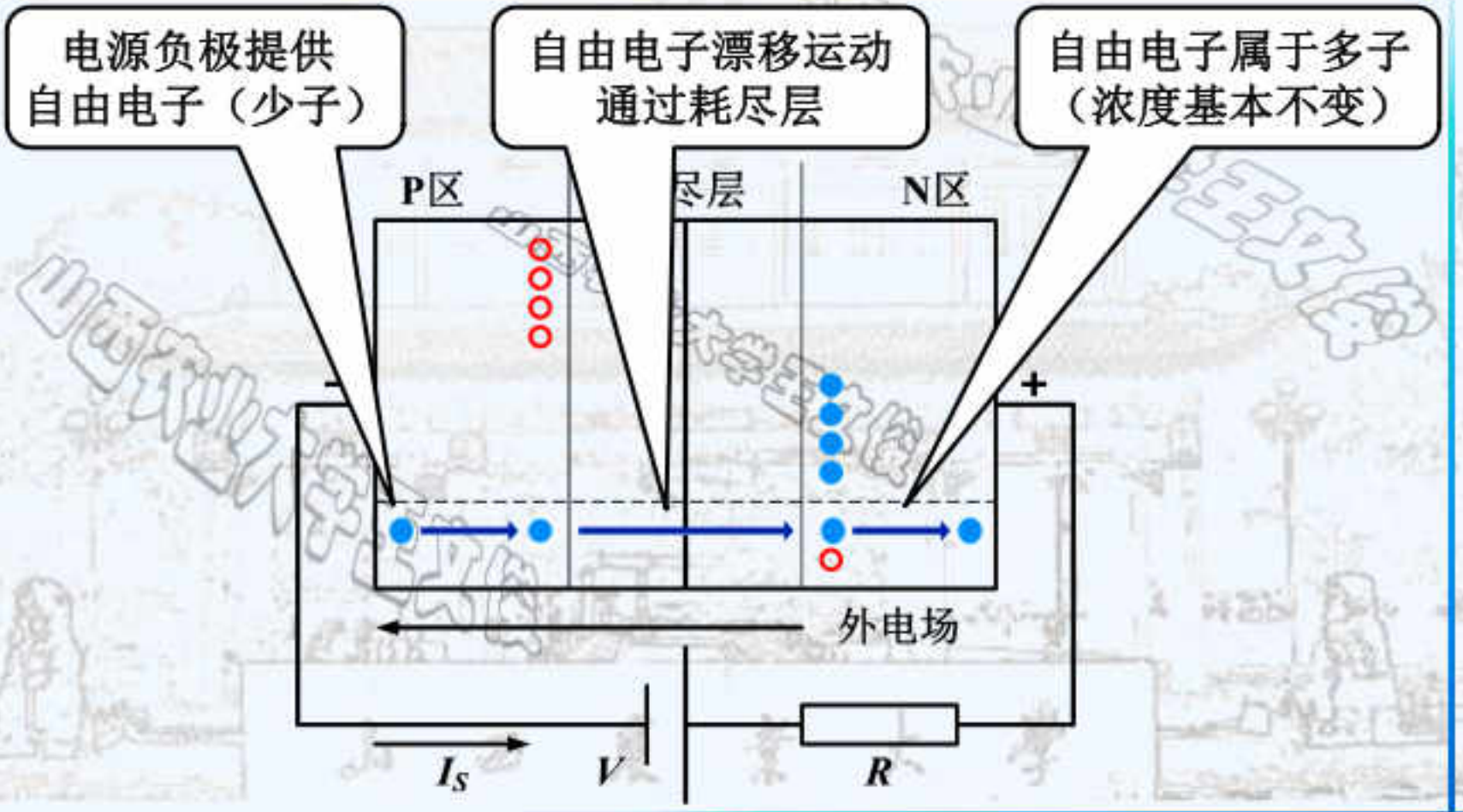
多子数量多，电流大

↓

PN结正向导通

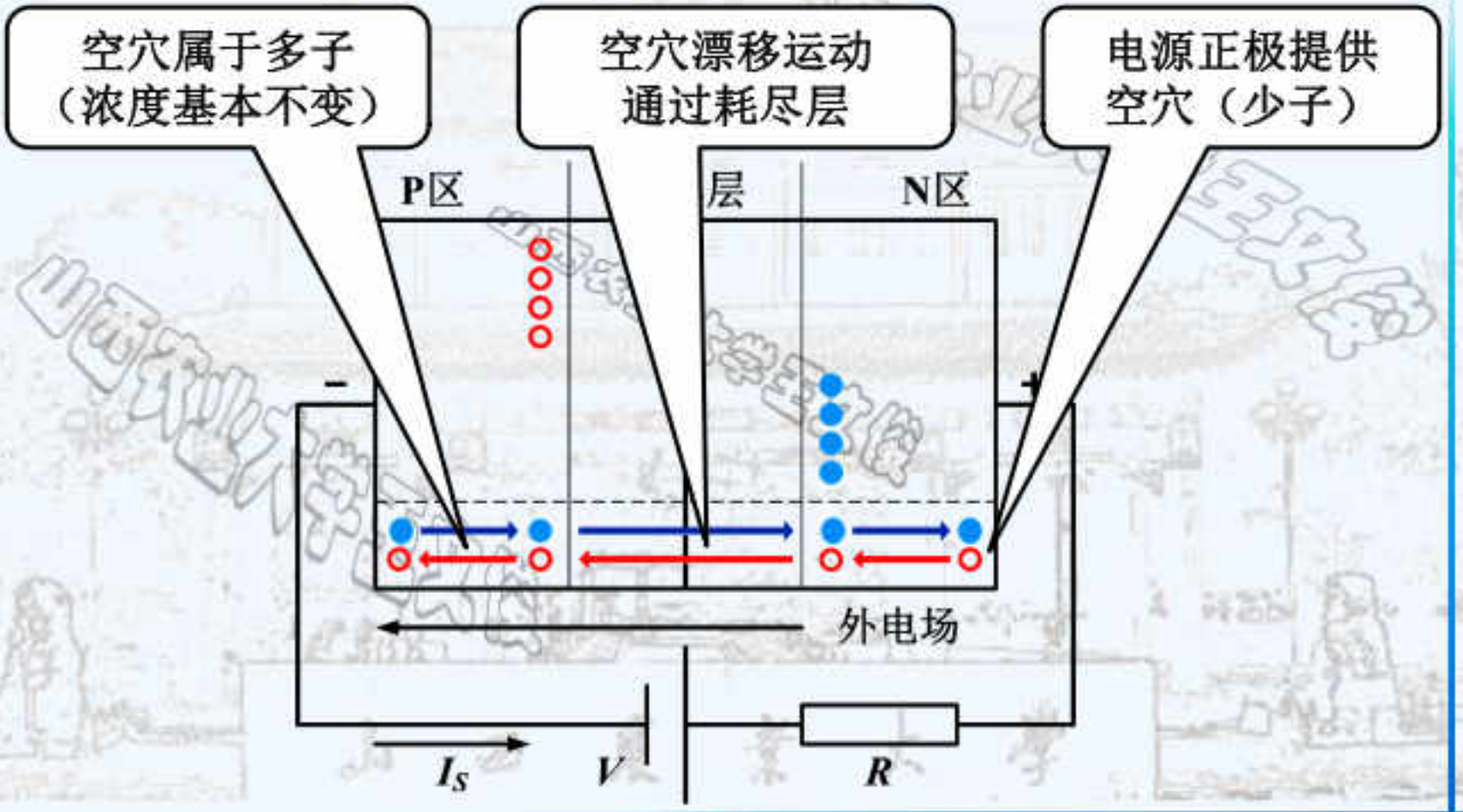
- 9、PN结的反向截止特性

当电源的正极接到PN结的N端，电源的负极接到PN结的P端，称PN结外加反向电压，也称反向接法或反向偏置。



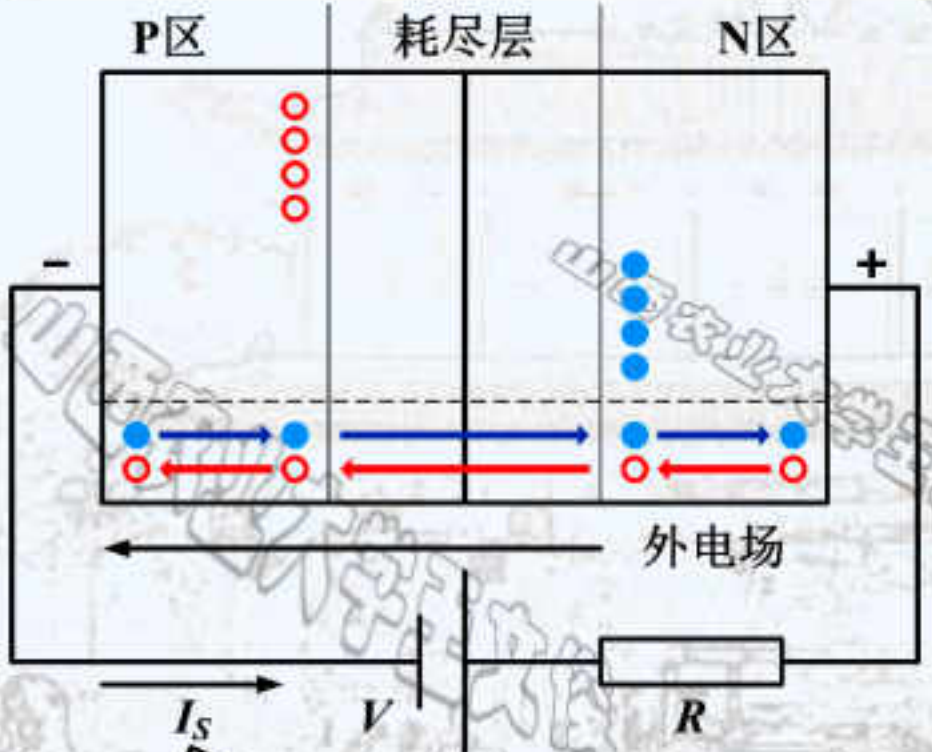
- 9、PN结的反向截止特性

当电源的正极接到PN结的N端，电源的负极接到PN结的P端，称PN结外加反向电压，也称反向接法或反向偏置。



- 9、PN结的反向截止特性

当电源的正极接到PN结的N端，电源的负极接到PN结的P端，称PN结外加反向电压，也称反向接法或反向偏置。




总电流 = 空穴电流 + 自由电子电流

PN结反向偏置

↓

少子漂移电流

↓

少子数量极少，电流极小

↓

PN结反向截止

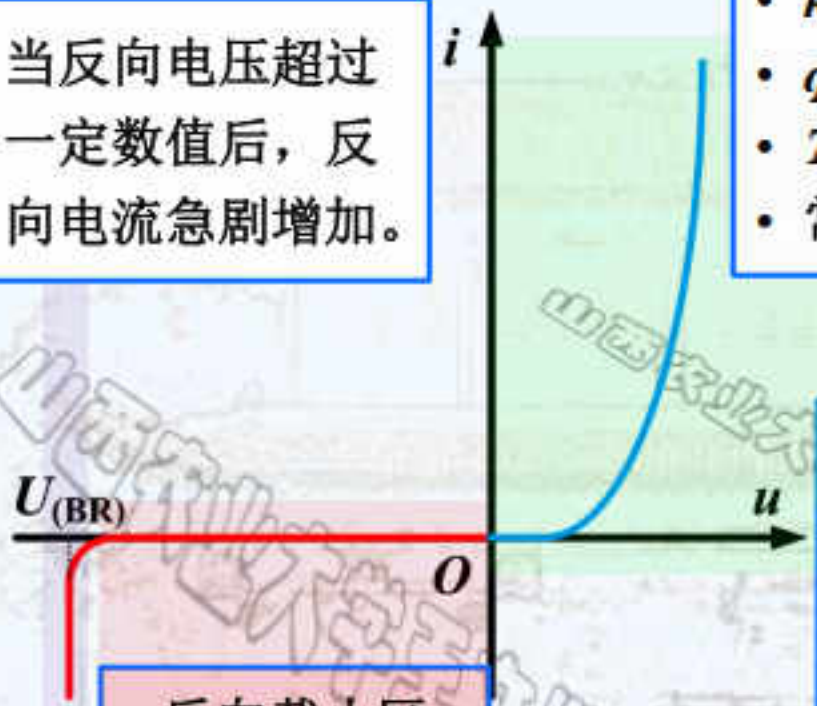
- **10、PN结伏安特性**

| 温度的电压当量 $U_T$ | $U_T = \frac{kT}{q}$ |
|---|---|

- $k$ — 玻尔兹曼常数，$1.38\times10^{-23}$ J/K
- $q$ — 电子的电量，$1.6\times10^{-19}$ C
- $T$ — 热力学温度，K
- 常温下，$T = 300$K，$U_T \approx 26$ mV

**反向击穿区**

当反向电压超过一定数值后，反向电流急剧增加。




**正向导通区**

$$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$

- 当$u >> U_T$时，

$$i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$$

- $i$ 随 $u$ 按指数规律变化。

**反向截止区**

- 当$u << -U_T$时，$i \approx -I_S$
- $I_S$ — 反向饱和电流

## • 11、PN结的反向击穿

按照击穿的机理，反向击穿分可为齐纳击穿和雪崩击穿两种。

### 齐纳击穿

- 高掺杂，耗尽层宽度很窄。
- 较低的反向电压，就能够在耗尽层产生很强的电场。
- 强电场使价电子脱离共价键束缚，产生电子-空穴对，使电流急剧增大。

### 雪崩击穿

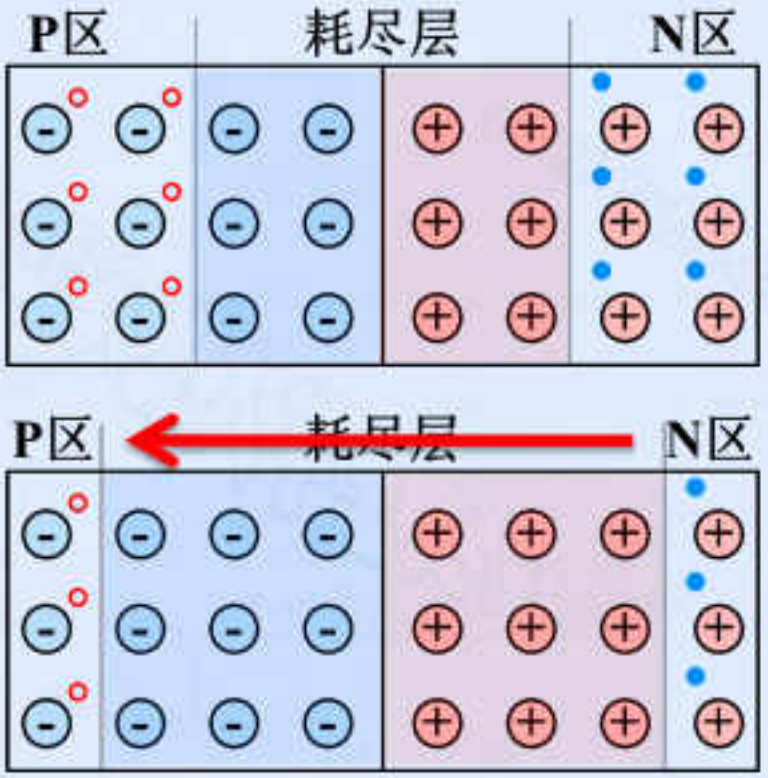
- 低掺杂，耗尽层宽度较宽。
- 较高的反向电压，会使少子获得足够高的能量。
- 高能的少子会将共价键的价电子撞出共价键，形成电子-空穴对。新产生的电子-空穴对在加速后，又能撞出其他价电子，使载流子雪崩式的倍增，电流急剧增大。

# • 12、PN结的电容效应

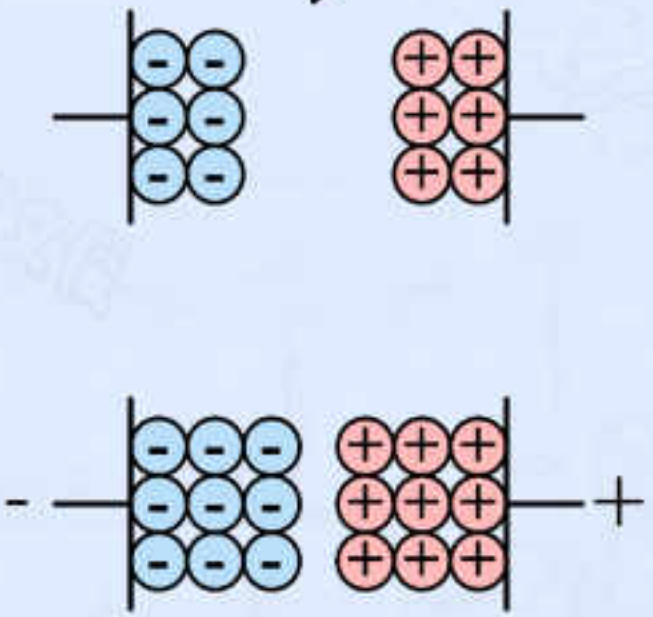
PN结的电容效应，根据产生原因的不同分为势垒电容和扩散电容。

## 势垒电容

• 条件：PN结外加反向电压



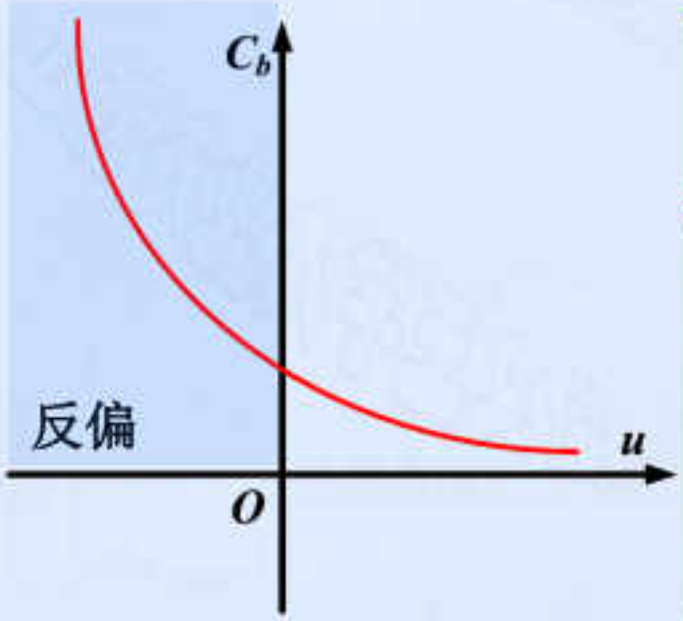

耗尽层等效为电容。



- **12、PN结的电容效应**

**势垒电容**

- 条件：PN结外加反向电压
- 原理：反向电压变化，空间电荷区的宽度随之变化，即耗尽层的电荷量随外加反向电压的变化而变化。该现象与电容的充放电过程相同，等效为势垒电容 $C_b$。




| 电容决定式 | $C=\dfrac{\varepsilon S}{4\pi kd}$ |
|---|---|

该电容具有非线性，它与结面积、耗尽层宽度、半导体的介电常数及外加电压有关。

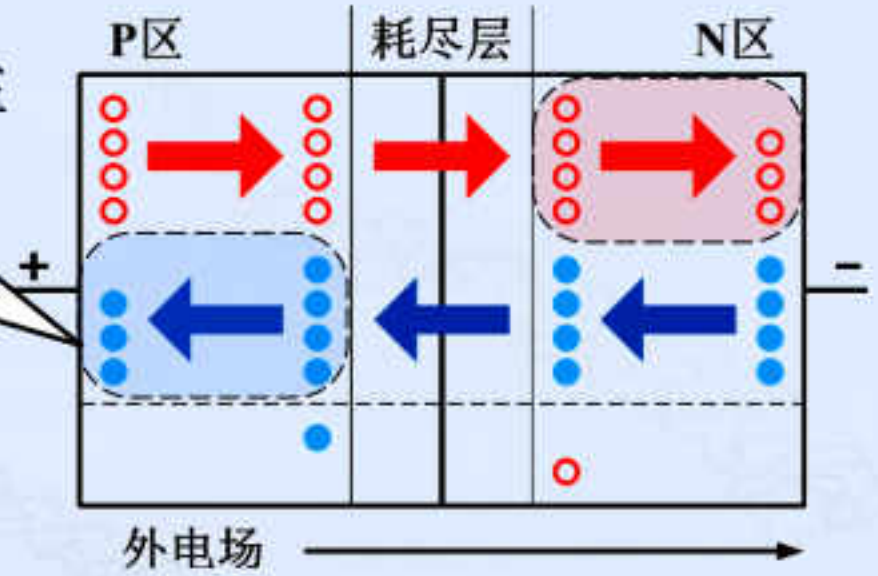
利用势垒电容随电压的变化特性，可以制成各种变容二极管。

- 12、PN结的电容效应

扩散电容

- 条件：PN结外加正向电压

非平衡少子在扩散的过程中，浓度逐渐降低。




正向电压增大

⇩

电流增大

⇩

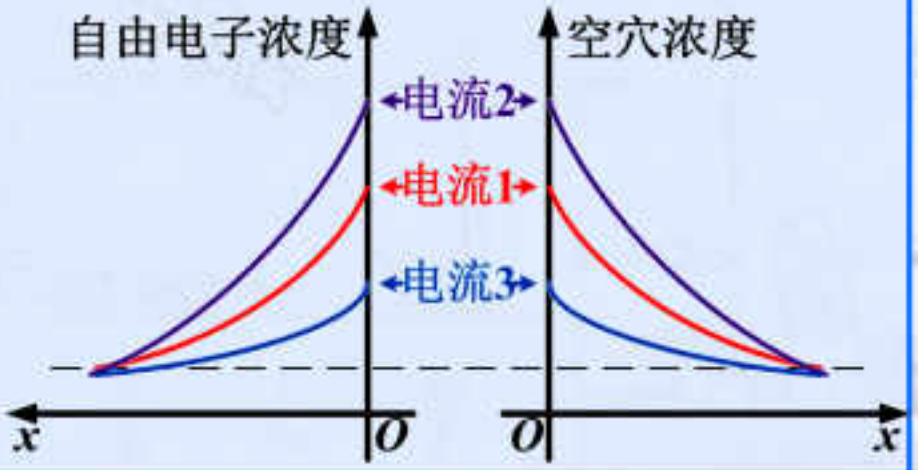
非平衡少子浓度增大

⇩

非平衡少子梯度增大

⇩

扩散区非平衡少子数量增多



- 12、PN结的电容效应

**扩散电容**

- 条件：PN结外加正向电压
- 原理：扩散区内非平衡少子的浓度分布随正向电压的变化而变化。电荷的变化过程与电容的充放电过程相同，等效为扩散电容 $C_d$。

**结电容**

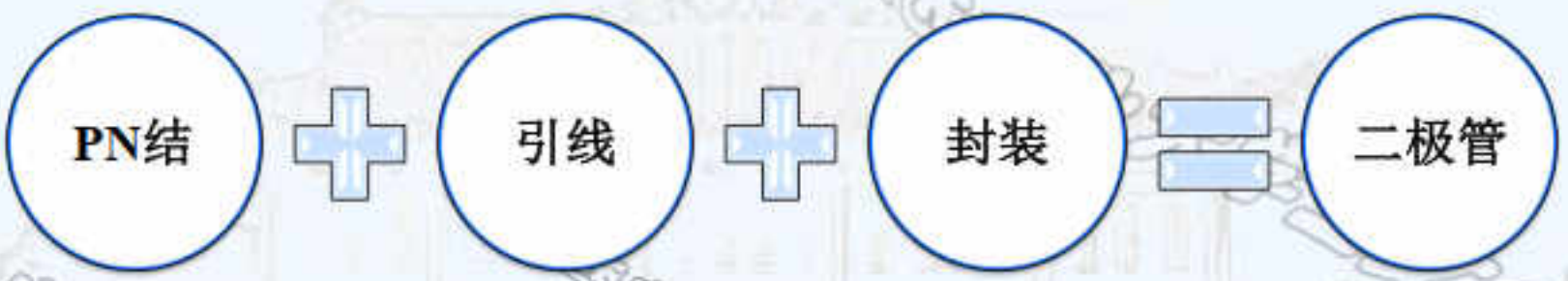
- PN结的结电容 $C_j$ 为势垒电容 $C_b$ 与扩散电容 $C_d$ 之和。

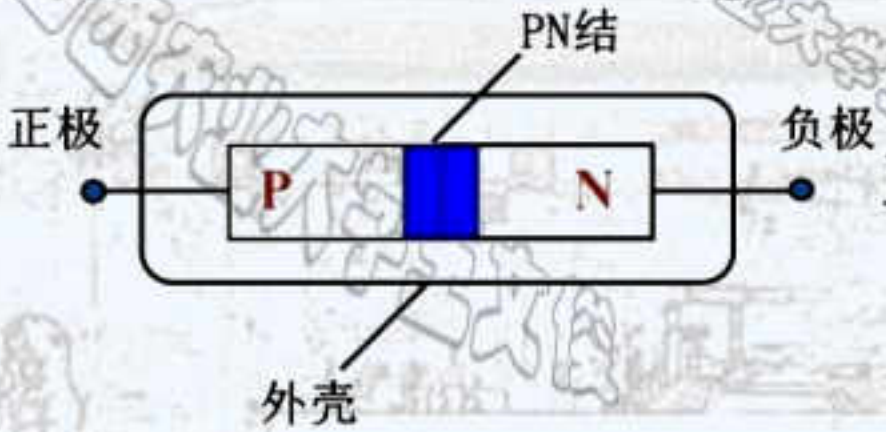
$$C_j = C_b + C_d$$

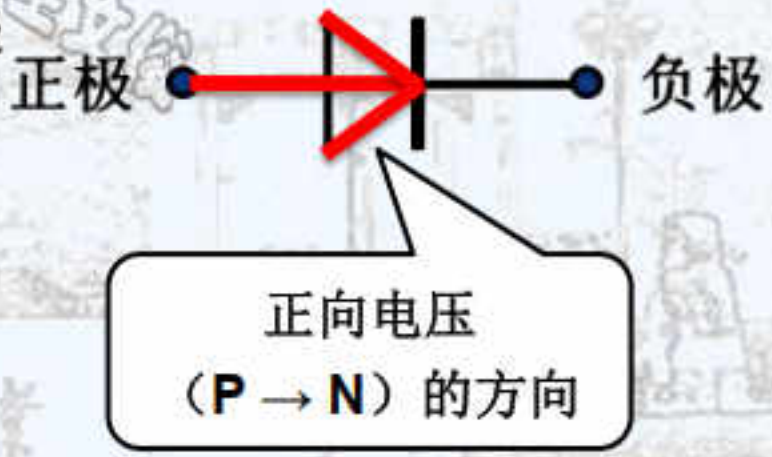
- 结电容一般都很小（结面积小的1pF，大的几十至几百pF）
  - 低频信号，忽略结电容的影响；
  - 高频信号，需要考虑结电容的作用。

# 四、半导体二极管

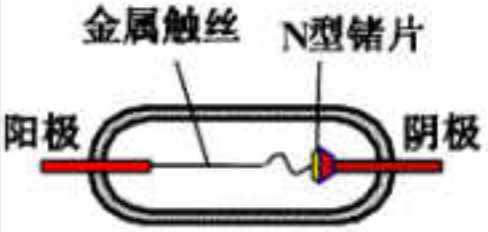
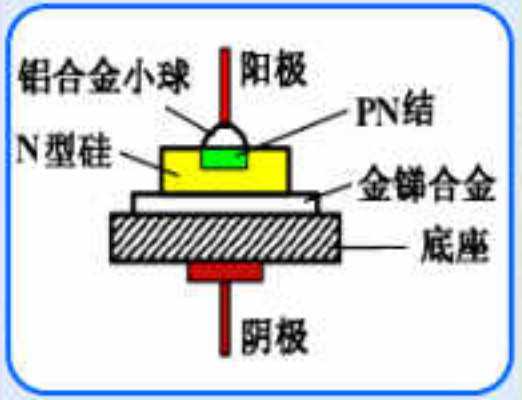
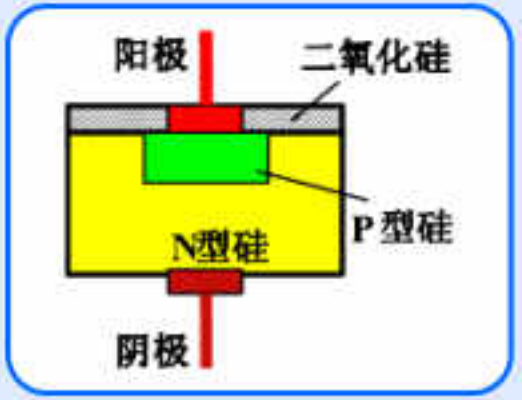
- 1、二极管的构成



- 2、二极管的常见结构

| 点接触型 | 面接触型 | 平面型 |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| 结面积小<br>结电容小 | 结面积大<br>结电容大 | 结面积可大可小<br>结电容可大可小 |
| 允许电流小<br>最高工作频率高 | 允许电流大<br>最高工作频率低 | 结面积小的可做<br>开关管 |
| 高频电路和<br>小功率整流电路 | 低频整流管 | 结面积大的可做<br>大功率整流管 |

## • 3、二极管的伏安特性

与PN结一样，二极管具有单向导电性。

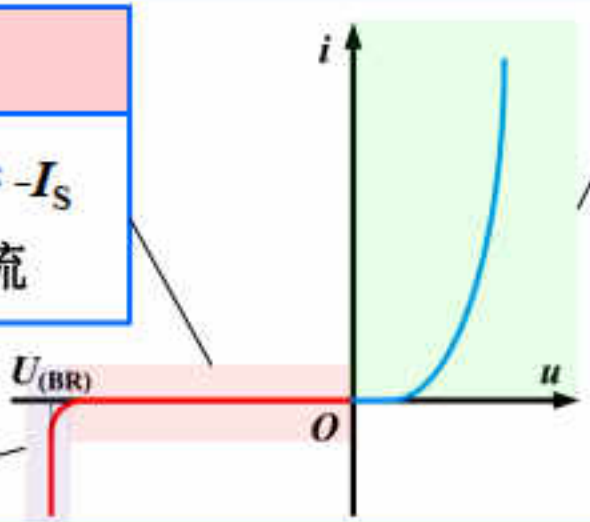
| | |
|---|---|
| 正向电流 | • 二极管半导体体电阻和引线电阻。<br>• 正向电压相同时，二极管正向电流小于PN结正向电流。 |
| 反向电流 | • 二极管表面有漏电流。<br>• 反向电压相同时，二极管反向电流大于PN结反向电流。 |

近似分析时，二极管的伏安特性与PN结的伏安特性相同。

**反向截止区**

- 当$u << -U_T$时，$i \approx -I_S$
- $I_S$ — 反向饱和电流

**反向击穿区**




**正向导通区**

$$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$

- 当$u >> U_T$时，

$$i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$$

## • 4、实测二极管的伏安特性

只有正向电压足够大时，正向电流才会从零随端电压按指数规律增大。

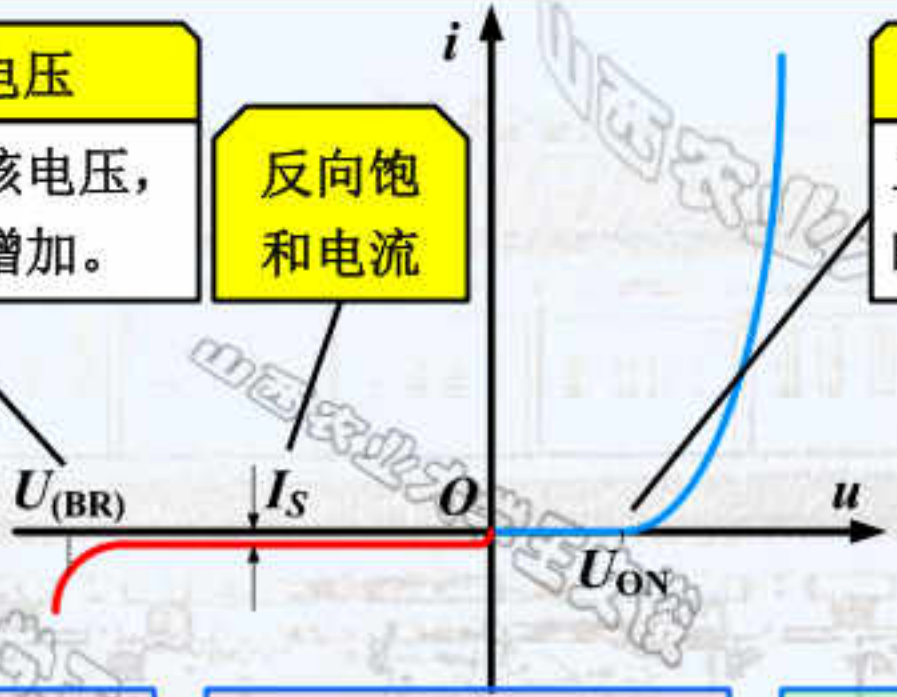
**反向击穿电压**

反向电压超过该电压，反向电流急剧增加。

**反向饱和电流**

**开启电压**

二极管开始导通时的临界电压




| $u<0$ | $0\le u<U_{ON}$ | $u\ge U_{ON}$ |
|---|---|---|
| • 二极管反向截止<br>$i\approx -I_S\ (\approx 0)$ | • 二极管正向截止<br>$i\approx 0$ | • 二极管正向导通<br>$i=I_S(e^{\frac{u}{U_T}}-1)$ |

- 5、开启电压与导通电压

**开启电压**

- 二极管由截止转为导通的结电压，电流从几乎为零开始出现显著增大的结电压。
- 电流非常小，无法满足电路正常工作所需电流。

**导通电压**

- 二极管完全导通时的结电压。
- 电流较大，能满足电路正常工作所需电流。
- 导通电压 > 开启电压，近似计算时两者取值相等。

| 材料 | 开启电压/V | 导通电压/V | 近似取值/V | 反向饱和电流/μA |
|---|---|---|---|---|
| 硅（Si） | ≈ 0.5 | 0.6 ~ 0.7 | 0.7 | < 0.1 |
| 锗（Ge） | ≈ 0.1 | 0.1 ~ 0.3 | 0.2 | 几十 |

## • 6、温度对二极管伏安特性的影响

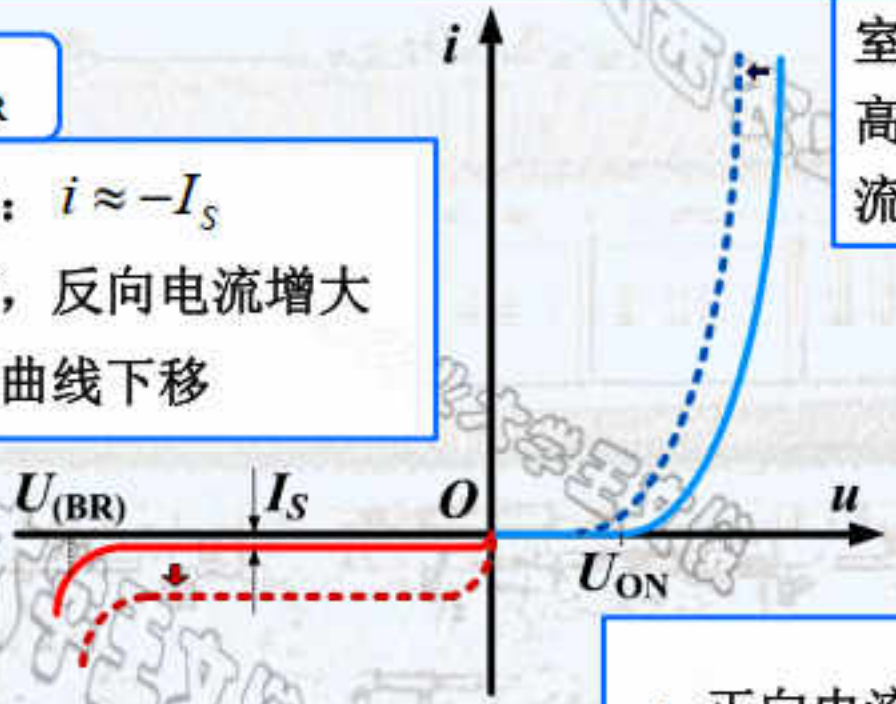
反向饱和电流 $I_S$

温度↑ ⇨ 少子数量↑ ⇨ 反向饱和电流↑

室温附近，温度每升高10℃，反向饱和电流 $I_S$ 约增大一倍。

反向电流 $I_R$

- 反向电流：$i \approx -I_S$
- 温度升高，反向电流增大
- 反向特性曲线下移




正向电流 $i$

- 正向电流：$i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$
- 温度升高，正向电流增大
- 正向特性曲线左移

室温附近，正向电流不变，温度每升高1℃，正向压降减小2~2.5 mV。

- 7、二极管的主要参数

**最大整流电流 $I_F$**

- 二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。
- 若二极管正向电流超过此值，PN结将因温度过高而烧坏。

**最高反向工作电压 $U_R$**

- 二极管工作时允许外加的最大反向电压，一般取反向击穿电压$U_{(BR)}$的一半。
- 若二极管反向电压超过此值，PN结可能反向击穿而损坏。

**反向电流 $I_R$**

- 二极管未击穿时的反向电流，对温度非常敏感。

**最高工作频率 $f_M$**

- 二极管工作的上限截止频率。
- 若信号频率超过此值，由于结电容的作用，二极管将不能很好地体现单向导电性。

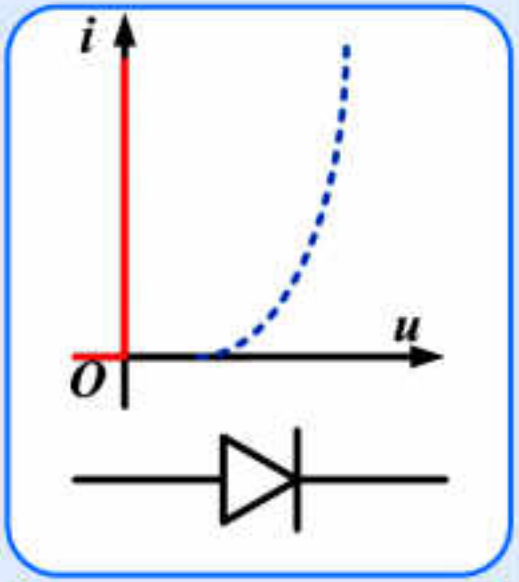
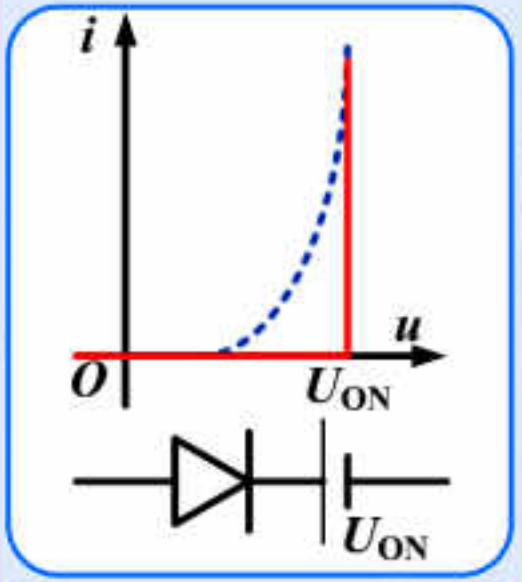
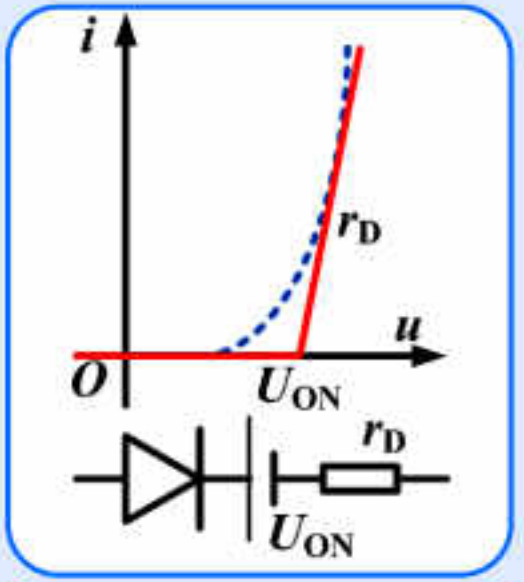
## • 8、二极管的等效电路

| | |
|---|---|
| 问题 | 二极管伏安特性具有非线性，在进行电路分析时较为困难。 |
| 方法 | 用线性元件构成的电路来近似模拟二极管的特性。<br>能够模拟二极管特性的电路称为二极管等效电路/模型。 |
| 结果 | 分析时用二极管等效模型取代二极管，简化了电路分析。 |

二极管等效模型
- 直流等效模型 — 针对直流信号
- 交流等效模型 — 针对交流信号

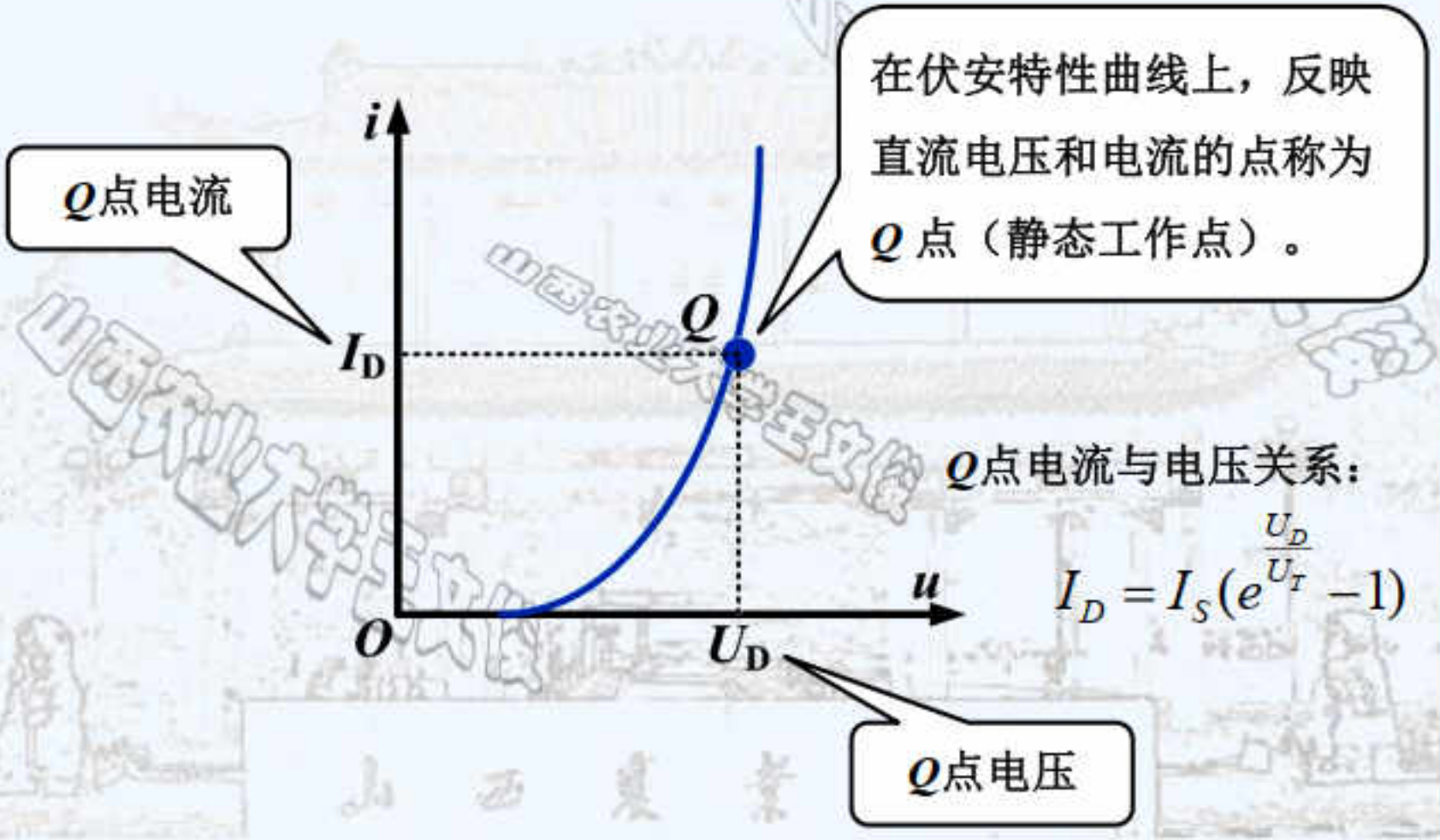
所有的元器件均有直流、交流两类等效模型。

- 9、二极管的直流等效模型

| 理想 | 有压降 | 有压降、有电阻 |
| --- | --- | --- |
|   |   |   |
| $u < 0$，截止 | $u < U_{ON}$，截止 | $u < U_{ON}$，截止 |
| $u \geq 0$，导通 | $u \geq U_{ON}$，导通（导通压降） | $u \geq U_{ON}$，导通（导通压降、电阻） |
| 最理想 | 最常用 | 最符合实际 |

- 9、二极管的直流等效模型

二极管外加直流正向电压时，将有一直流电流与之相对应。

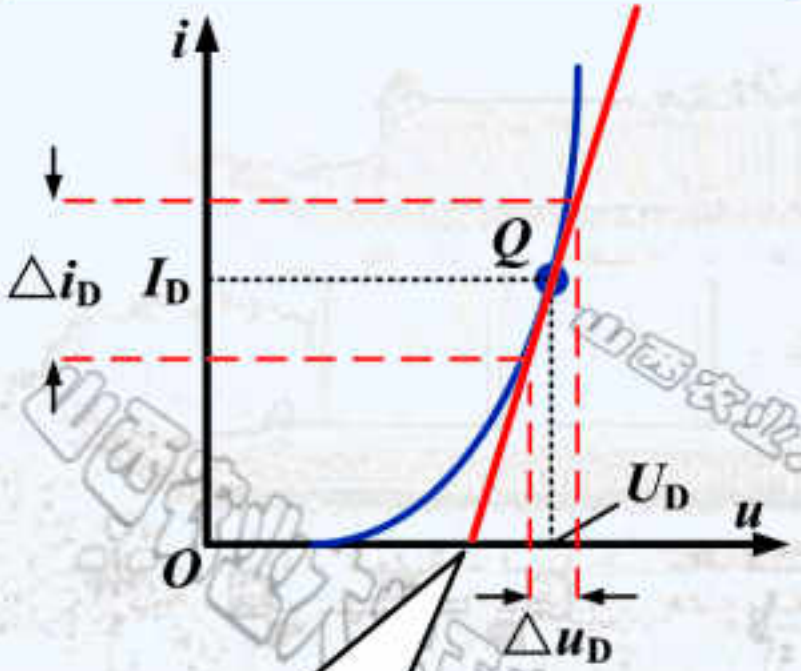



Q点电流与电压关系：

$$I_D = I_S(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$$

- 10、二极管的交流等效模型（微变等效模型）

在Q点基础上外加微小的变化。



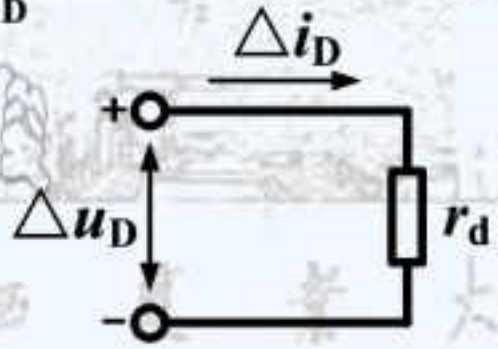

用以Q点为切点的直线来近似微小变化时的曲线

电流： $i = I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$

求导： $di = I_S e^{\frac{u}{U_T}} \frac{1}{U_T} du$

$$\frac{du}{di} = \frac{U_T}{I_S e^{\frac{u}{U_T}}} \approx \frac{U_T}{I_S(e^{\frac{u}{U_T}} - 1)} = \frac{U_T}{i}$$

动态电阻： $r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \frac{du_D}{di_D} = \frac{U_T}{I_D}$




静态工作点 $Q$ 越高

静态电流 $I_D$ 越大

动态电阻 $r_d$ 越小

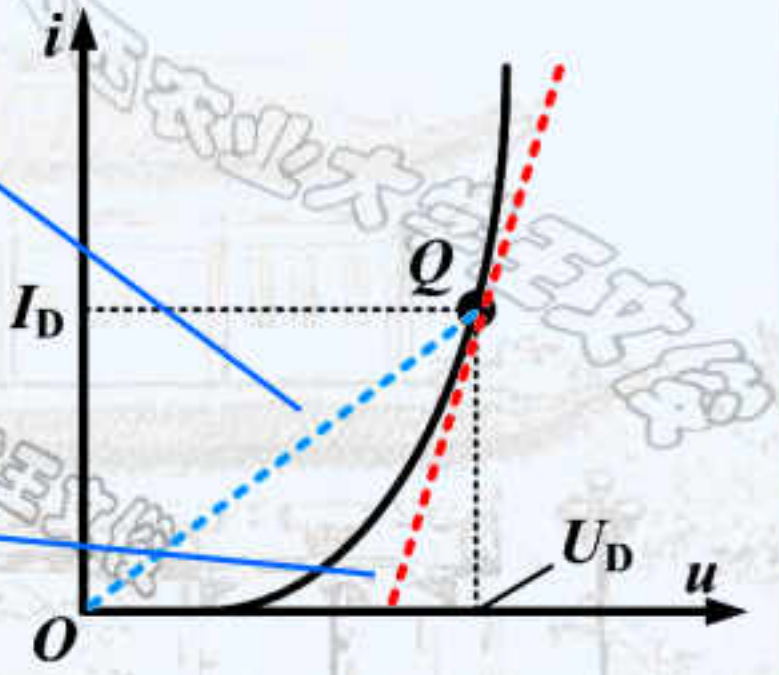
- 例1：已知二极管$U_D = 0.7$ V，$I_D = 2$ mA，$U_T = 26$ mV，试计算二极管的静态电阻$r_D$和动态电阻$r_d$。

**静态电阻**

$$r_D = \frac{U_D}{I_D} = \frac{0.7}{2\times10^{-3}} = 350\Omega$$

**动态电阻**

$$r_d = \frac{U_T}{I_D} = \frac{26\times10^{-3}}{2\times10^{-3}} = 13\Omega$$

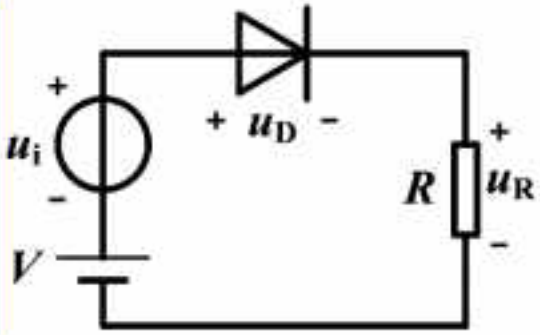



**结论**

- 动态电阻和静态电阻差异极大，是两个完全不同的概念。

- 11、直流等效与交流等效的应用

**直流+交流**

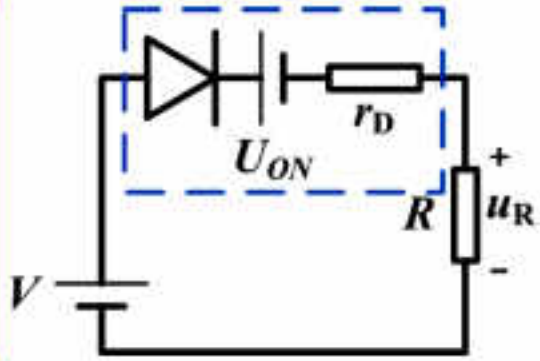



总电流： $i_R = I_R + i_r$

总电压： $u_R = U_R + u_r$

输出同时包含直流分量与交流分量

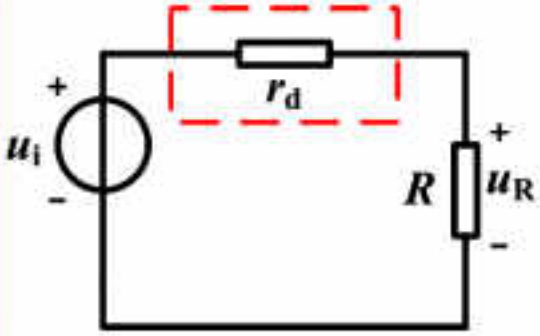
**直流**




直流电流： $I_R = \dfrac{V - U_{ON}}{R + r_D}$

直流电压： $U_R = I_R R = \dfrac{V - U_{ON}}{R + r_D} R$

**交流**

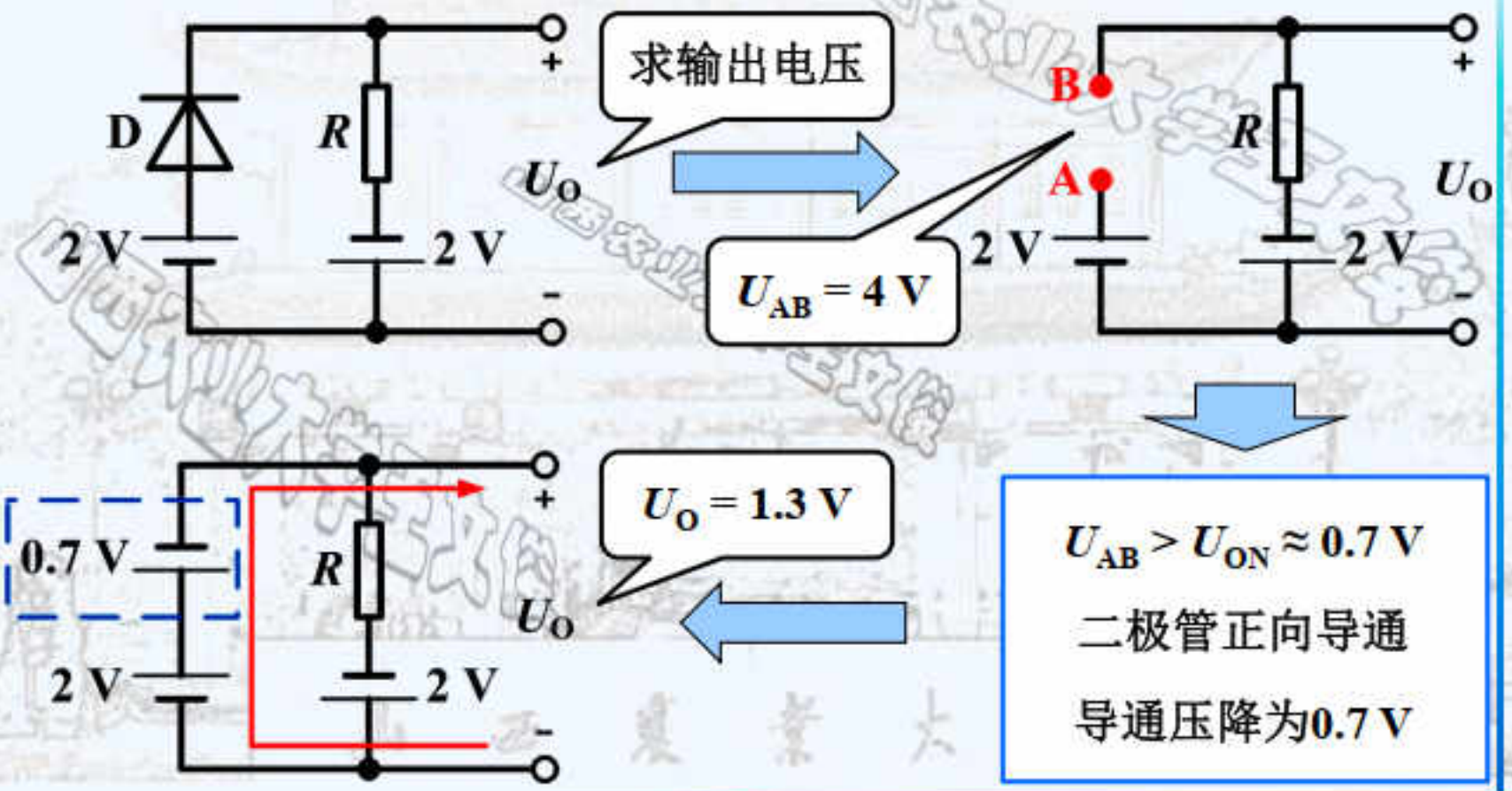



交流电流： $i_r = \dfrac{u_i}{R + r_d}$

交流电压： $u_r = i_r R = \dfrac{u_i}{R + r_d} R$

- 12、二极管工作状态的判断方法

断开二极管 → 二极管两极作为端口 → 计算端口电压 → $U \geq U_{ON}$ 二极管导通 / $U < U_{ON}$ 二极管截止




$U_{AB} > U_{ON} \approx 0.7$ V

二极管正向导通

导通压降为0.7 V

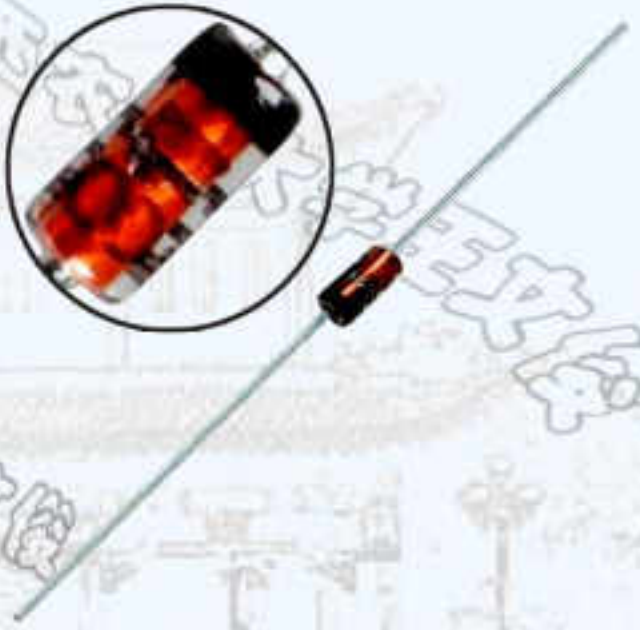
# 五、稳压二极管

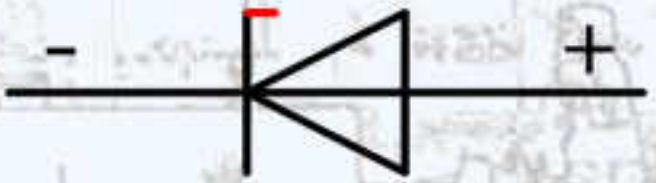
- 1、稳压二极管

稳压二极管是一种硅材料制成的面接触型晶体二极管，简称稳压管。

稳压管反向击穿时，在一定的电流范围内，端电压几乎不变，表现出稳压特性。

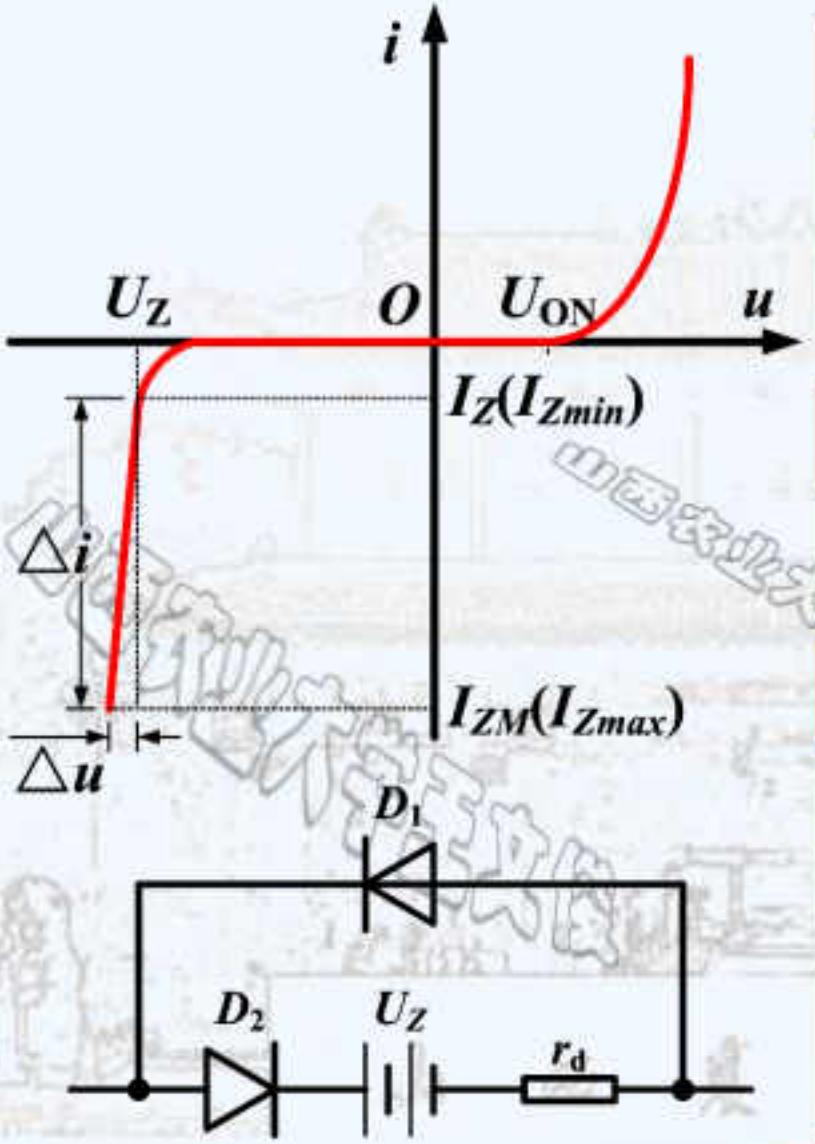
由于具有稳压特性，稳压管在稳压电源、限幅电路中得到广泛应用。






稳压管的符号

- 2、稳压管的伏安特性




**$u \geq 0$（正向导通）**

- 与普通二极管类似
- 正向特性为指数曲线

**$-U_Z < u < 0$（反向截止）**

- 反向截止

**$u \leq -U_Z$（反向击穿，稳压区）**

- 反向击穿区曲线很陡，几乎平行于纵轴，表现出稳压特性。
- 稳压时，反向电流必须满足：

$$I_{Z\min} \leq i \leq I_{Z\max}$$

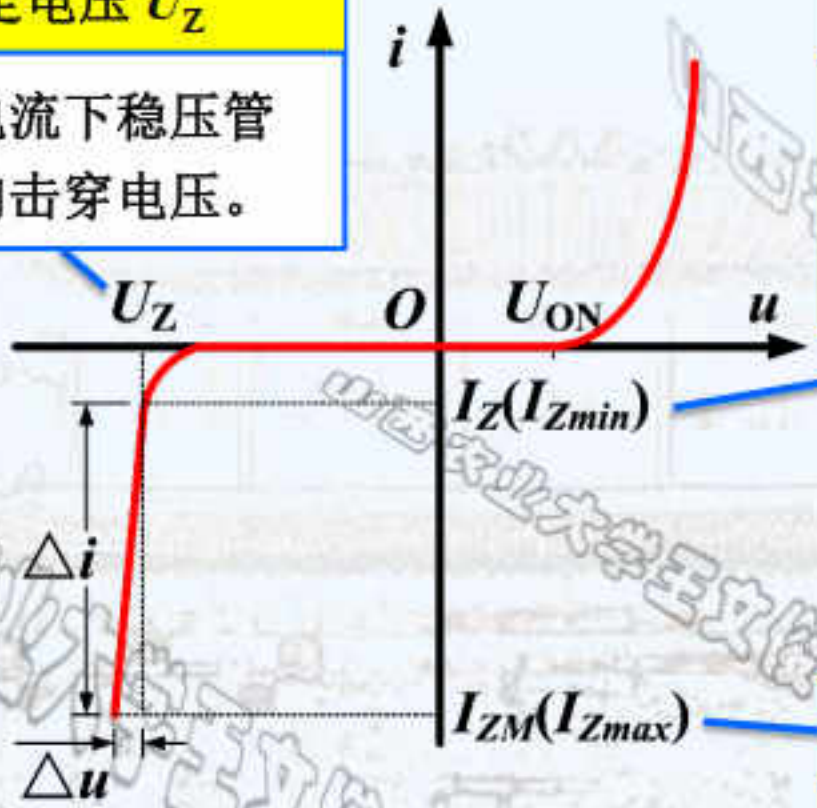
## • 3、稳压管的主要参数

**稳定电压 $U_Z$**

• 规定电流下稳压管的反向击穿电压。

**(最小)稳定电流 $I_Z$**

• 稳压管稳压状态时的参考电流，低于此电流稳压效果差。



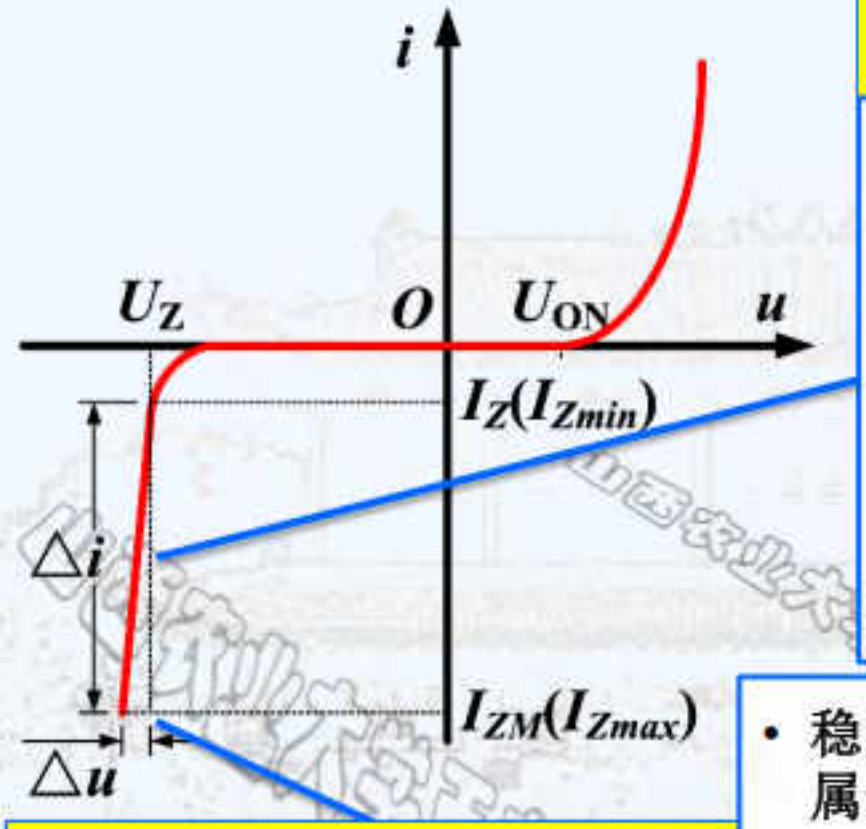

**最大稳定电流 $I_{ZM}$**

• 稳压管稳压状态时允许的最大电流，高于此电流稳压管会损坏。

**额定功耗 $P_{ZM}(=U_Z I_{ZM})$**

• 稳压管稳压状态时的最大功耗。

- 3、稳压管的主要参数




**动态电阻 $r_z$**

- 稳压管工作在稳压区时，端电压变化量与电流变化量之比：

$$r_z \approx \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

- $r_z$ 越小，稳压特性越好。
- 工作电流越大，$r_z$ 越小。

**温度系数 $\alpha$**

- 温度每变化1℃稳压值的变化量。

$$\alpha \approx \frac{\Delta U_Z}{\Delta T}$$

- 稳定电压小于4 V具有负温度系数，属于齐纳击穿（$T\uparrow$，$U_Z\downarrow$）
- 稳定电压大于7 V具有正温度系数，属于雪崩击穿（$T\uparrow$，$U_Z\uparrow$）
- 稳定电压在4～7 V间，温度系数近似为零，齐纳击穿和雪崩击穿均有。

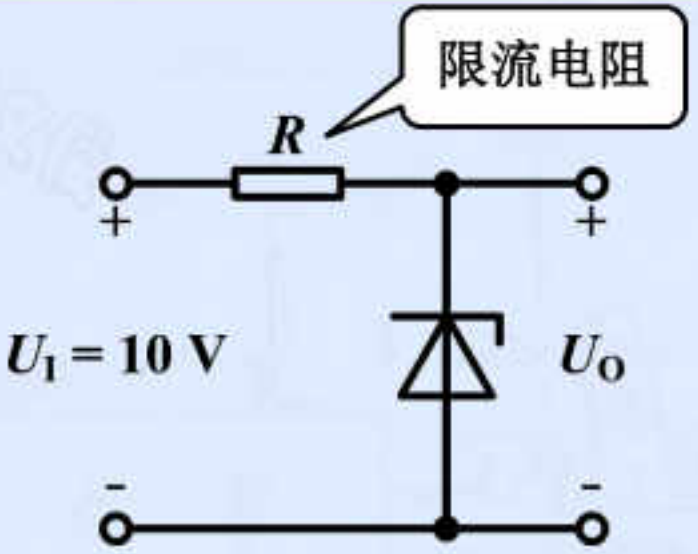
- 4、稳压管的使用

**反向电流**

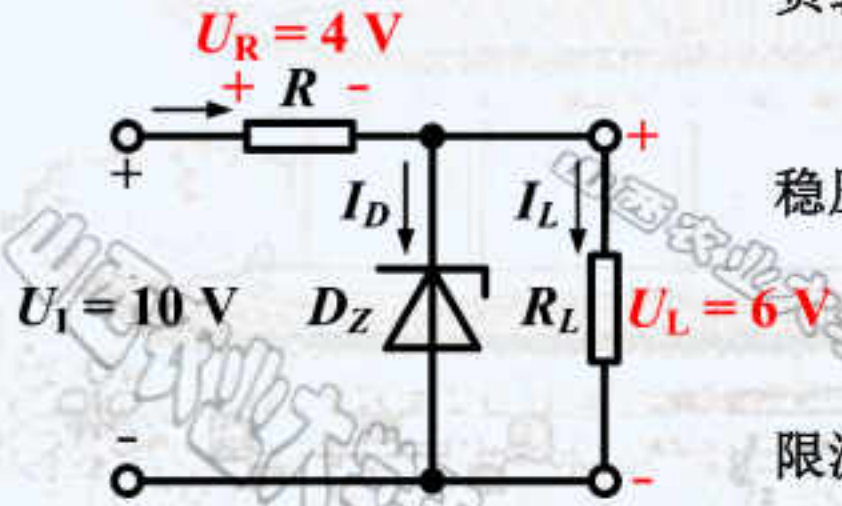
- 稳压管工作在稳压区时，反向电流必须满足：$I_{Z\min} \le i \le I_{Z\max}$
  - 反向电流过小，稳压管不稳压。
  - 反向电流过大，稳压管因温升过高而损坏。

**解决方法**

- 在稳压管电路中串联一个电阻，来限制电流，保证稳压管正常工作。该电阻被称为限流电阻。
- 选取合适的限流电阻，稳压管才能安全的工作在稳压状态。



- 例2：如图所示稳压管稳压电路中，已知稳压管的稳定电压$U_Z = 6$ V，最小稳定电流$I_{Zmin} = 5$ mA，最大稳定电流$I_{Zmax} = 25$ mA，负载电阻$R_L = 600\ \Omega$。求限流电阻$R$的取值范围。




负载电流：$I_L = \dfrac{U_L}{R_L} = \dfrac{6}{600} = 10mA$

稳压管电流：$I_{Z\min} \le I_D \le I_{Z\max}$

$5mA \le I_D \le 25mA$

限流电阻电流：$I_R = I_D + I_L = \dfrac{U_R}{R}$

$15mA \le I_R \le 35mA$

限流电阻阻值：$15mA \le \dfrac{4}{R} \le 35mA$ ⇒ $114\Omega \le R \le 267\Omega$

# 六、其他类型二极管

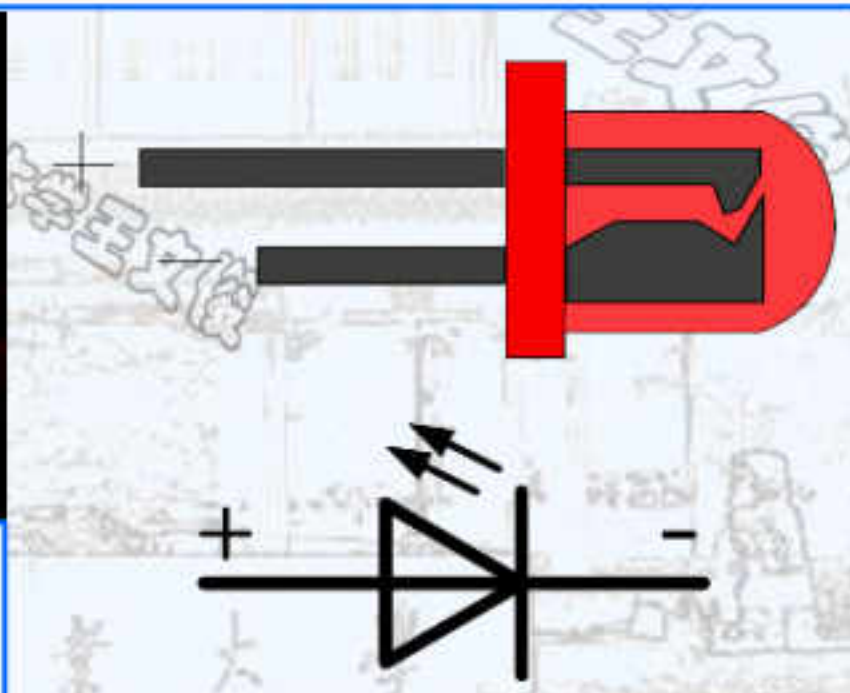
- 1、发光二极管（LED）

利用自由电子与空穴复合时辐射出可见光的特性，制成发光二极管。

发光二极管的发光颜色决定于所用的材料。

红光：砷化镓　　绿光：磷化镓

黄光：碳化硅　　蓝光：氮化镓



- 2、发光二极管与普通二极管

**相同点**

- 都具有单向导电性：正向导通，反向截止。

**不同点**

- 发光二极管的开启电压大于普通二极管。红色的在 1.6～1.8 V之间，绿色的约为 2 V。
- 发光二极管只有正向电流足够大时才发光。正向电流越大，发光越强。

**应用**

- 发光二极管因其驱动电压低、功耗小、寿命长、可靠性高等优点，广泛用于显示电路中。

## • 3、光电二极管

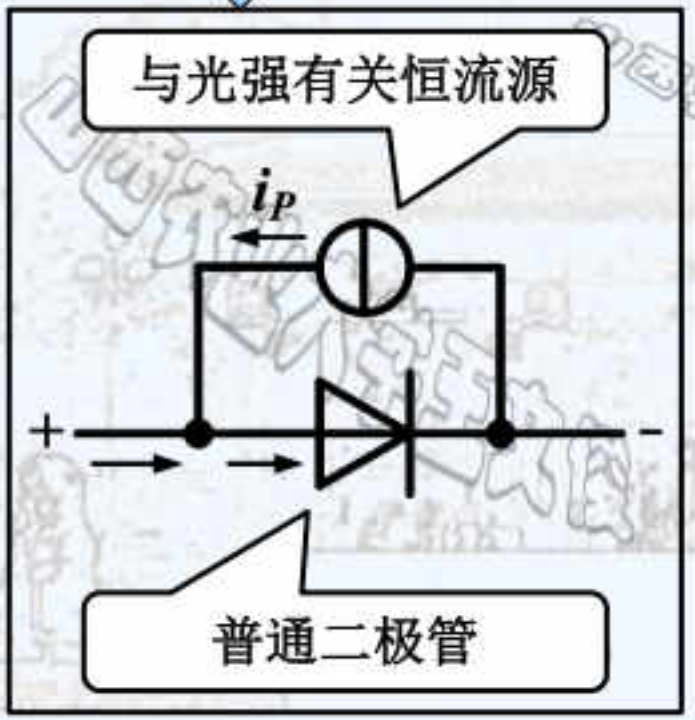
光电二极管是将光信号变成电信号的半导体器件。PN结型光电二极管充分利用PN结的光敏特性，将接收到的光变化转换成电流变化。

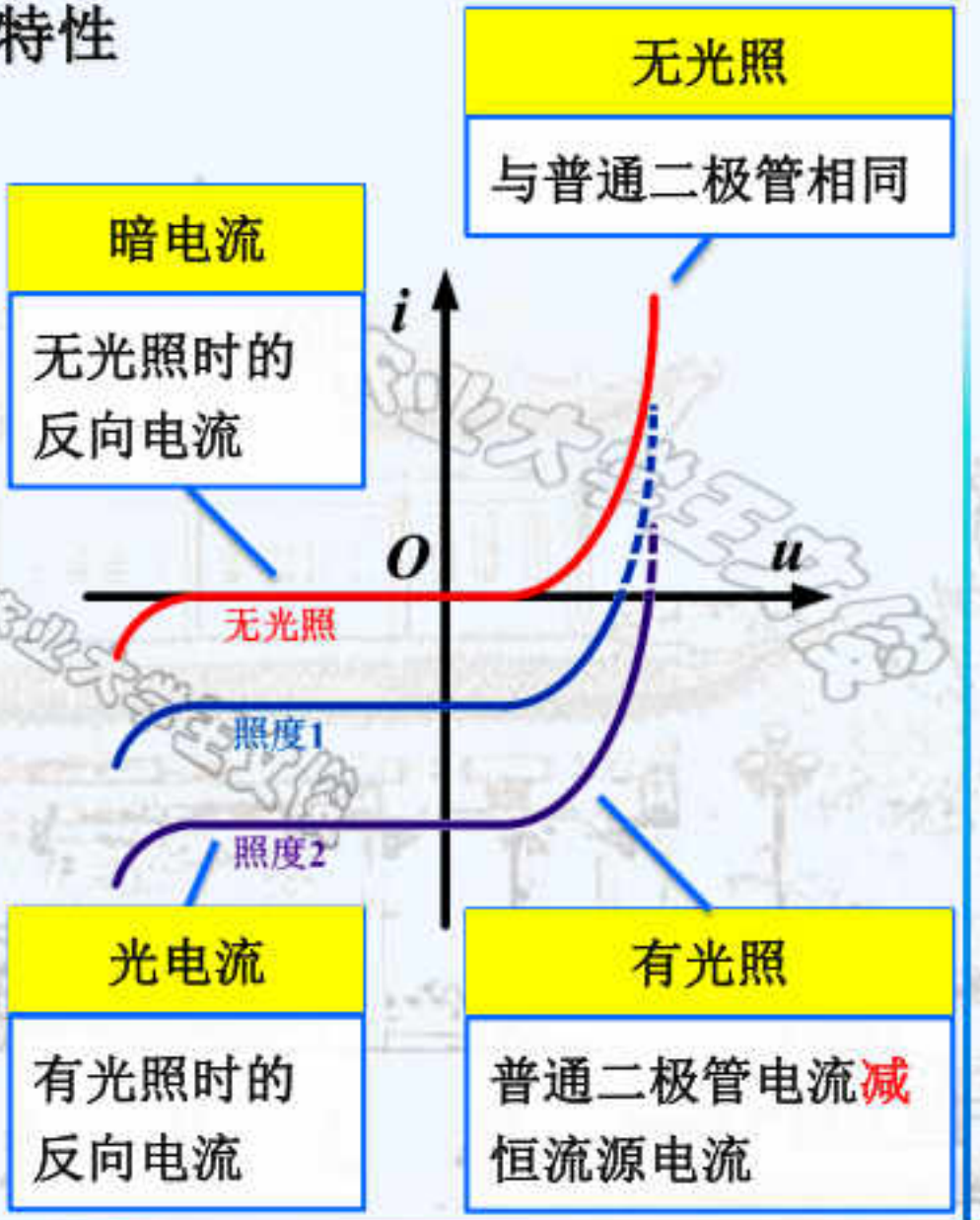
**原理**

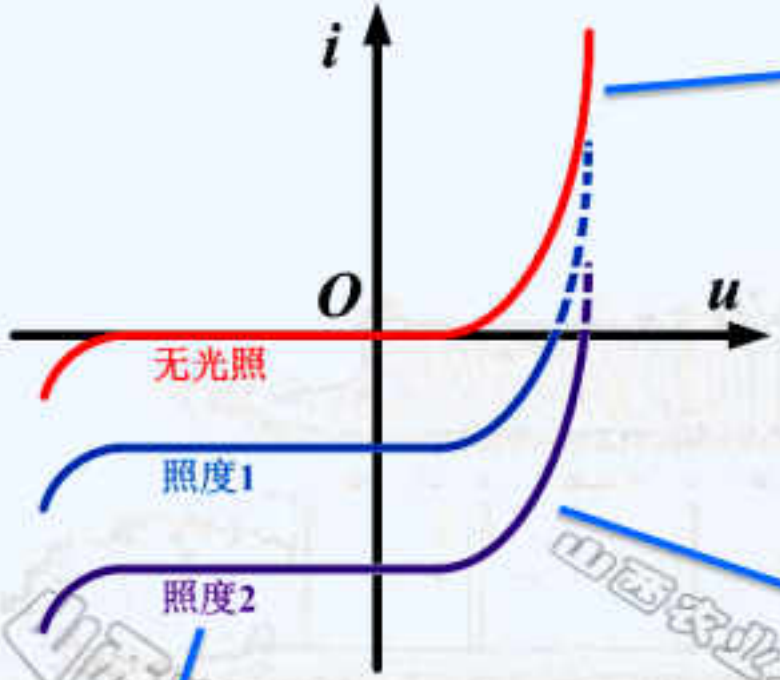
- 有光照时，携带能量的光子进入PN结后，把能量传给共价键上的束缚电子，使部分电子挣脱共价键，从而产生电子-空穴对，称为光生载流子。
- 光照为光生载流子提供能量，产生反向光电流。光照越强，光生载流子越多，反向光电流越大。

- 4、光电二极管的伏安特性

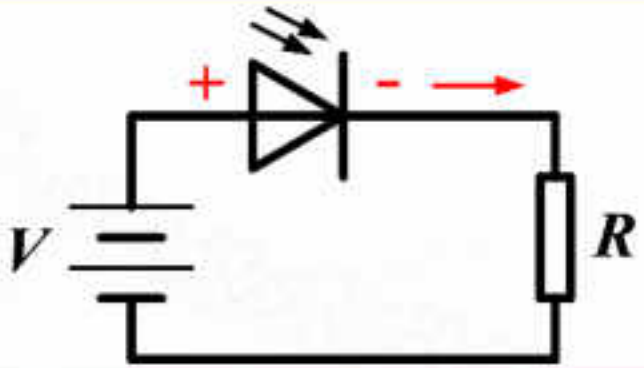
等效模型



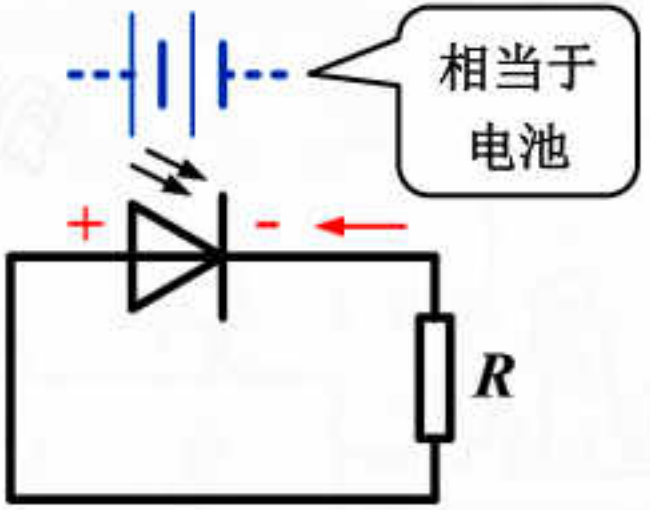



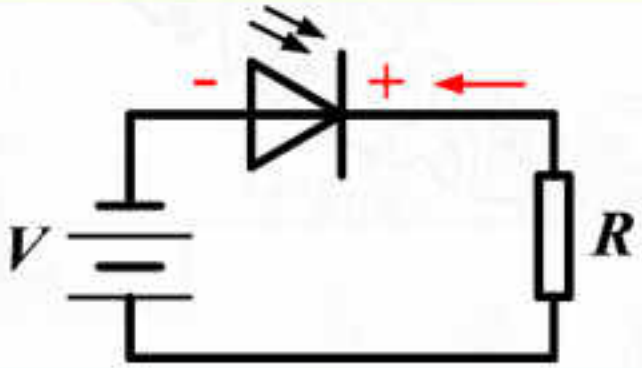



## 第一象限：普通二极管




## 第四象限：光电池




## 第三象限：光电二极管