



5-1 半导体基本理论简述

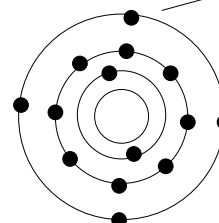
主要内容

1. 半导体基本概念
2. PN结与单向导电性



1. 半导体基本概念

- 根据导电特性，物质分为：导体、绝缘体、半导体
导体：存在着大量自由电子，在外电场作用下容易形成电流
绝缘体：其原子或分子的最外层电子为稳定结构，不易产生自由电子
半导体：导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。自然状态下具有绝缘体特性，而当满足一定外界条件时具有导电能力的材料。
- 元素周期表中由ⅢA族、ⅣA族、ⅤA族、ⅥA族和ⅦA族组成的物质，都可以成为半导体。原子结构如图：



5 B 硼	6 C 碳	7 N 氮	8 O 氧	9 F 氟	10 Ne 氖
13 Al 铝	14 Si 硅	15 P 磷	16 S 硫	17 Cl 氯	18 Ar 氩
31 Ga 镓	32 Ge 锗	33 As 砷	34 Se 硒	35 Br 溴	36 Kr 氪
49 In 铟	50 Sn 锡	51 Sb 锑	52 Te 碲	53 I 碘	54 Xe 氙
81 Tl 铊	82 Pb 铅	83 Bi 铋	84 Po 钋	85 At 砹	86 Rn 氡

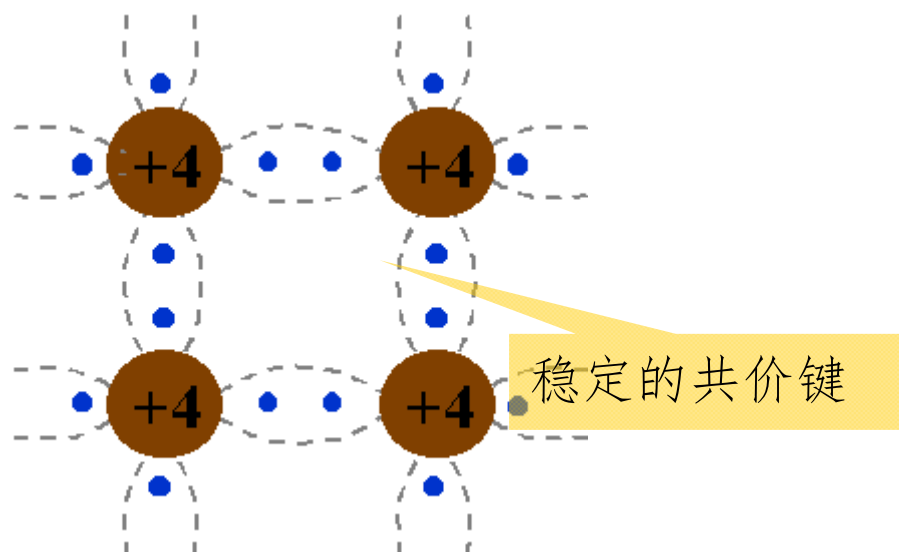
硅原子

四族元素锗和锡的原子结构模型



1. 半导体基本概念

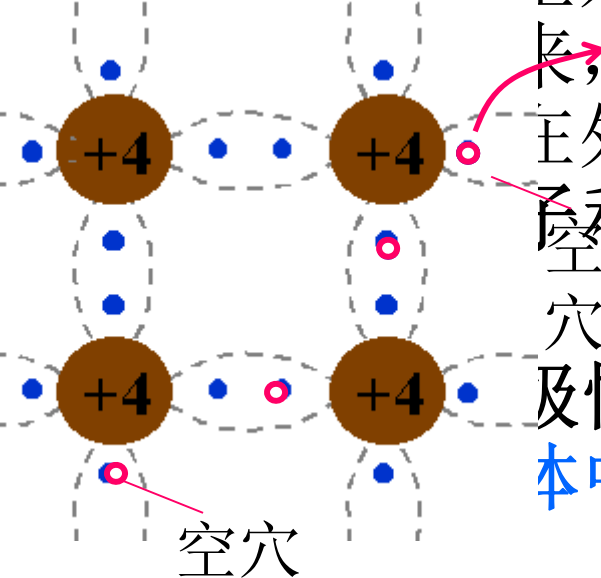
- 本征半导体（Intrinsic crystal）：纯净、结构完整、热力学温度 $T=0\text{ K}$ 时没有自由电子的半导体。
- 晶格：晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵，称为晶格。
以共用电子的形式，形成共价键结构。





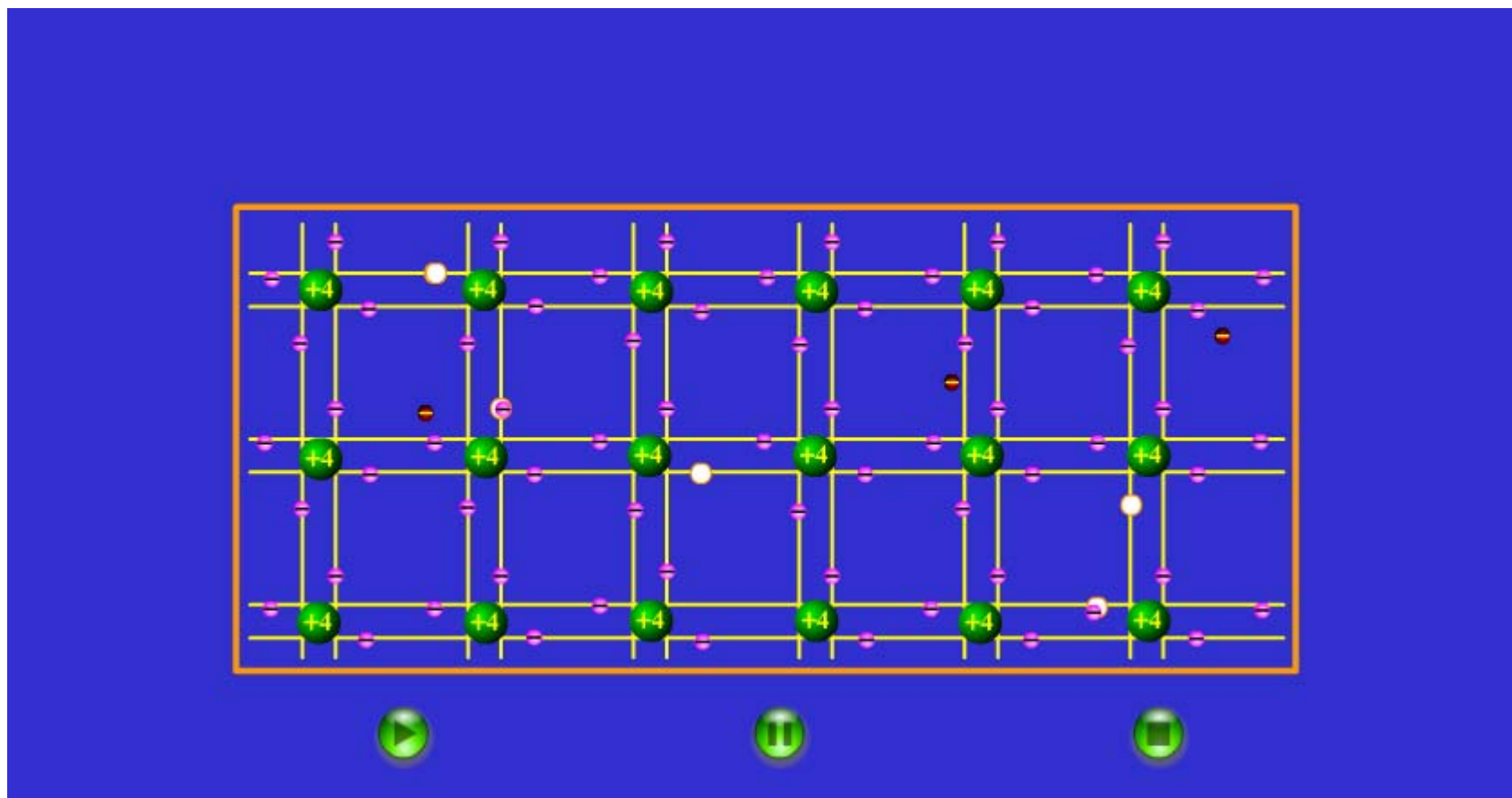
1. 半导体基本概念

- **本征激发**：在常温下受热引起电子激发的现象。
- **载流子**：本征激发产生自由电子，共价结构中留下了一个空位，称为**空穴**：空穴的出现，其他共价键上的电子有可能来填补，其他地方的电子在外电场作用下形成电子流和空穴都参与导电，二者统称为载流子。
- 自由电子和空穴的运动方向相反，所以它们本中的电流等于两个电流之和。



空穴可在共价键内移动

空穴和电子产生过程

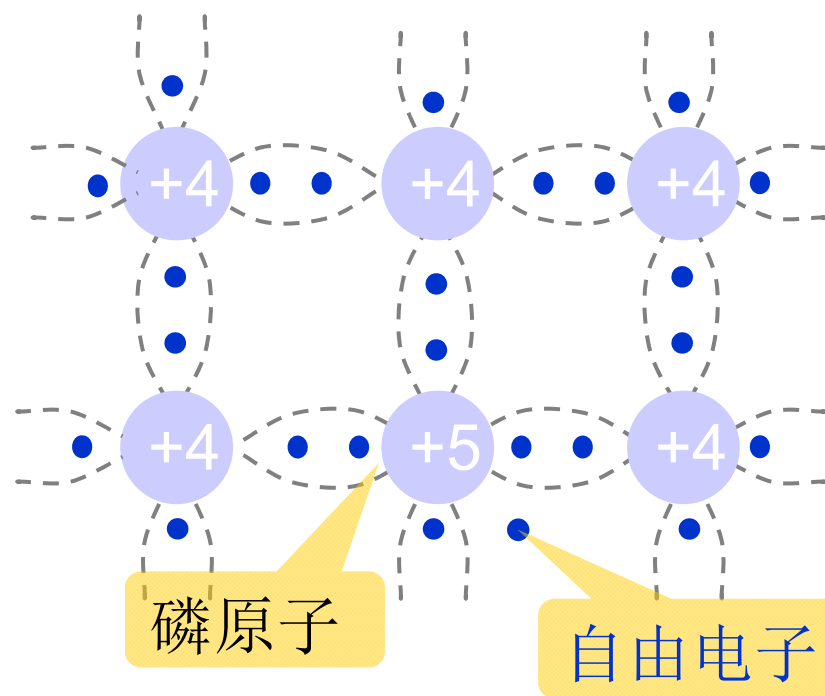




1. 半导体基本概念

- 半导体的导电性：掺杂性、热敏性、光敏性
- 根据掺入不同的杂质，可生成**N型**和**P型**两类半导体
 - **N型半导体**：在本征半导体中掺入五价元素（如磷、锑）后会出现多余电子，从而形成以自由电子为主的载流子，空穴为少数载流子，这种半导体叫做**N型**半导体。
 - **P型半导体**：在本征半导体中掺入三价元素（如硼、镓等），形成多余空穴，从而形成以空穴为主的载流子，电子为少数载流子，这种半导体叫做**P型**半导体。

N型半导体



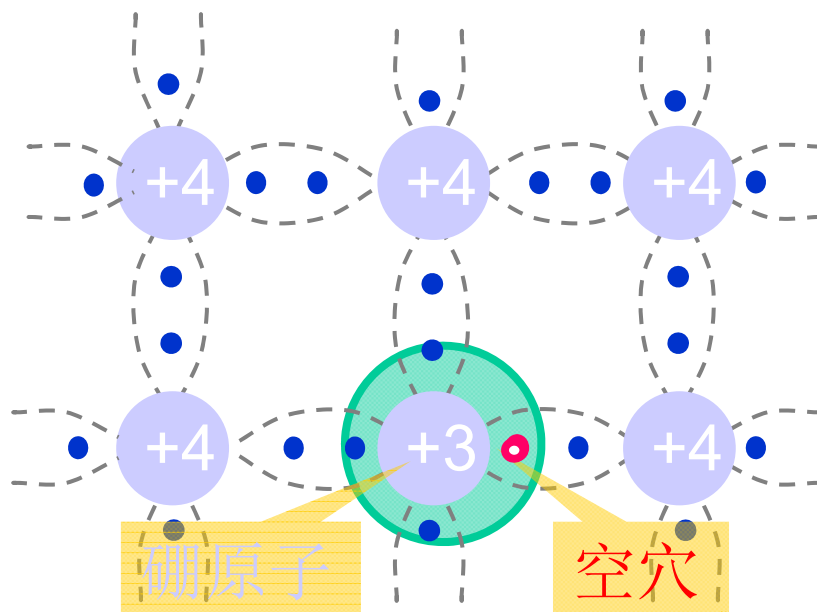
电子为多数载流子

空穴为少数载流子

载流子数 \approx 电子数



P型半导体



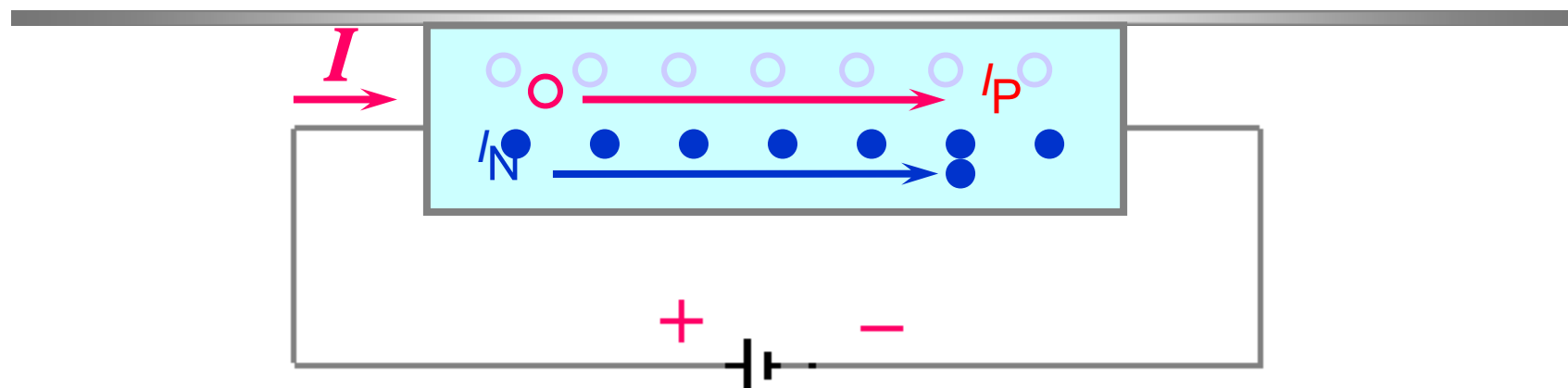
空穴 — 多子

电子 — 少子

载流子数 \approx 空穴数



掺杂半导体的导电作用



$$I = I_P + I_N$$

N 型半导体 $I \approx I_N$

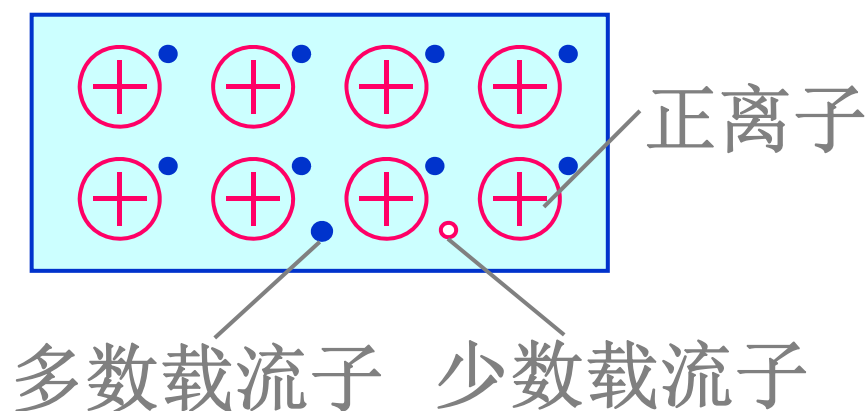
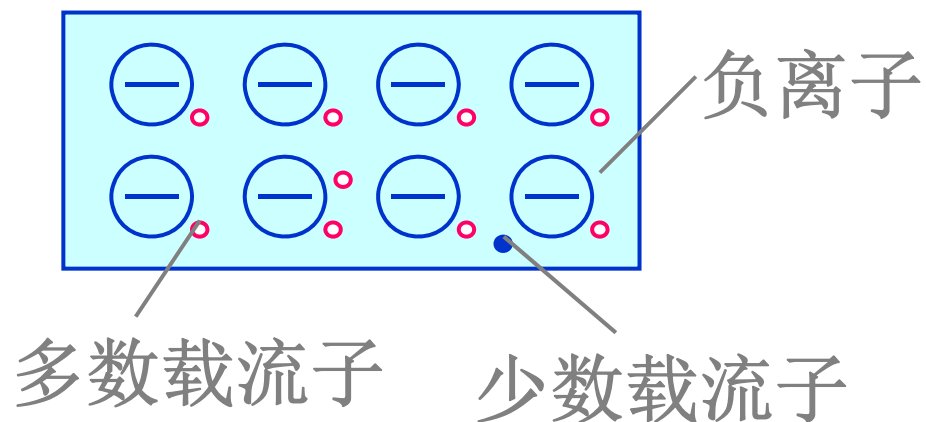
P 型半导体 $I \approx I_P$

- 半导体的导电能力取决于载流子浓度（数目）
 - 可以通过掺入杂质的方法提高载流子浓度，通过控制掺入杂质的种类和数量可以控制半导体各种电学特性。
 - 载流子浓度与温度有关，温度越高载流子浓度越高，所以半导体的导电能力与温度成正比



2. PN结与单向导电性

P型、N型半导体的简化图示

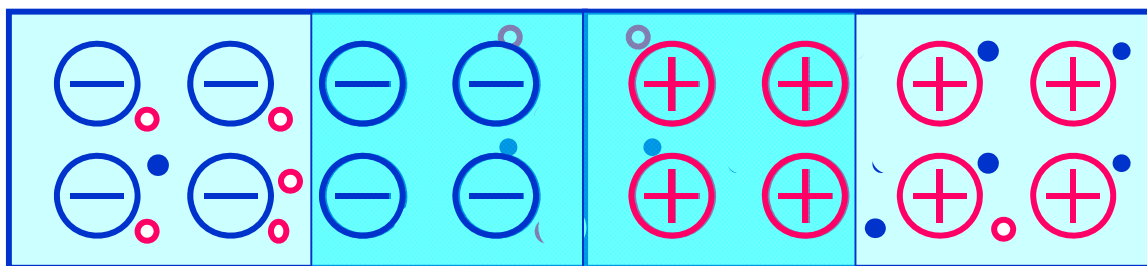




2. PN结与单向导电性

PN结： P型和N型半导体通过一定的工艺结合在一起时，交界面形成PN结，PN结是半导体器件的最基本单元结构。

1. 载流子的浓度差引起多子的扩散



← 内建电场

N区的多子（电子）向P区扩散，P区的多子（空穴）向N区扩散，在交界面的N区剩下不可移动的带正电荷的施主离子，P区剩下带负电荷的受主离子

2. 复合使交界面形成空间电荷区（耗尽层）

空间电荷区特点：

无载流子， 形成内电场，阻止扩散进行， 利于少子的漂移。



3. 扩散和漂移达到动态平衡

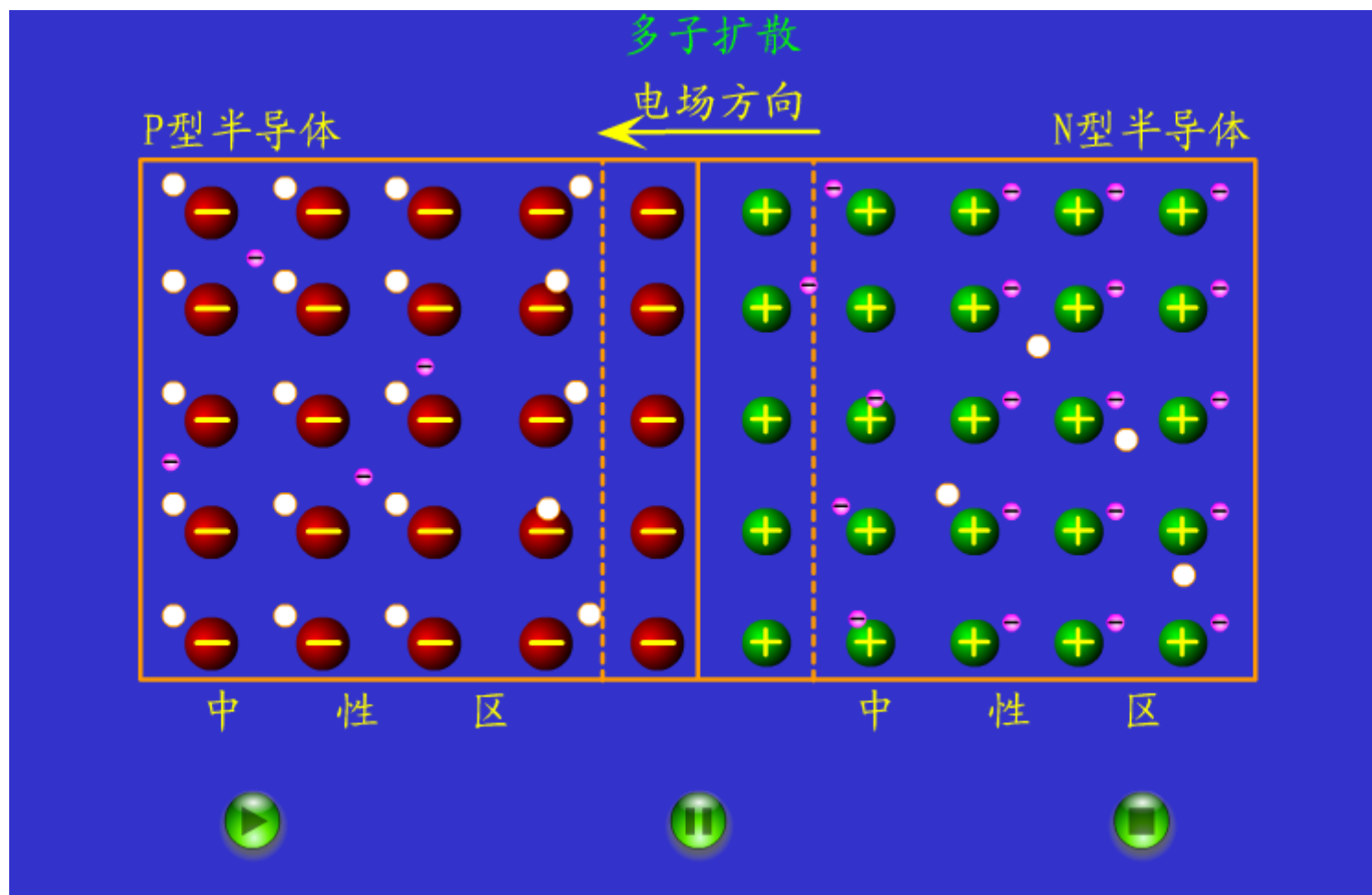
扩散电流 等于漂移电流，

总电流 $I = 0$ 。

- **扩散运动**：物质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。
- **漂移运动**：在电场力的作用下，载流子的运动感称为漂移运动。



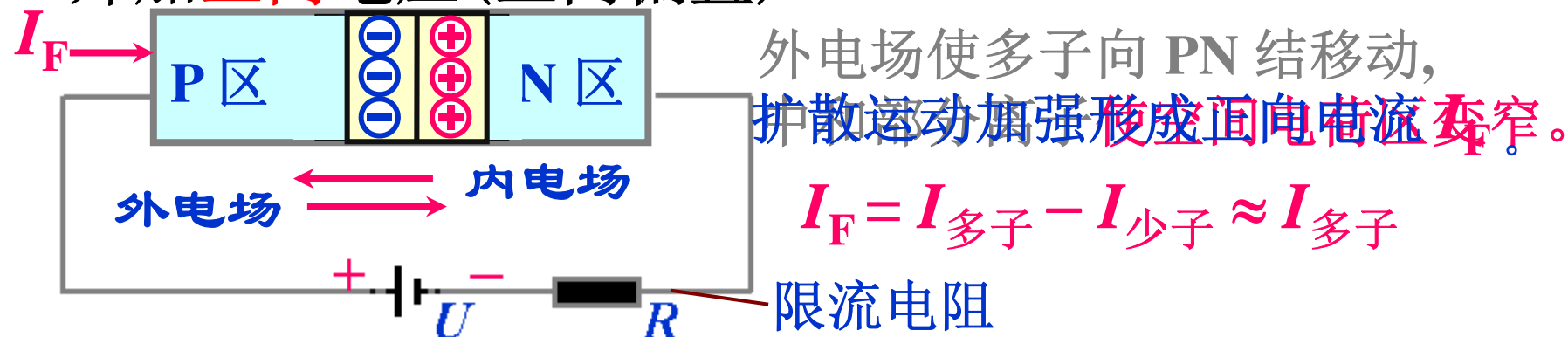
PN结形成过程



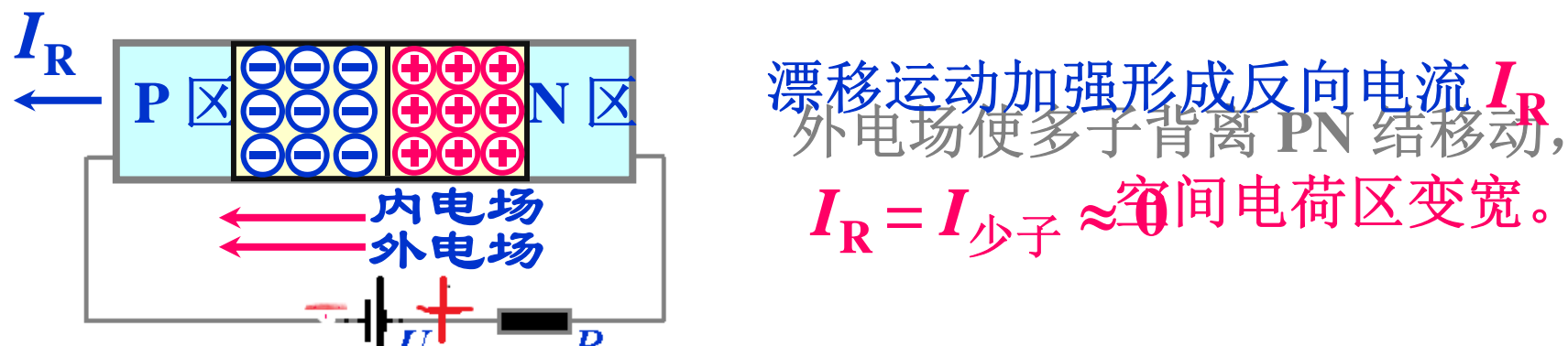
2.2 PN 结的单向导电性



1. 外加正向电压 (正向偏置) — forward bias



2. 外加反向电压 (反向偏置) — reverse bias

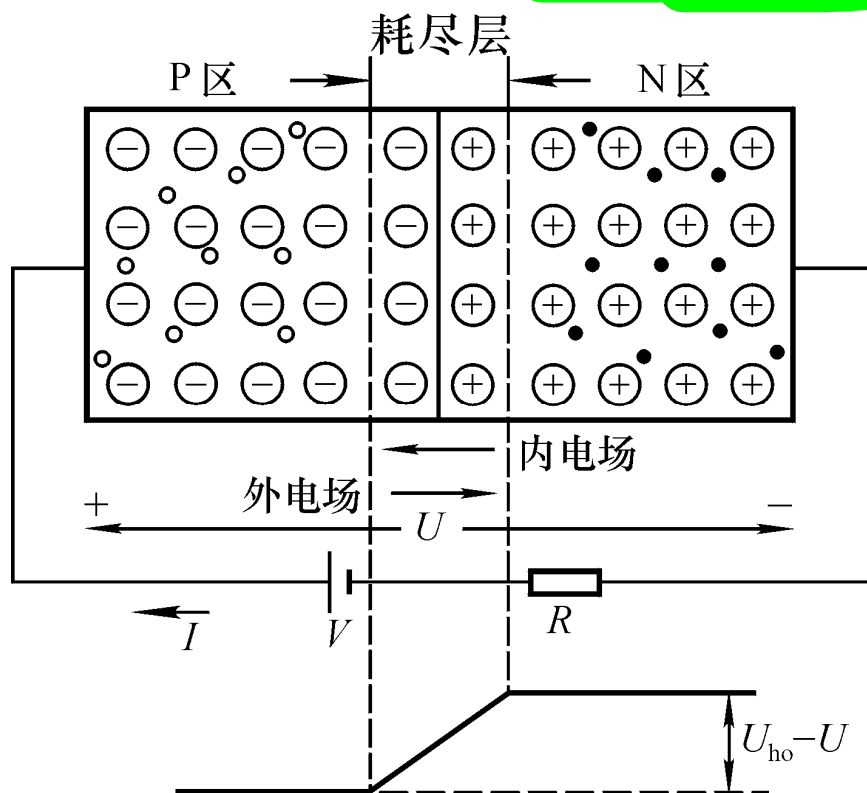


PN 结的单向导电性：正偏导通，呈小电阻，电流较大；反偏截止，电阻很大，电流近似为零。

PN结加正向电压——正向导通



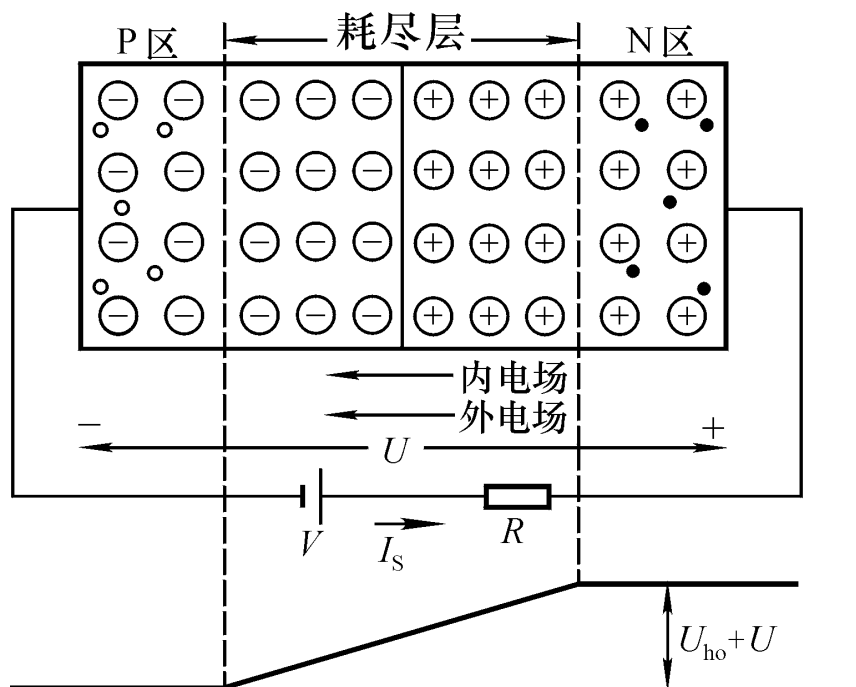
- 空间电荷区也叫耗尽层
- 半导体器件上施加的外电压称为偏置电压
- 如果外加电场削弱内电场（耗尽层变窄），引起载流子的连续扩散，形成电流，称为正向偏置电压，如图所示：



PN结加反向电压——反向截止



- 如果外加电场与内电场方向相同，使内电场加强（耗尽层变宽），进一步阻止载流子的扩散，阻止电流的形成，即反向偏置电压的情况，如图所示：



反向饱和电流：本征激发产生的少子在电场作用下产生的漂移电流，电流的大小由PN结的结面积和杂质浓度所决定，当PN结制作完成后这个电流就是固定的。



2.3 PN 结的伏安特性

$$I = I_s (e^{u/U_T} - 1)$$

反向饱和
和电流

温度电压
当量

当 $T = 300\text{K} (27^\circ\text{C})$:

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

加正向电压时

$$i \approx I_s e^{u/U_T}$$

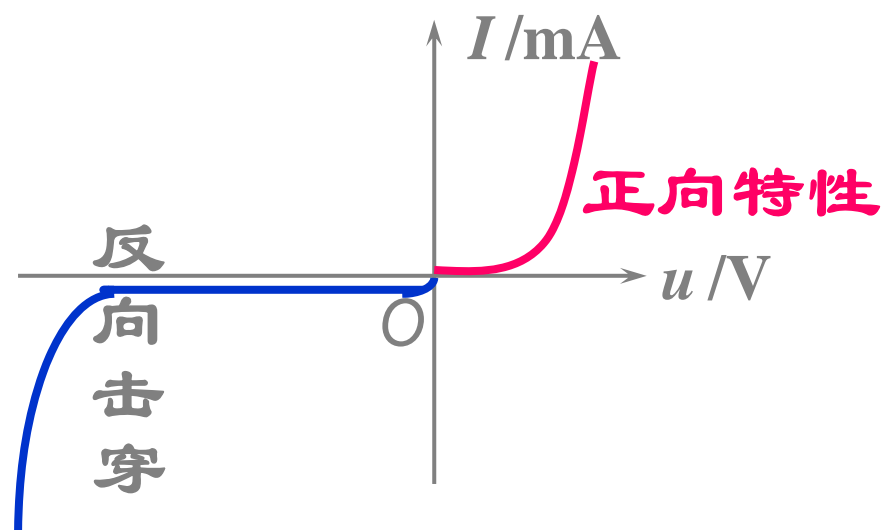
加反向电压时

$$i \approx -I_s$$

玻尔兹曼
常数

电子电量

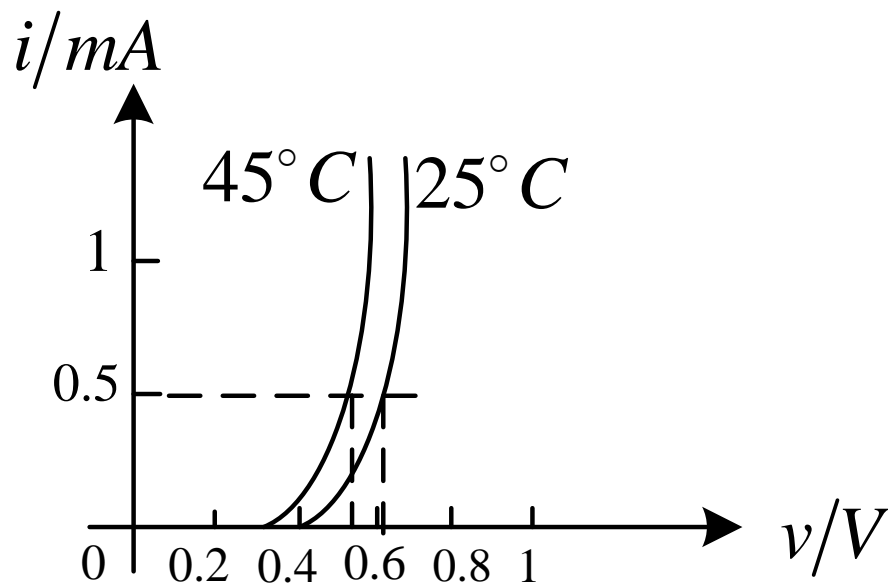
$$U_T = \frac{kT}{q}$$



例题5-1



如图所示的PN结正向输出特性，试估算出温度分别为 25°C 、 45°C ，要使PN结电流达到 0.5mA ，需要的正向偏置电压的大小为多少？



PN结正向输出特性

解：

- ① 所给的特性图估计出 25°C ，正向偏置电压为 0.6V
- ② 从所给的特性图估计出 45°C ，正向偏置电压为 0.55V



结论:

1. 半导体的电子空穴成对出现，且数量少；
2. 半导体中有电子和空穴两种载流子参与导电；
3. 半导体导电能力弱，并与温度有关。
4. 掺杂和高温都能使半导体导电能力提高。
5. PN结正向导通和反向截止特性