



太阳能利用技术



第三章 晶硅太阳能电池 的工作原理

张 涛

工程热物理



教学要求：

了解：太阳能电池的不同分类；

掌握：太阳电池的工作原理-光生伏特效应；太阳电池的光学特性；

应用：根据太阳电池的结构得到太阳电池的等效电路；



教学要点：

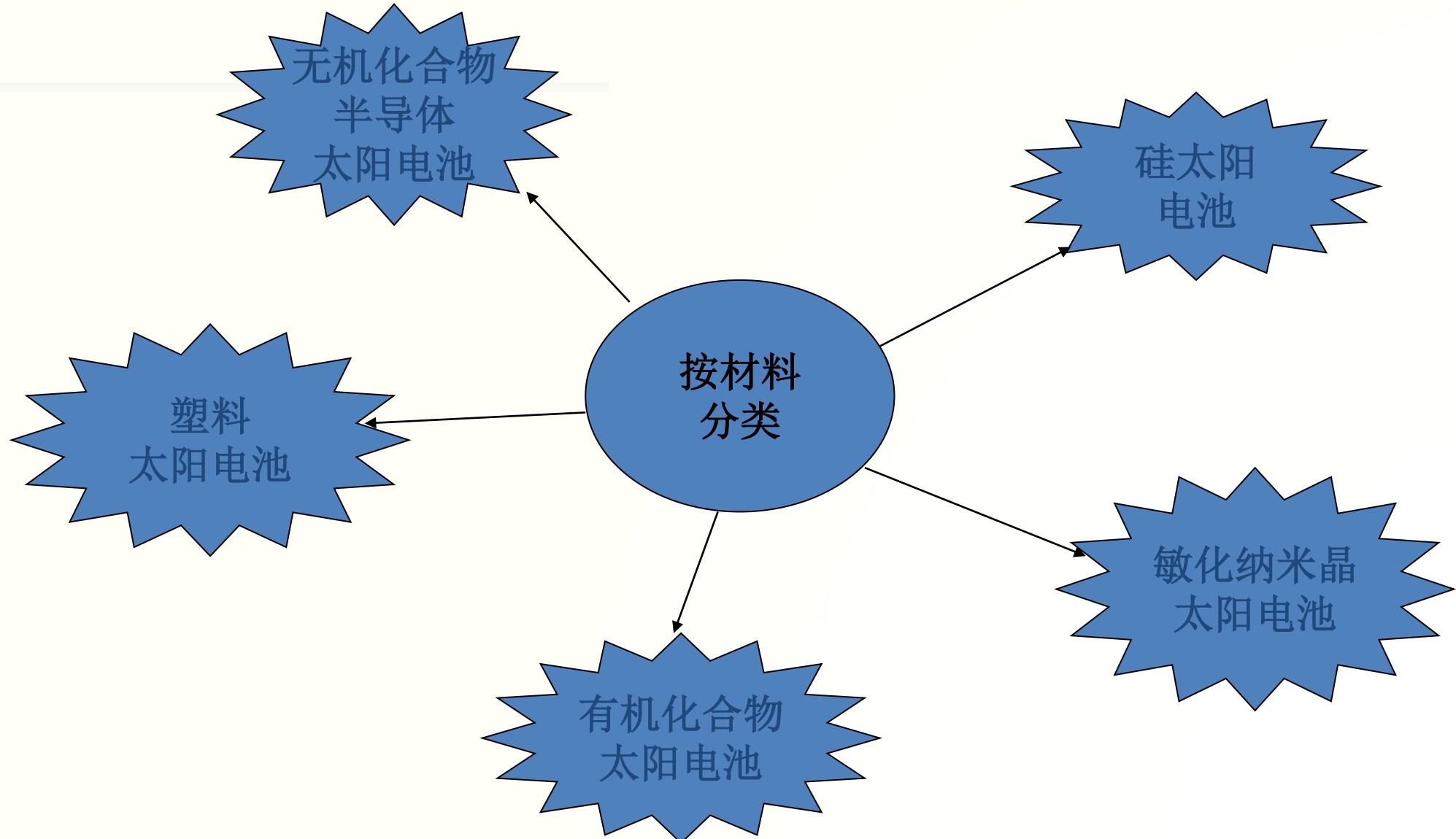
- (1) 太阳能电池的分类；
- (2) 半导体（本征半导体、掺杂半导体）；
- (3) PN结及光生伏打效应；
- (4) 太阳电池的等效电路及光电转换；
- (5) 太阳电池的主要参数及检测。

一、太阳能电池的分类



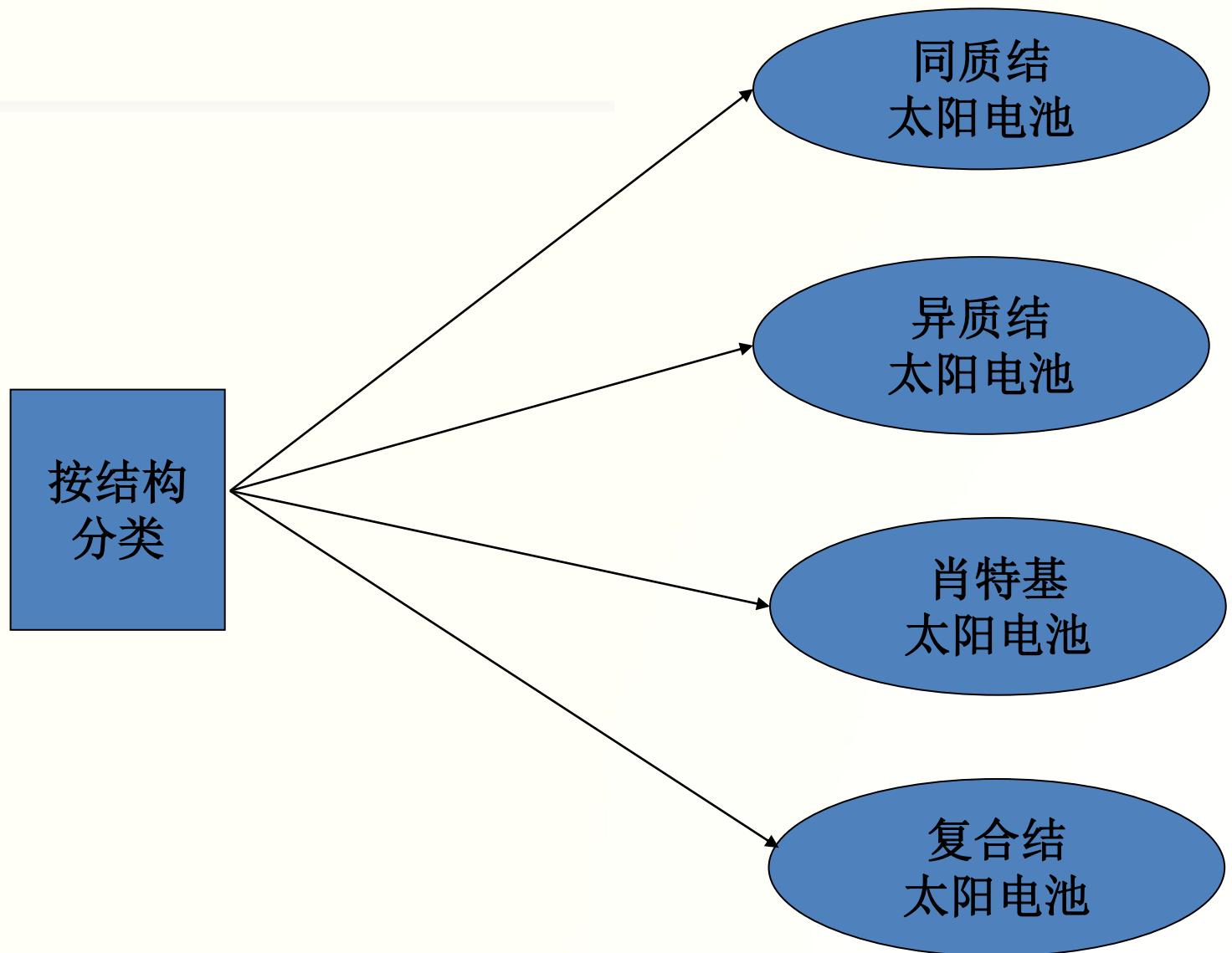


一、太阳能电池的分类





一、太阳能电池的分类



同一种半导体材料
所形成的PN结

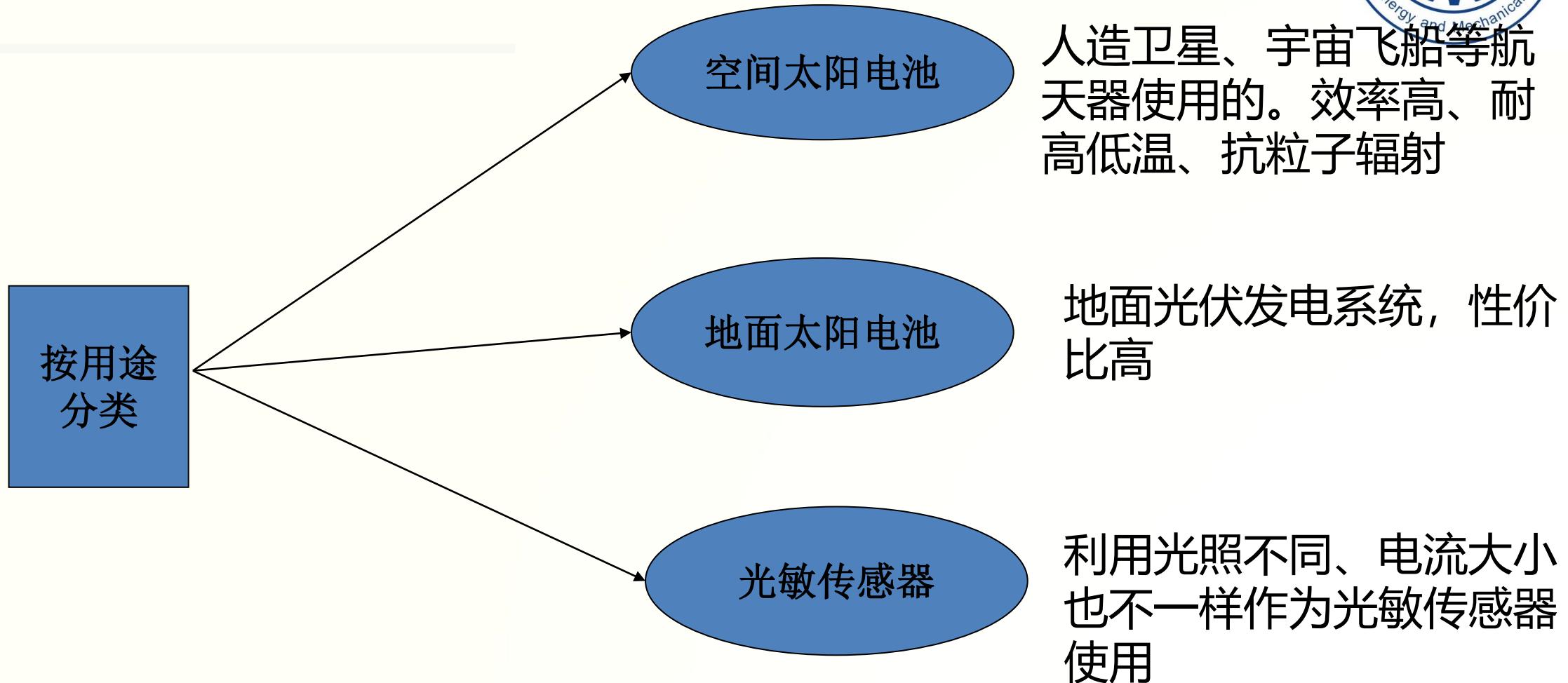
两种不同禁带宽度半导体
材料所形成的PN结

金属-半导体界面上的**肖特基势垒**形成的电池

两个或多个PN结
垂直多结及水平多结



一、太阳能电池的分类



二、晶硅太阳能电池

单晶硅太阳电池

- ◆采用单晶硅片制造的电池
- ◆发展最早，技术最成熟
- ◆效率较高





二、晶硅太阳能电池

多晶硅太阳电池

- ◆高纯硅不拉成单晶，而是溶化后浇铸成正方形
- ◆硅片是多个不同大小、不同取向的晶粒构成
- ◆效率已与单晶硅效率接近



单晶硅太阳电池片

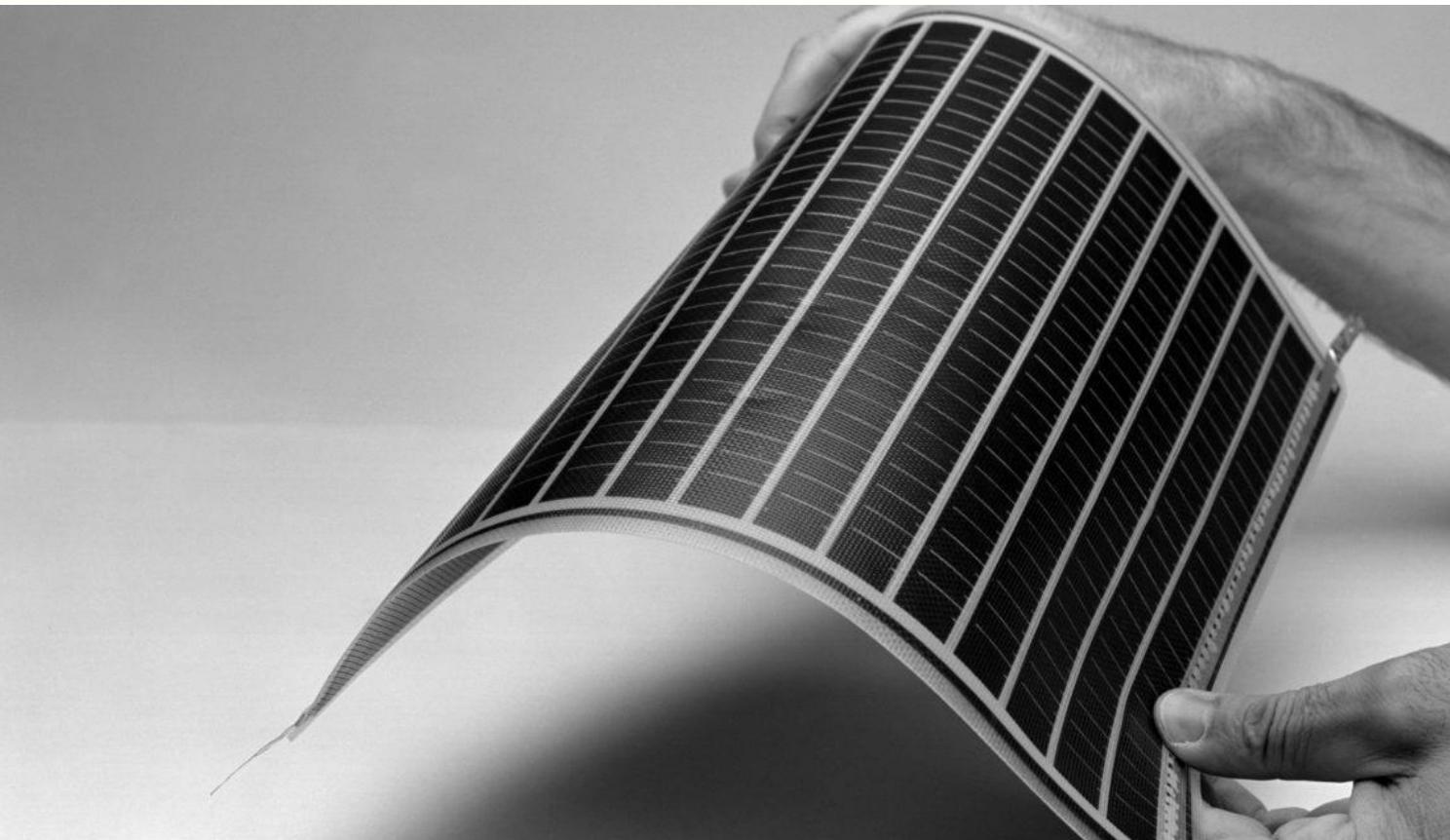


多晶硅太阳电池片

二、晶硅太阳能电池

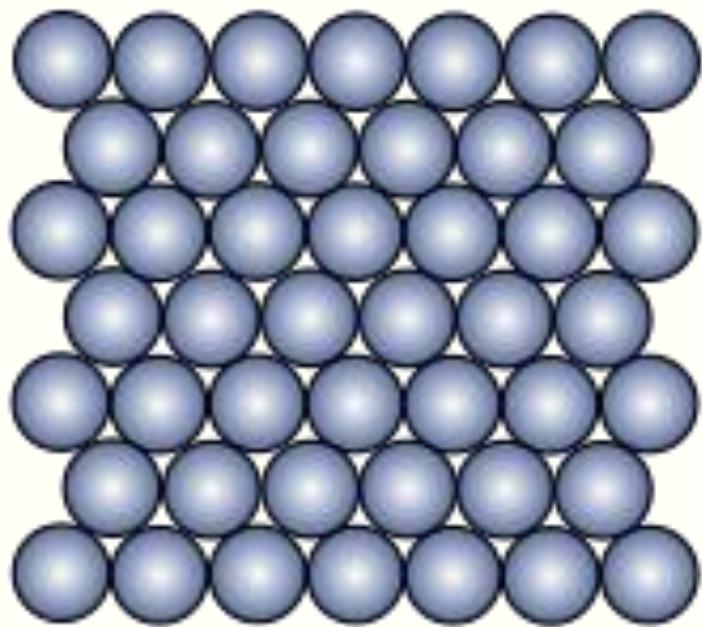
非晶硅太阳电池

- ◆采用高频辉光放电等方法使硅烷(SiH₄)气体分解沉积
- ◆原子排列缺少规则性，缺陷多
- ◆适用于大规模生产，面积大
- ◆吸收系数高，弱光发电高

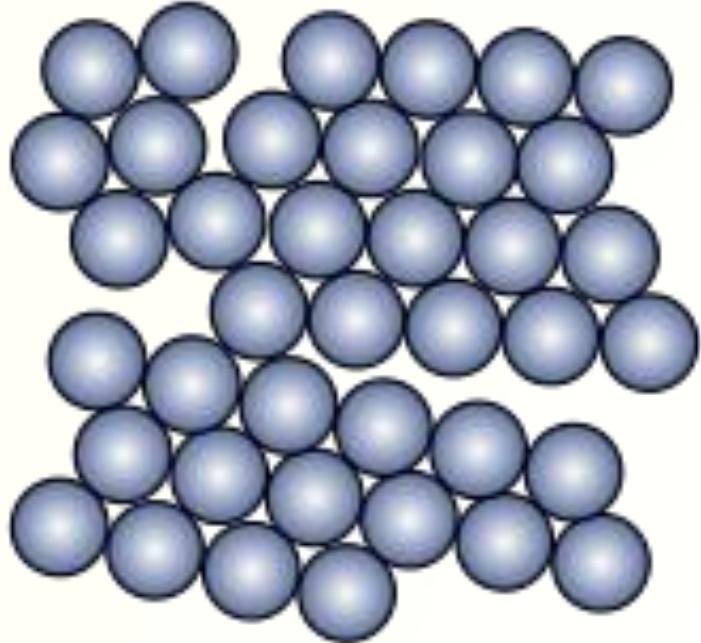


二、晶硅太阳能电池

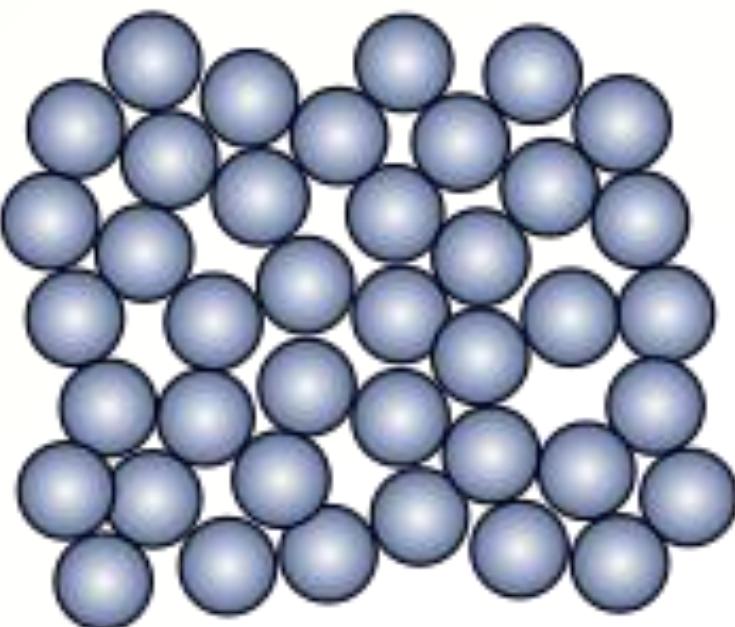
Monocrystalline



Polycrystalline



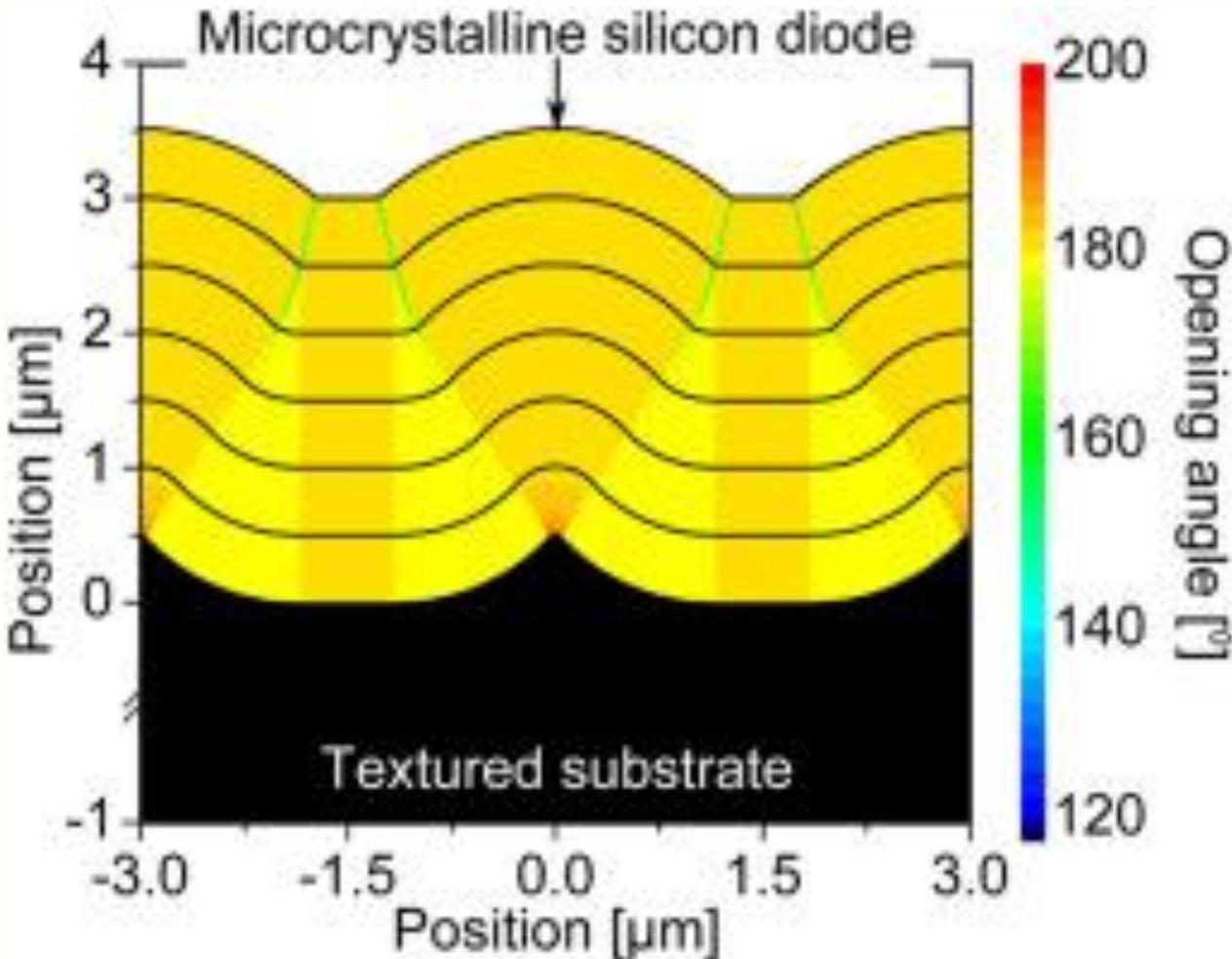
Amorphous



二、晶硅太阳能电池

微晶硅太阳电池

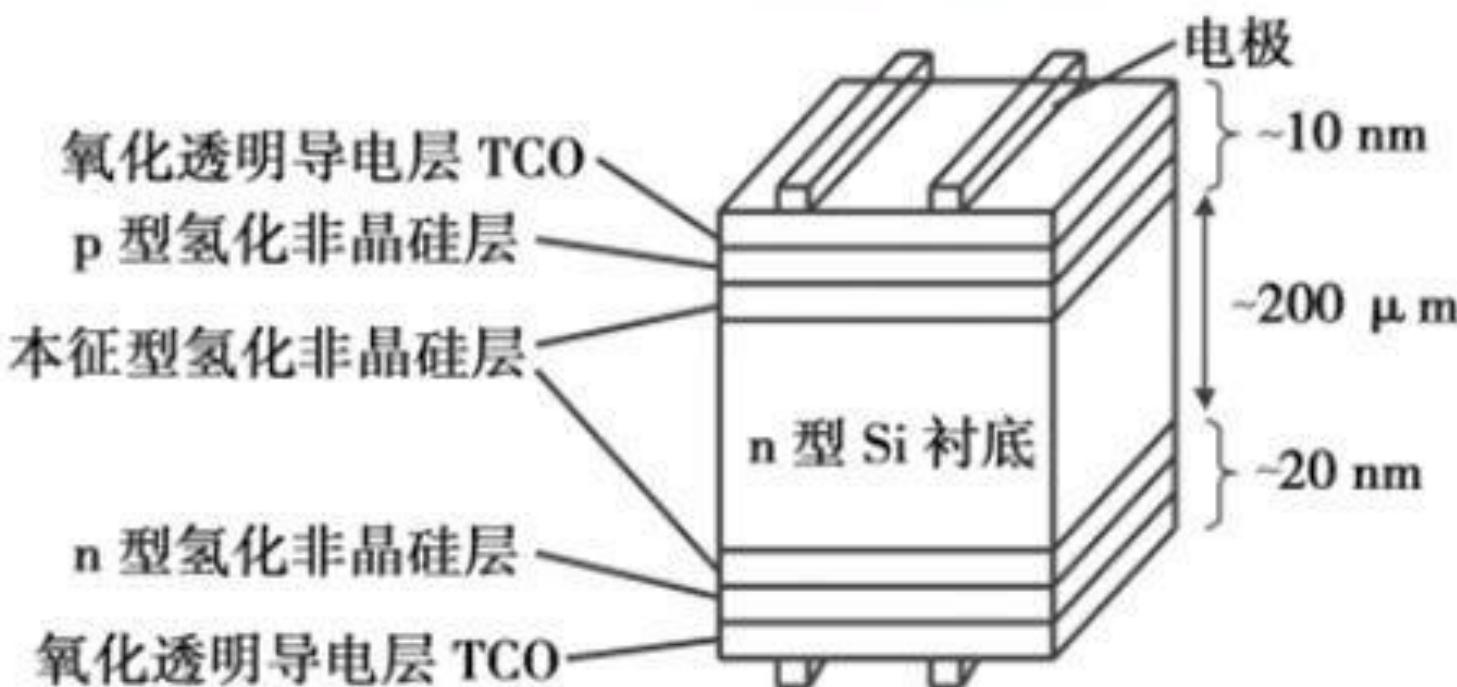
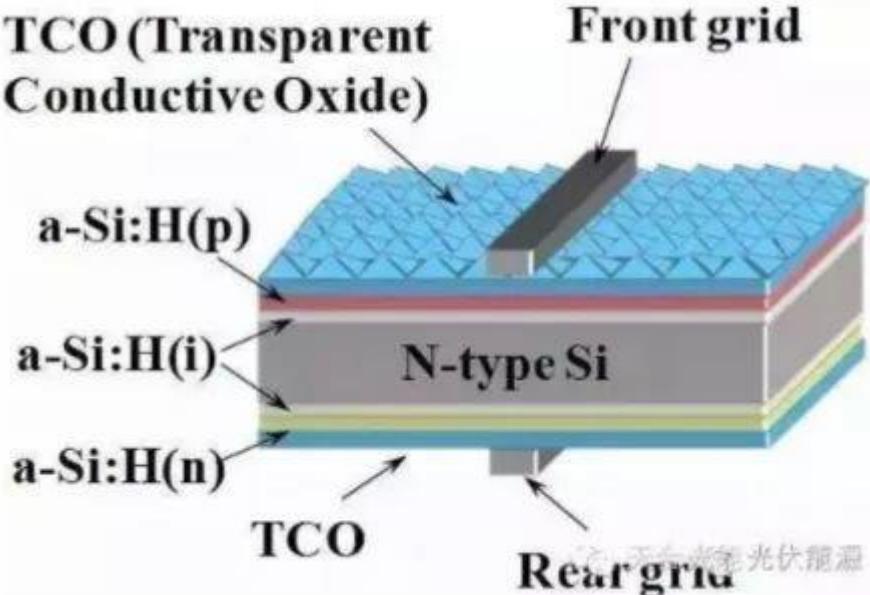
- ◆ 晶粒尺寸为10nm
- ◆ 形成的2-3um微晶硅薄膜
- ◆ 未实现大规模工业化生产
- ◆ 一般与非晶硅实现叠层使用



二、晶硅太阳能电池

HIT太阳电池 (内禀薄层异质结)

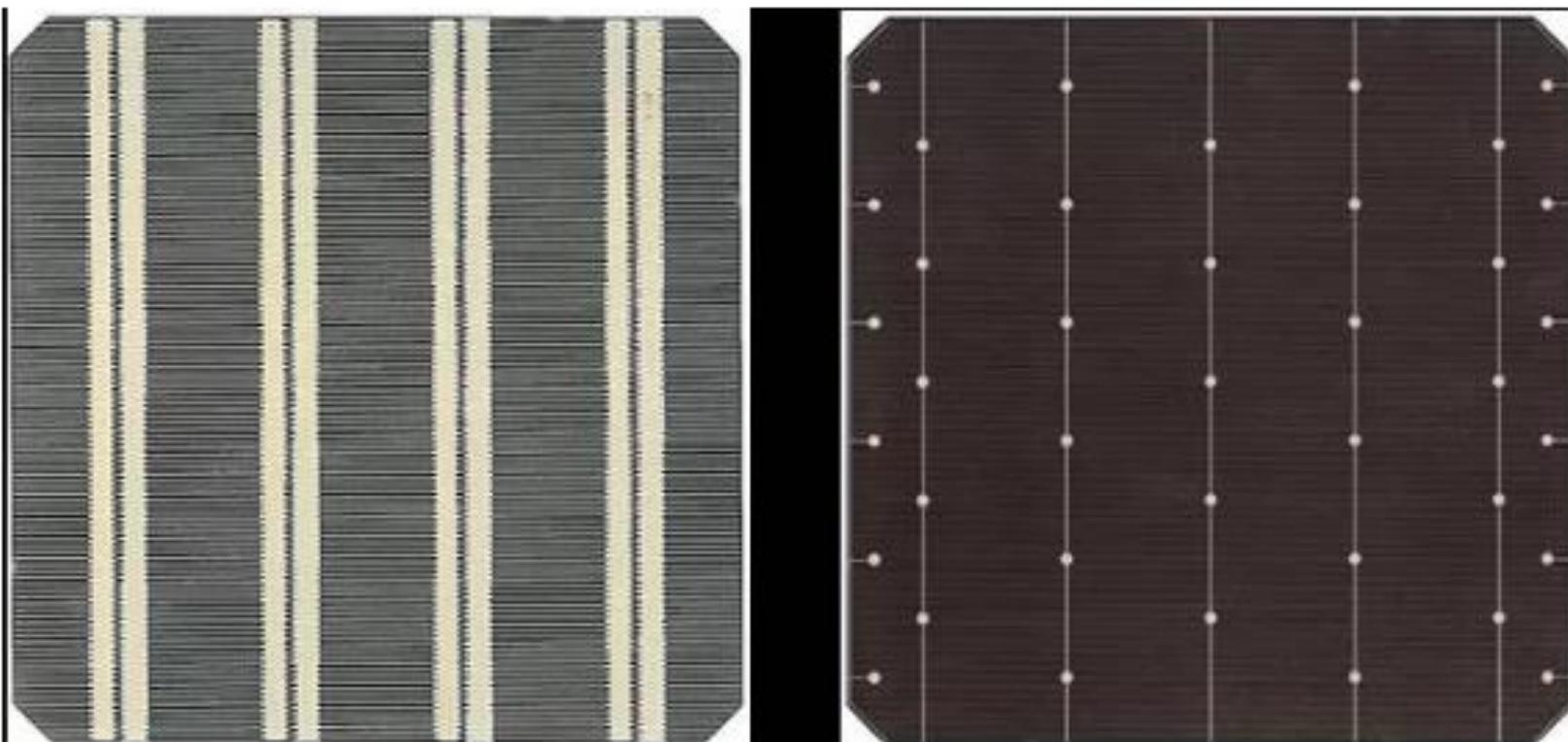
- ◆ 光照射侧P/I型a-Si膜
- ◆ 背面侧I/N型a-SI膜
- ◆ 双面发电，温度系数低
- ◆ 工艺温度低 (200°C)，步驟少
- ◆ 可弯曲



二、晶硅太阳能电池

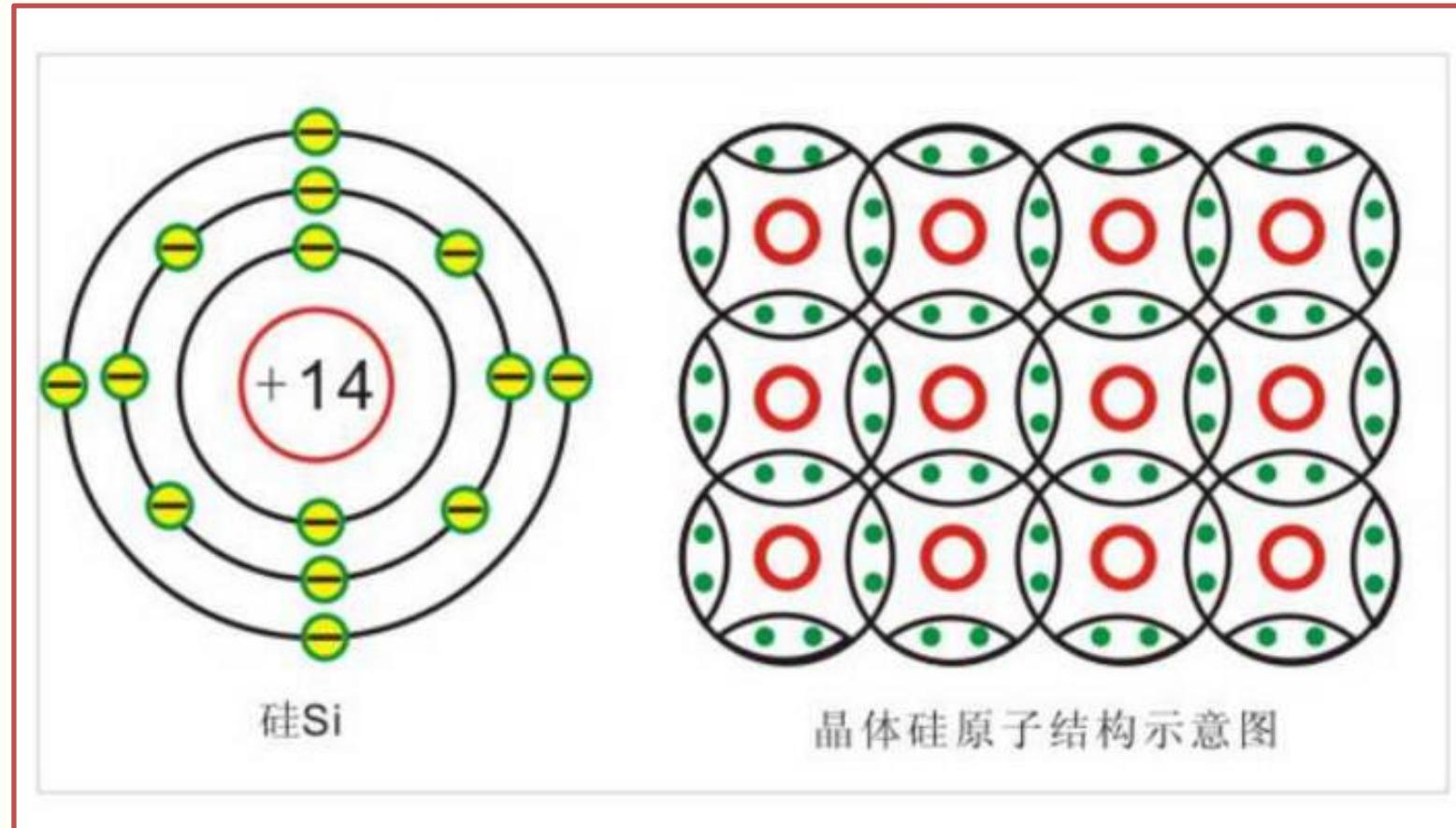
IBC太阳电池(交叉背接触)

- ◆ 正负两极金属接触均移到电池片背面背面侧，增加发电面积及效率
- ◆ 短路电流更高
- ◆ 串联电阻低
- ◆ 填充因子高



二、半导体

硅外层的四个电子受到原子核的束缚较小，如果得到**足够的能量**，就能使其**脱离**原子核的**束缚**而成为**自由电子**，并在原来的位置留出一个**空穴**

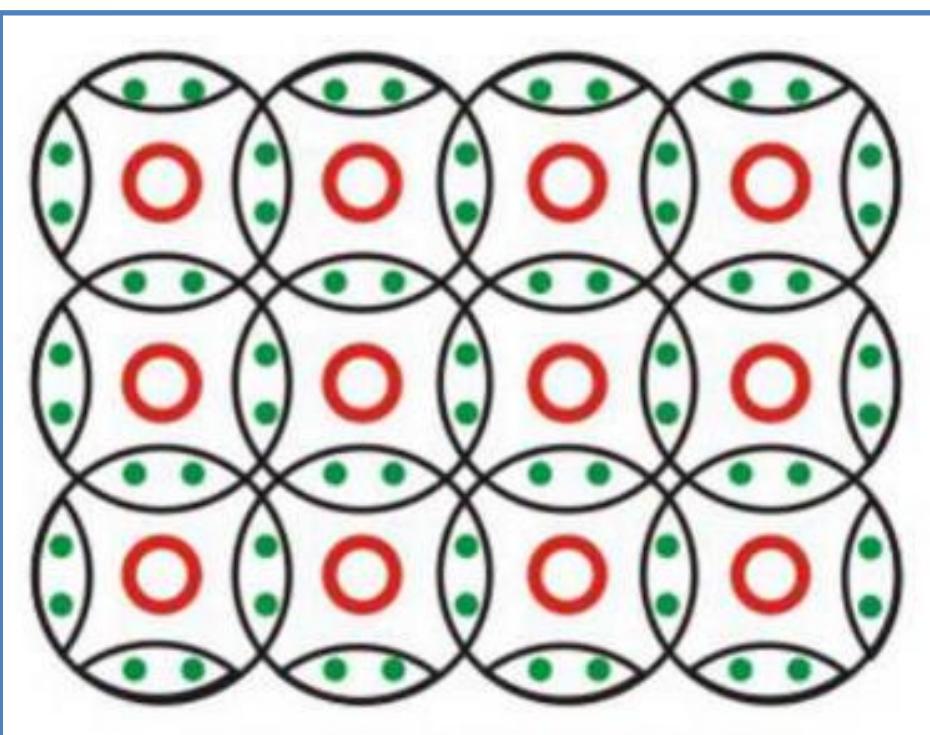


二、半导体

从硅原子中分离一个电子需要**1.12ev**的能量，
该能量称为**硅的禁带宽度**

分离的电子成为自由的传导电子，同时留下一个空穴。从其他相邻原子过来的电子可以填补这个空穴，造成空穴从一个位置移到新的位置。

电子和空穴的移动形成电流。



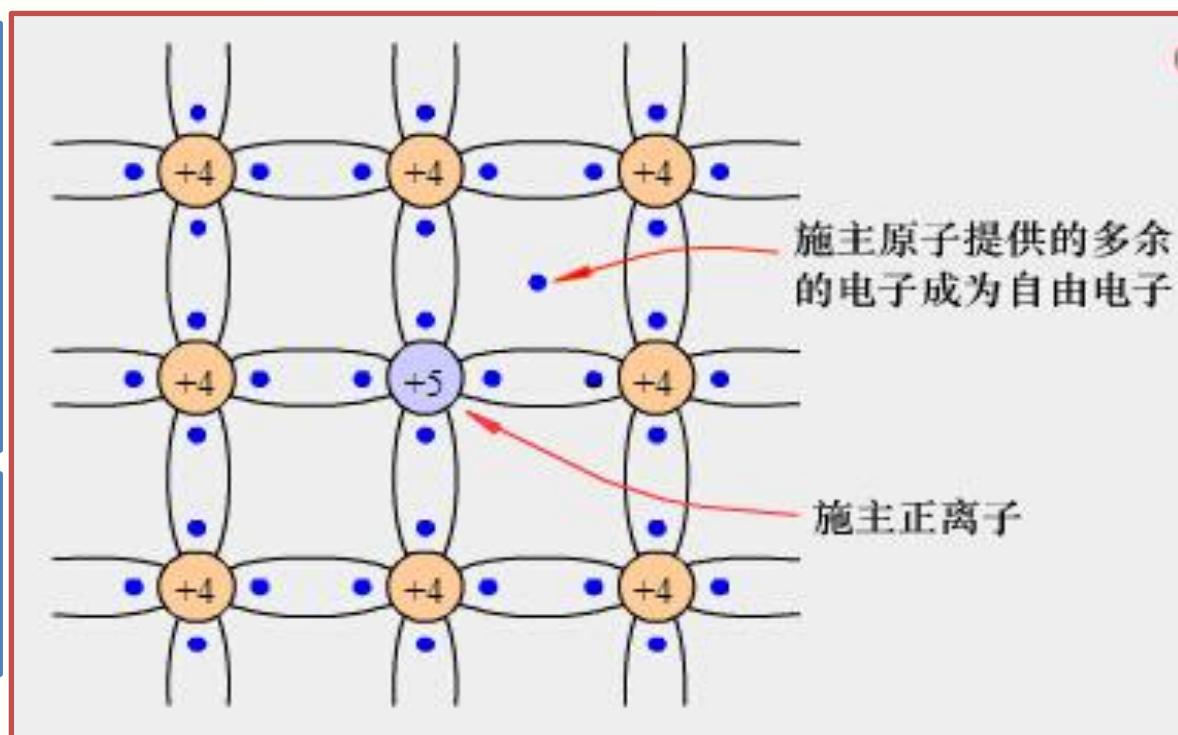
二、半导体

◆ N型半导体：

在纯净的硅晶体中掺入少量的**5价杂质磷**。由于磷的原子数目比硅原子少得多，所以**基本结构不变**，某个位置上的**硅原子被磷原子取代**。

磷原子多出一个价电子，所受到的束缚力很小，很容易变成自由电子，**不稳定的电子**。数量多，被称为**多数载流子**。

同时，由于**热激发**产生**少量**的电子-空穴对，**空穴**数量少，成为**少数载流子**。



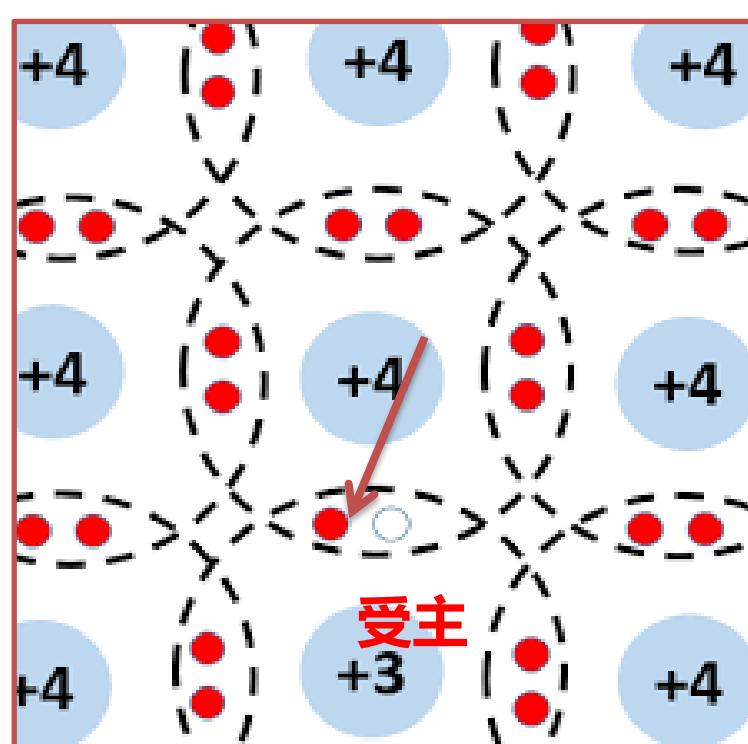
二、半导体

◆ P型半导体：

在纯净的硅晶体中掺入少量的**3价杂质硼**。由于**硼**的原子数目比硅原子少得多，所以**基本结构不变**，某个位置上的**硅原子被硼原子取代**。

硼原子少出一个价电子，在共价键上出现了一个空穴。附近的硅原子在热激发作用下，共价键电子很容易转移，进而导致**硅原子上出现空穴，也被称为多数载流子**。

同时，由于**热激发**产生**少量**的电子-空穴对，**电子**数量少，成为**少数载流子**。



二、半导体

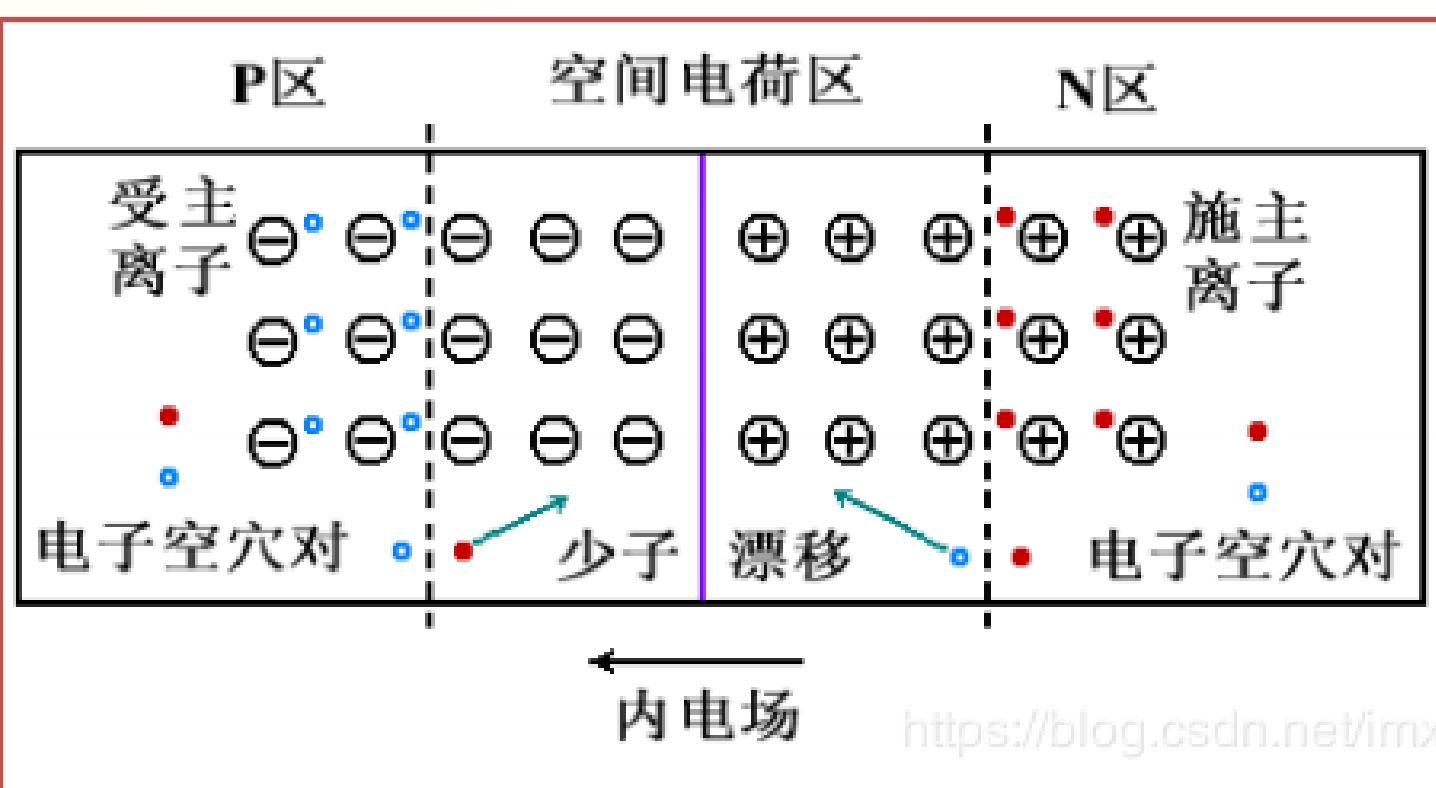


P-N结：

- ## ➤ ①多数载流子的扩散

在P型和N型半导体交界面，由于浓度差，会发生多数载流子的扩散运动

- ◆ P型半导体的空穴向N型扩散，导致出现带负电荷的杂质离子
 - ◆ N型半导体的电子向P型扩散，导致出现带正电荷的杂质离子





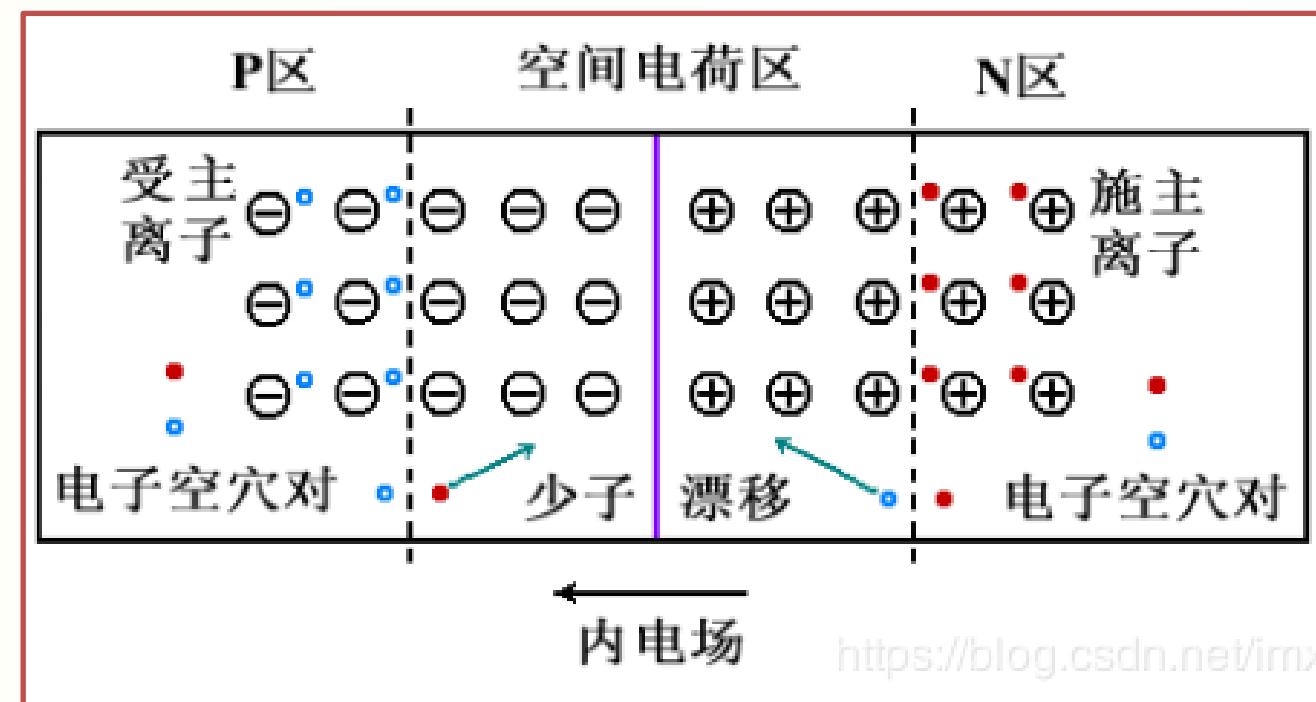
二、半导体

P-N结：

➤ ①多数载流子的扩散

扩散的结果是交界面靠近N区带正电，靠近P区带负电，将这一层称为**P-N结**，即**空间电荷区（也称为耗尽区）**。

P-N结内两边积聚了正负电荷，形成一个由N指向P区的**反向电场**，称为**内建电场**，内电场，也称为**势垒电场**



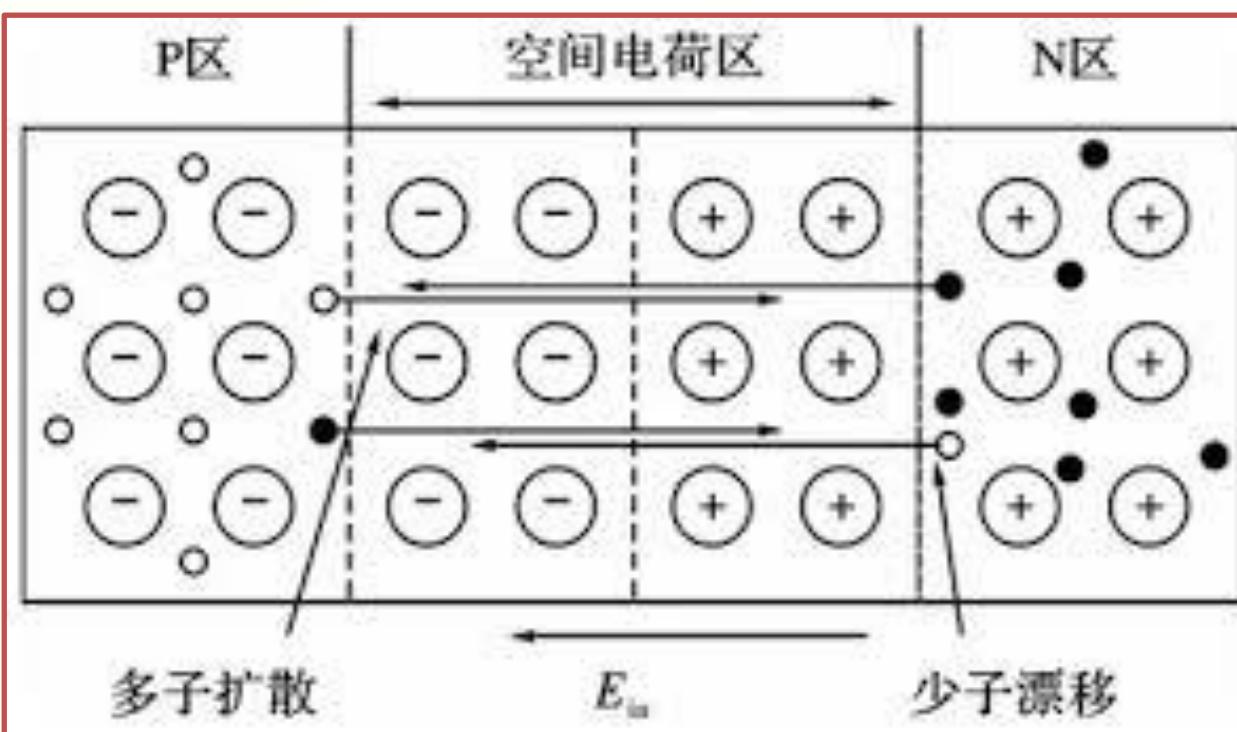
二、半导体

P-N结：

②少数载流子的漂移

内电场的形成会阻碍多数载流子的扩散，因为扩散方向与内电场方向相反。

内电场形成的电势差会促进少数载流子的运动，称之为漂移运动。漂移与扩散方向相反。



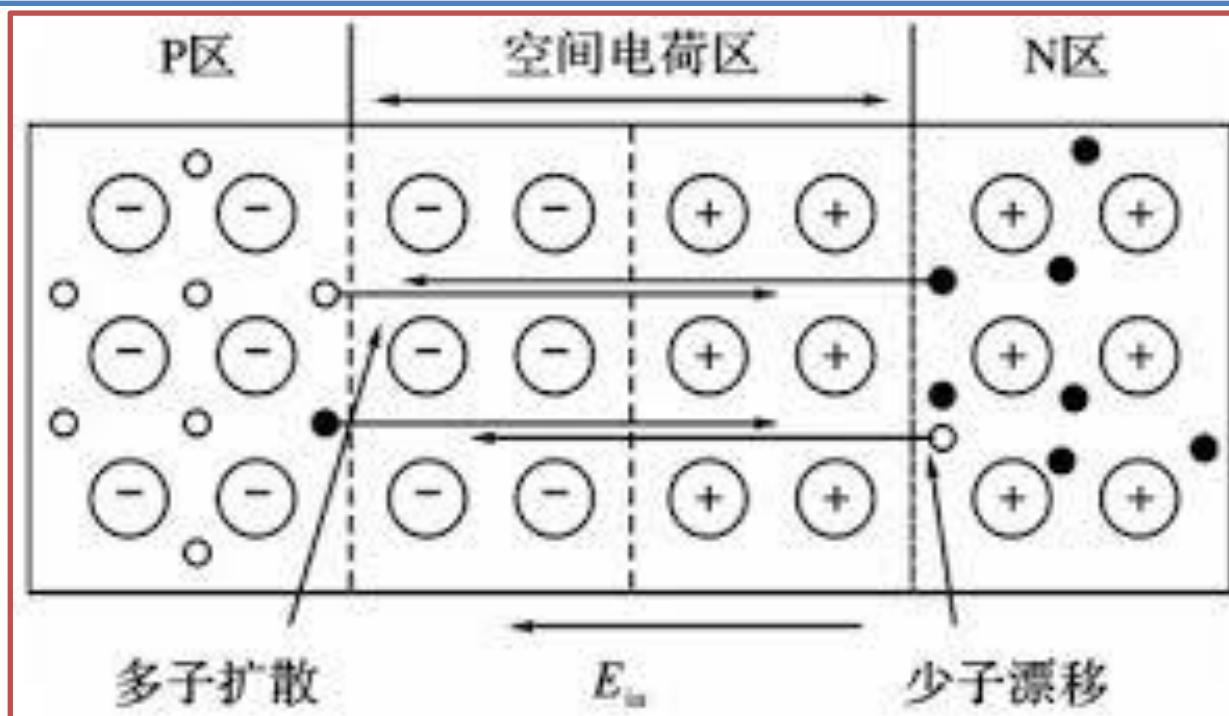
二、半导体

P-N结：

②少数载流子的漂移

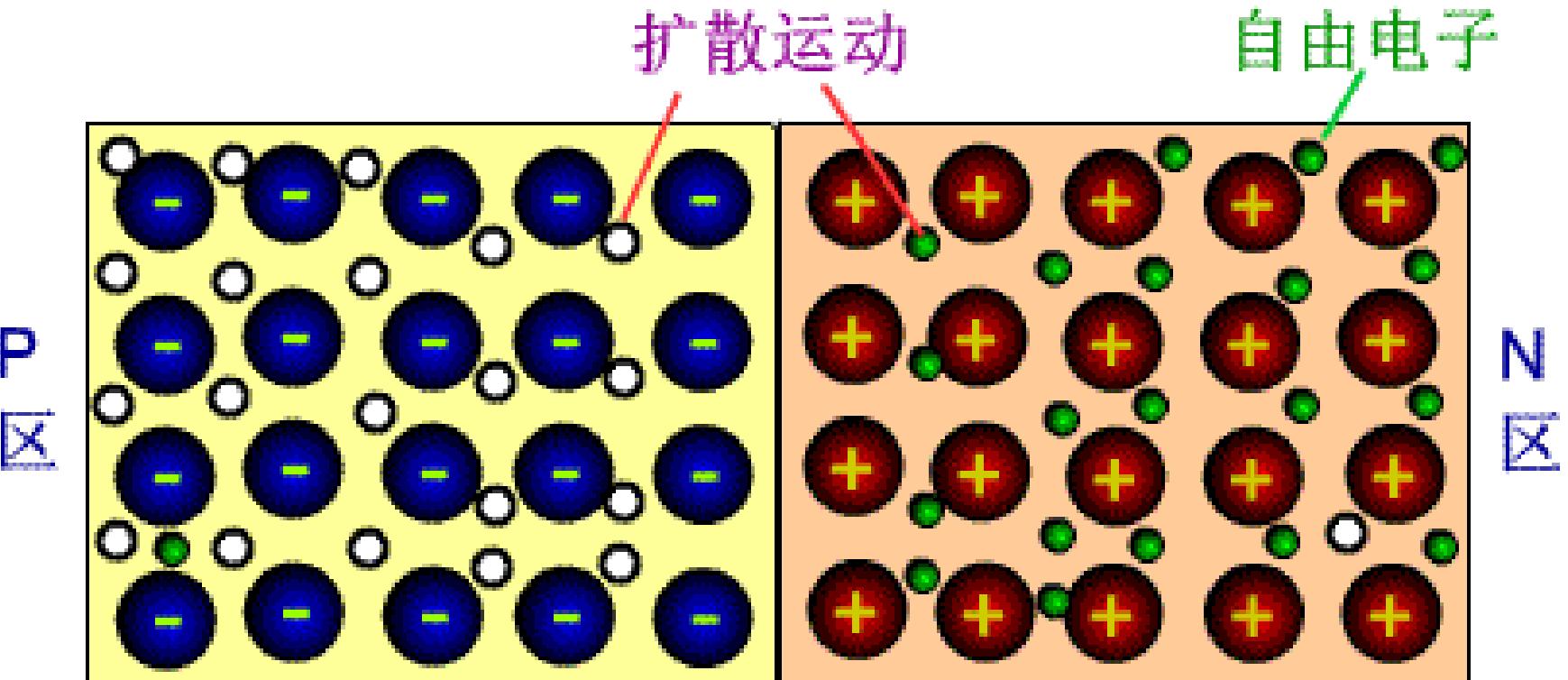
扩散运动与漂移运动逐渐**趋向平衡**，由于运动方向相反，因此**总电流为零时**，扩散不再进行，**空间电荷区厚度不再增加**。

空间电荷厚度与掺杂的浓度有关



二、半导体

P-N结：



(a)P区与N区中载流子的扩散运动
PN结的形成



二、半导体

P-N结：

内电场的电势差，叫做**势垒**，也称**接触电势差**，其大小也表示为：

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

q 电子电量 (1.6×10^{-19})

T 绝对温度

k 玻尔兹曼常数

n_n, n_p N和P型半导体材料中的电子浓度

p_n, p_p N和P型半导体材料中的空穴浓度



二、半导体

内光电效应：

半导体表面收到太阳光照射时，光子能量**大于或是等于**半导体禁带宽度，就能使电子挣脱原子核的束缚，在半导体中产生大量的电子-空穴对。

$$h\nu \geq E_g$$

$h\nu$ 光子能量

h 普朗克常数

ν 光波频率

E_g 半导体材料的禁带宽度



二、半导体

内光电效应：

代入光速的表达式可得：

$$C = v\lambda$$

$$\lambda \leq \frac{hC}{E_g}$$

只有满足要求的波长才能产生电子-空穴对，通常将该波长称为**截止波长**

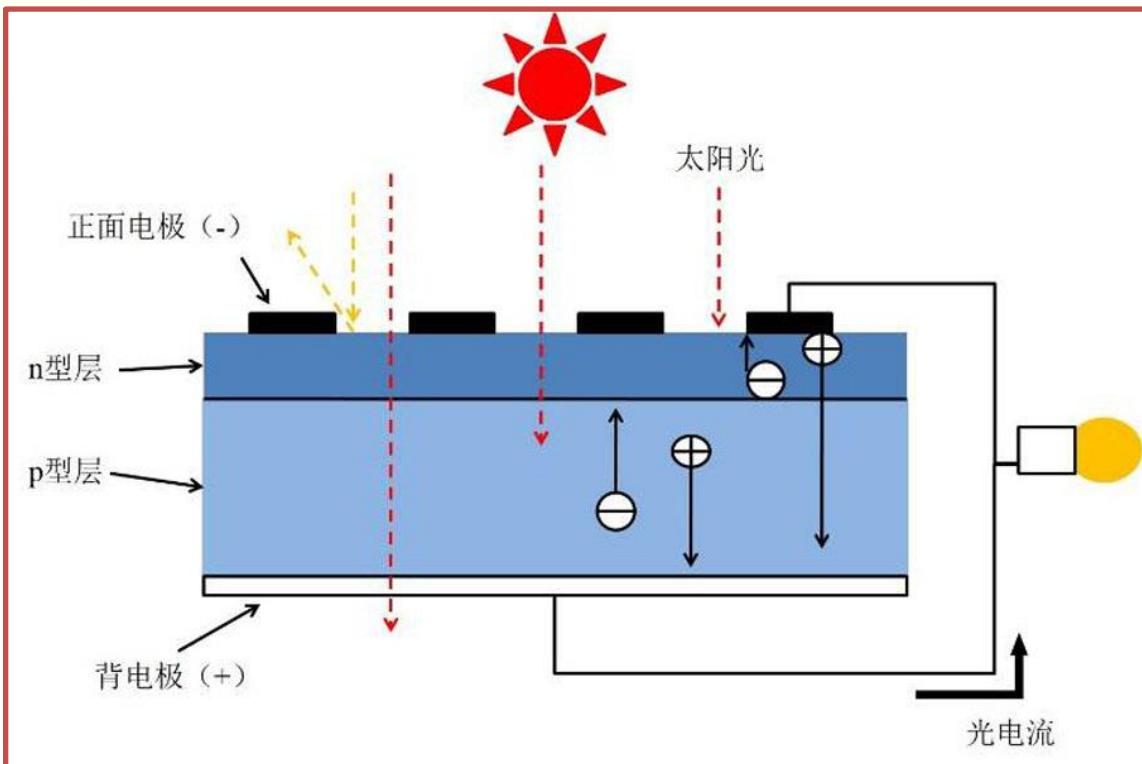
超过禁带宽度的光子被吸收后转化为**电能**，而能量**小于禁带宽度**的光子被半导体吸收后则转化为**热能**，使得半导体温度**升高**。

禁带宽度的存在使得每种半导体都有一个**极限光电效率**

二、半导体

太阳电池的基本工作原理

- ◆ 太阳照射到电池表面时，会在**P区、N区及中间的空间电荷区**均产生电子-空穴对，即**光生载流子**

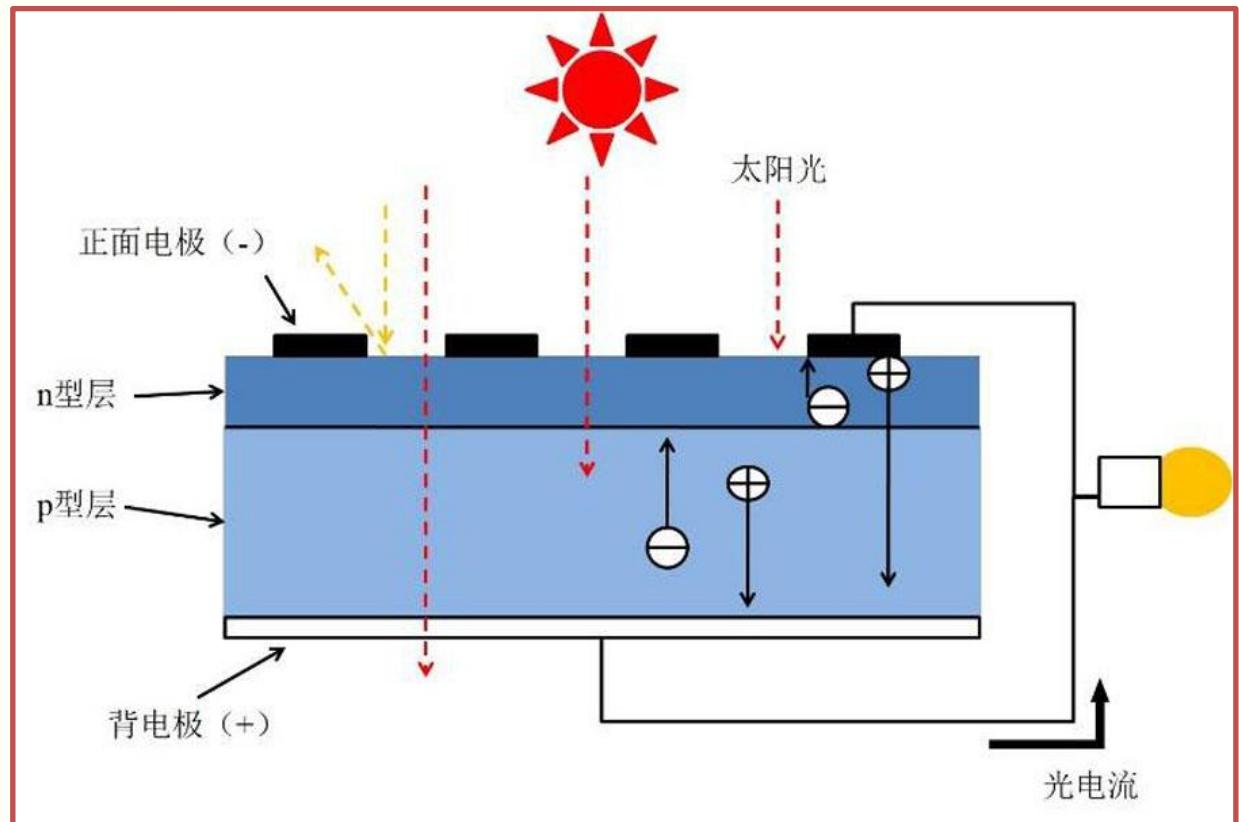


二、半导体

太阳电池的基本工作原理

➤ ①内电场内的光生载流子漂移

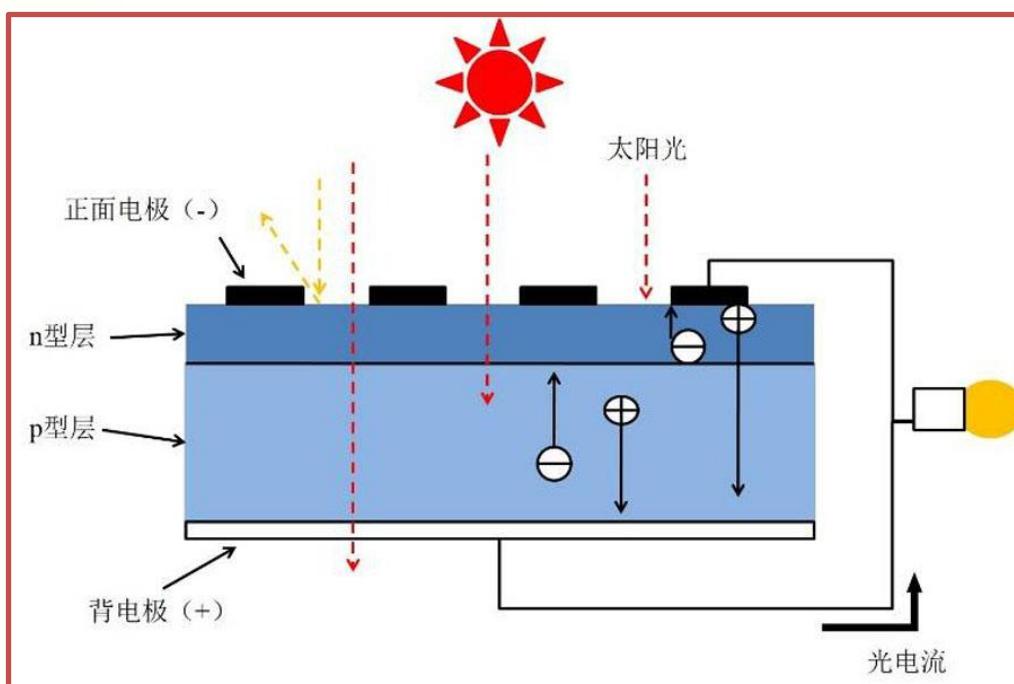
- ◆ 在空间电荷区产生的电子-空穴对，被内电场分离，**电子被推进N区，空穴被推进P区**
- ◆ **空间电荷区边界处**的电子或空穴载流子**浓度近似为0**；



二、半导体

太阳电池的基本工作原理

- ②光生载流子/少数载流子的扩散
- ◆ 由于浓度差，在**N区，光生空穴向P-N扩散**；到达PN结边界后，立即被内电场分离，在电场力作用下做漂移运动。越过PN结，**进入到P区。**
- ◆ 在**P区，光生电子向PN结扩散**，达到PN结后，在内电场作用下做漂移运动，**进入到N区。**
- ◆ 最终的结果是：**光生电子留在N区，而光生空穴留在P区，形成光生电场**

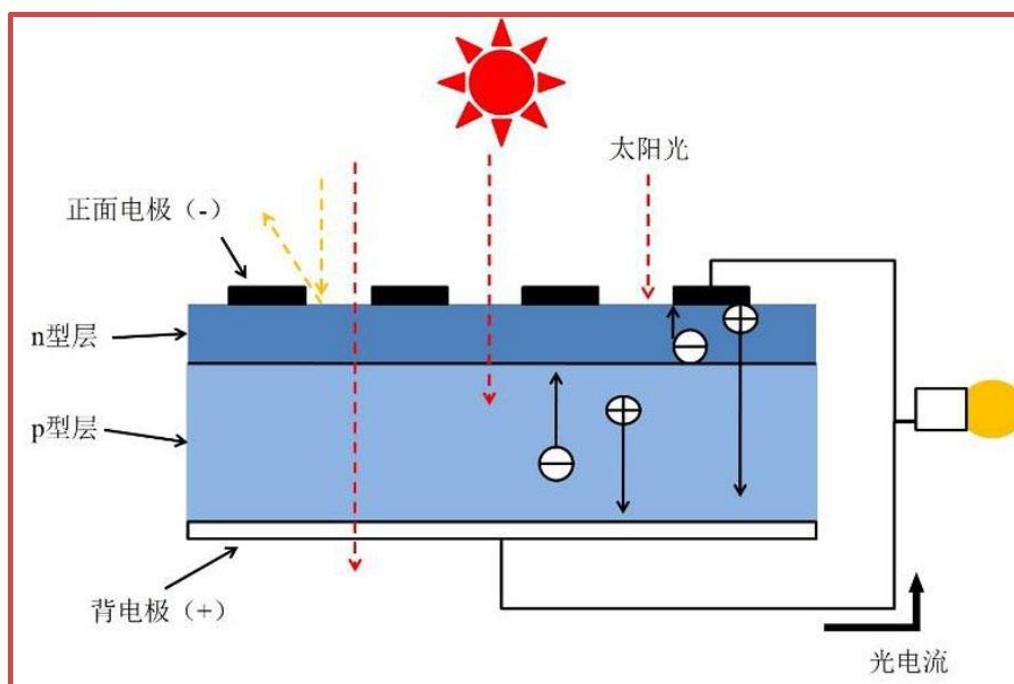


二、半导体

太阳电池的基本工作原理

➤ ②光生伏打效应

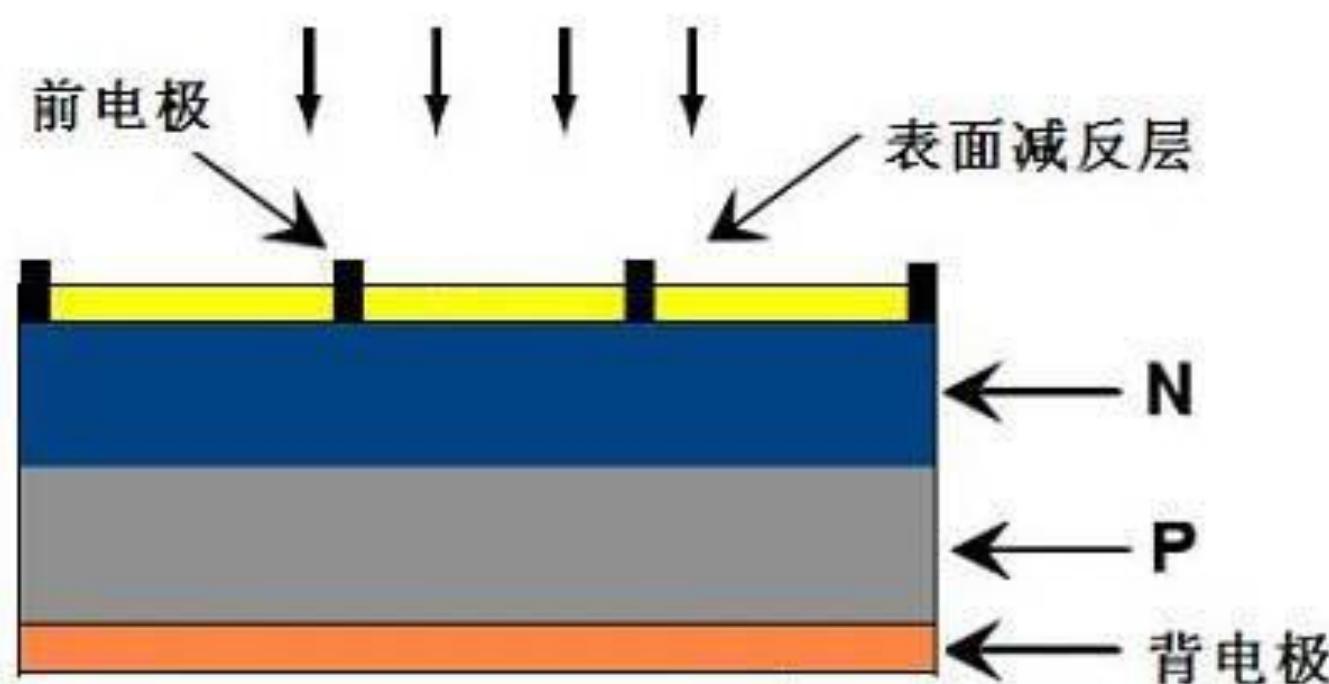
- ◆ 最终的结果是：光生电子留在N区，而光生空穴留在P区，形成光生电场；
- ◆ 光生电场与内建电场方向相反；
- ◆ P型带正电，N型带负电，形成光生电动势，即光生伏特效应；
- ◆ 总结：形成原理与PN结相同，内电场导致浓度差，之后由于浓度扩散，扩散过程在内电场的作用下漂移。不漂移的被留下，产生电势。



二、半导体

晶硅太阳电池的结构

- ◆ 基体材料是薄片P型单晶硅
- ◆ 上层为N型的顶区
- ◆ 电池顶区引出的电极是上电极，一般为铝-银材料
- ◆ 由电池底部引出的电极为下电极，一般采用镍-锡
- ◆ 为减少入射光的损失，上表面还覆盖二氧化硅构成的减反膜



二、半导体

晶硅太阳电池的结构

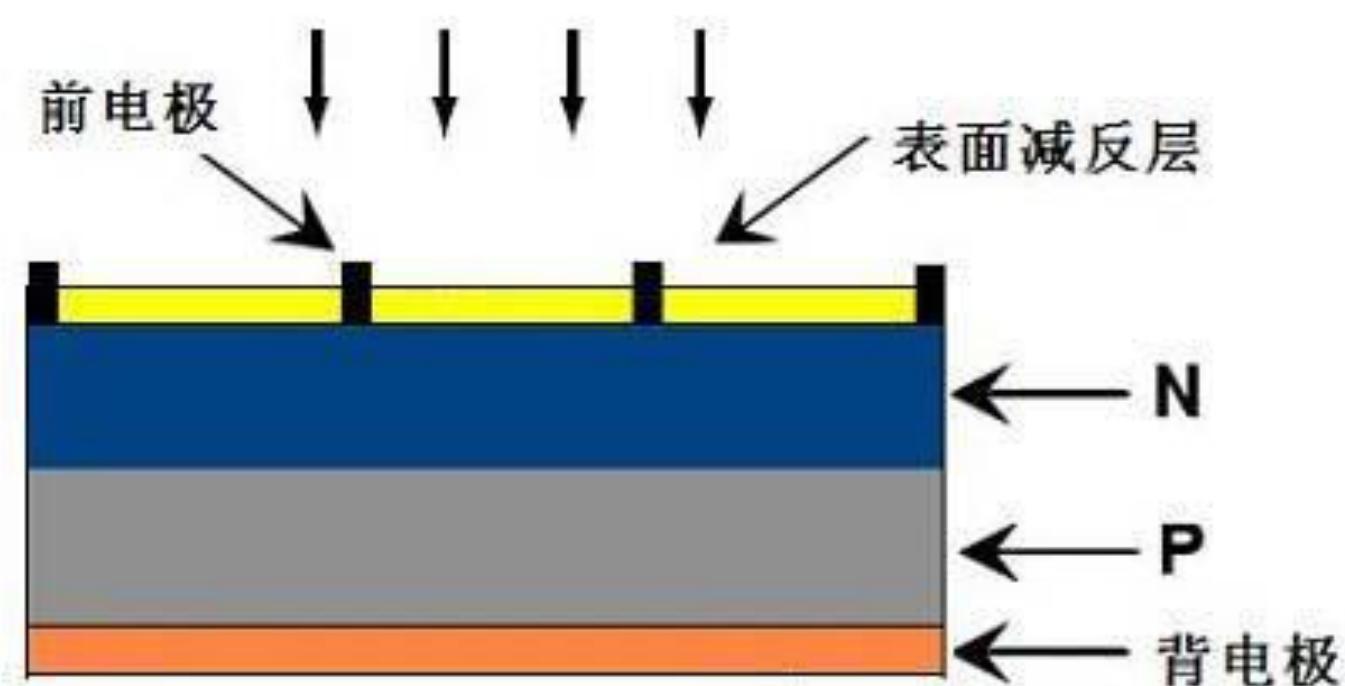
- ◆一般结构为P⁺/N或N⁺/P型结构。

其中上标的“+”表示太阳电池**正面光照半导体**材料的导电类型

- ◆第二个符号表示背面膜底的半导体

材料

- ◆太阳光照时，输出电压特性为P型侧电极为正，N型侧电极为负

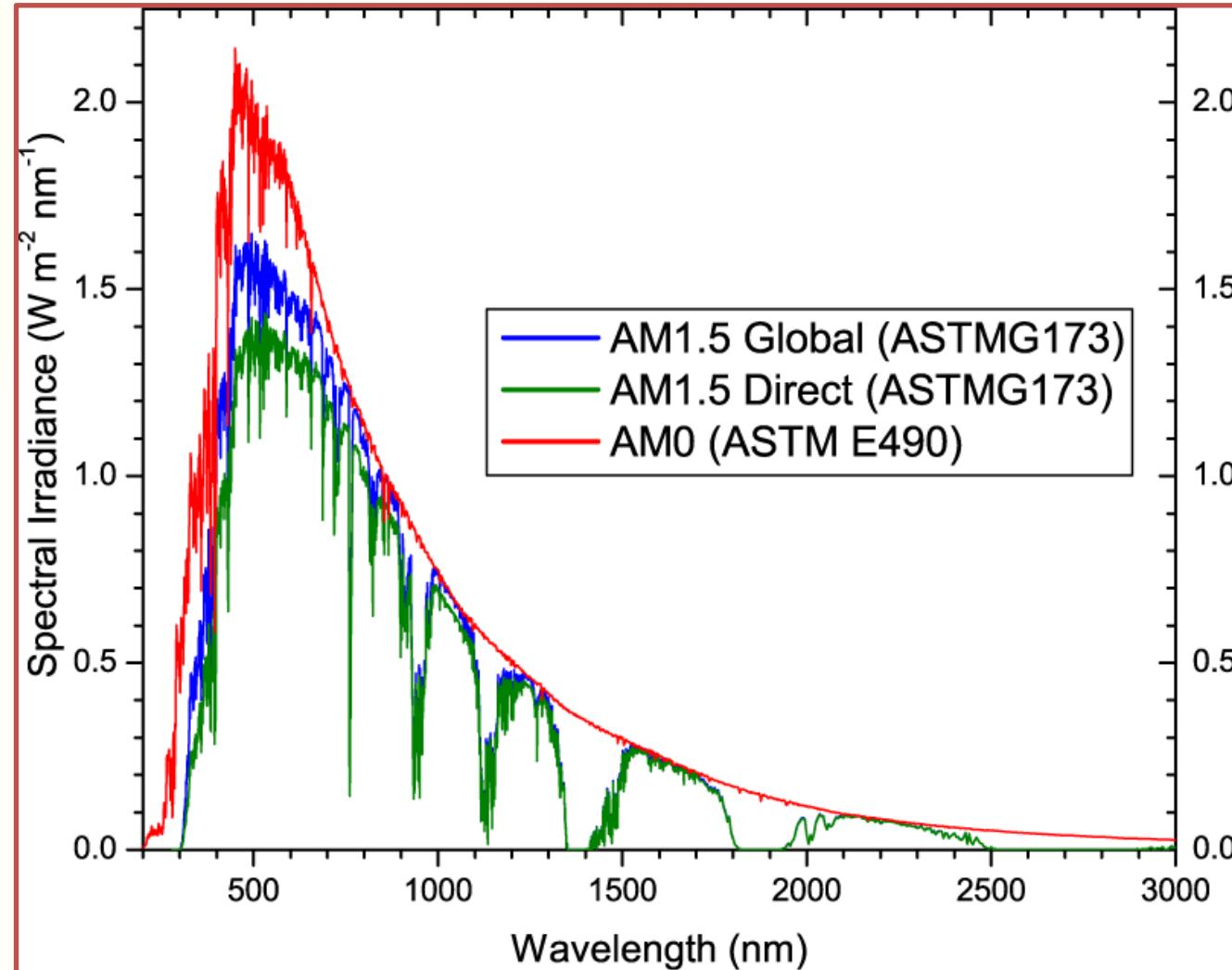


三、太阳能电池的电学特性

➤ 标准测试条件

太阳电池受到光照时产生的电能与
光源辐照度、温度和照射光的光谱分布有关，因此必须规定**标准测试条件**

- ◆ 光源辐照度：**1000W/m²**
- ◆ 测试温度：**25 °C**
- ◆ **AM1.5 地面太阳光谱辐照度分布**

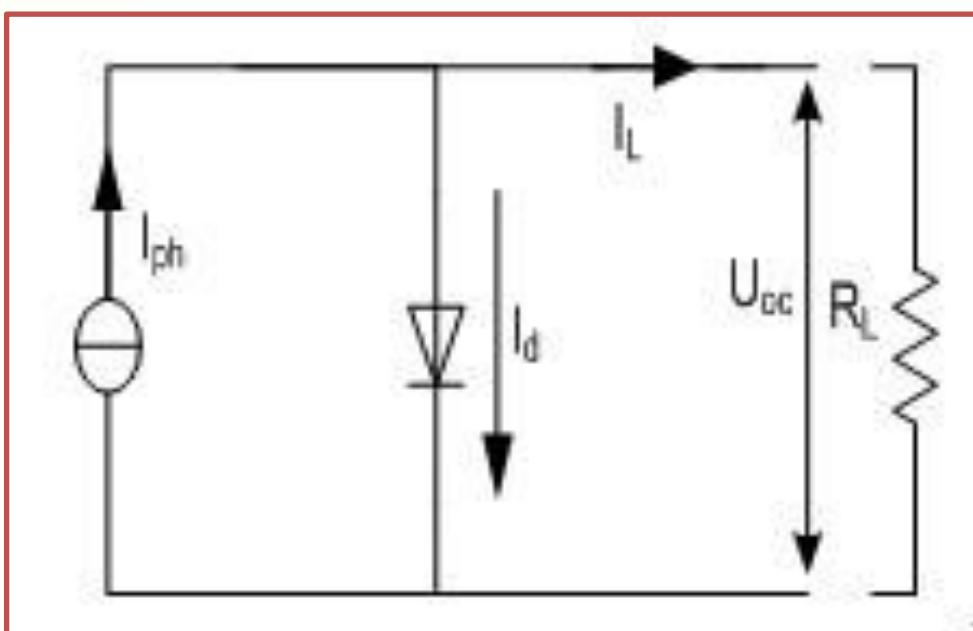


三、太阳能电池的电学特性

➤ 太阳电池等效电路

- ◆ 太阳电池受光照射时，可以看做是产生光生电流的**恒流源**；
- ◆ 并联一个正偏置下的二极管（即P-N结），二极管的漏电流称为**暗电流**，与光生电流方向**相反**，其表达式为：

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qU}{(AKT)}} - 1 \right)$$



三、太阳能电池的电学特性

➤ 太阳电池理想等效电路

流过负载两端的电流为：

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qU}{(A\text{KT})}} - 1 \right)$$

I_{ph} 光生电流

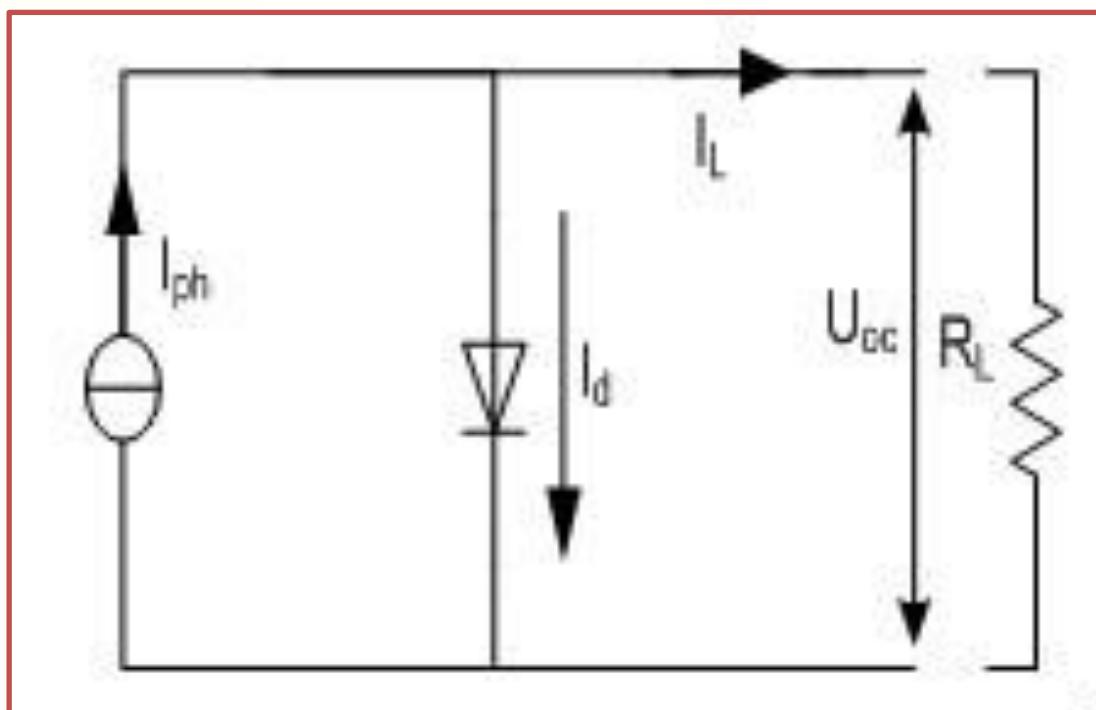
I_0 反向饱和电流

U 等效二极管的端电压

q 电子电量 (1.6×10^{-19} C)

T 绝对温度

A 二极管曲线因子，取值在1-2之间





三、太阳能电池的电学特性

➤ 太阳电池实际等效电路

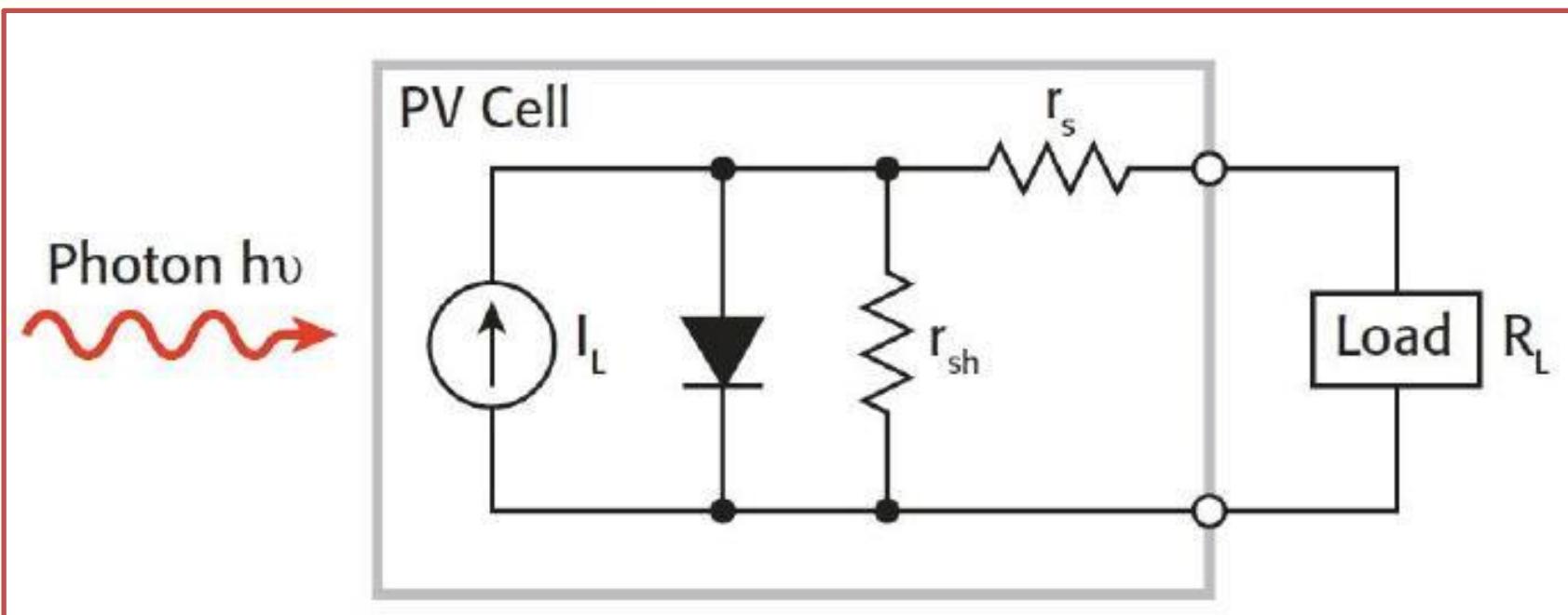
- ◆ 实际上太阳电池本身存在电阻，一类是**串联电阻**，一类是**并联电阻**（也称**旁路电阻**）。
- ◆ **串联电阻**是由于半导体材料的体电阻、金属电极与半导体材料的接触电阻、扩散层横向电阻以及金属电极本身的电阻**四部分组成**；**其中扩散层横向电阻是串联电阻的主要形式。通常小于1欧姆。**
- ◆ **并联电阻**是由于电池表面污染、半导体晶体缺陷引起的边缘漏电或耗尽区的复合电流等原因引起的。**一般为几千欧。**

三、太阳能电池的电学特性

➤ 太阳电池实际等效电路

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qU}{(AKT)}} - 1 \right) - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}$$

**串联电阻越小，
旁路电阻越大，
越接近于理想的光伏
电池**

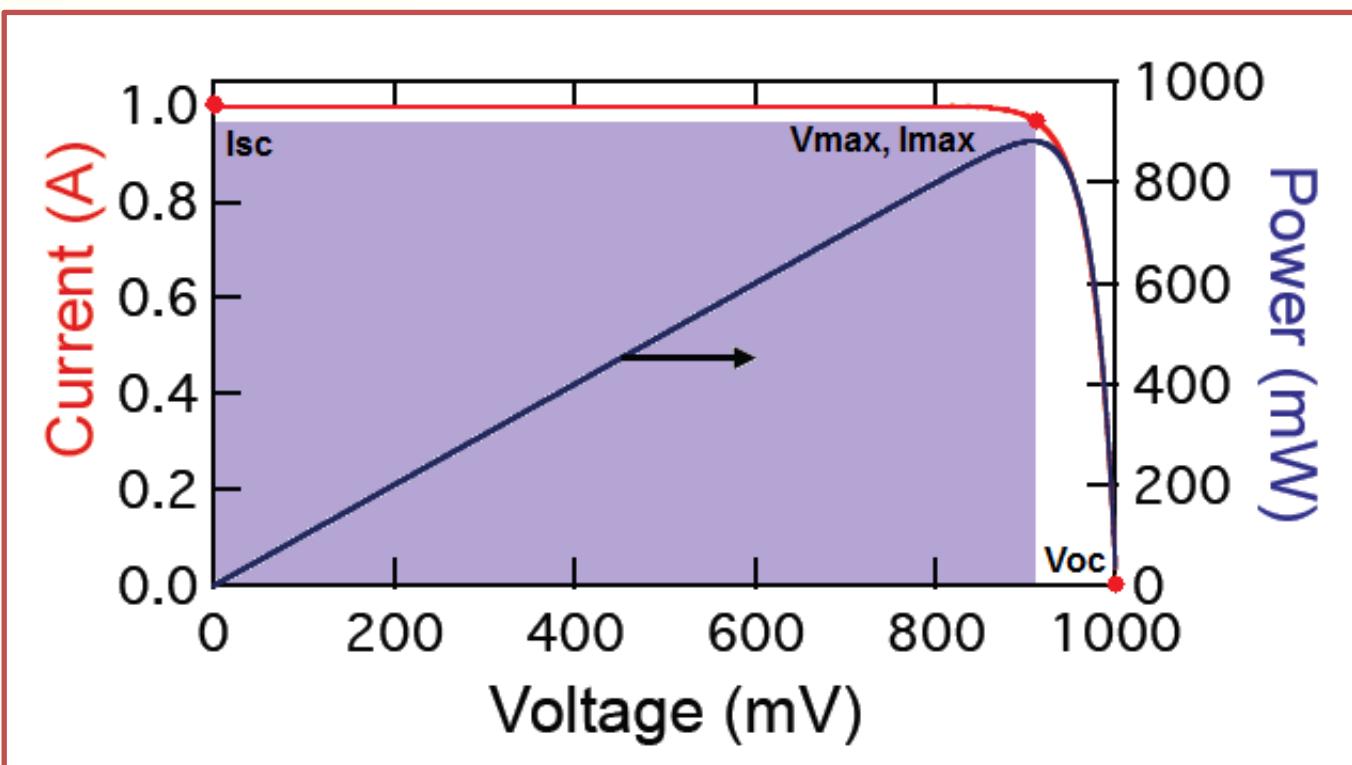


三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 伏安特性曲线 (I-V曲线)

当负载R从0变到无穷大时，负载R两端的电压和流过的电流之间的关系曲线，习惯称为I-V曲线

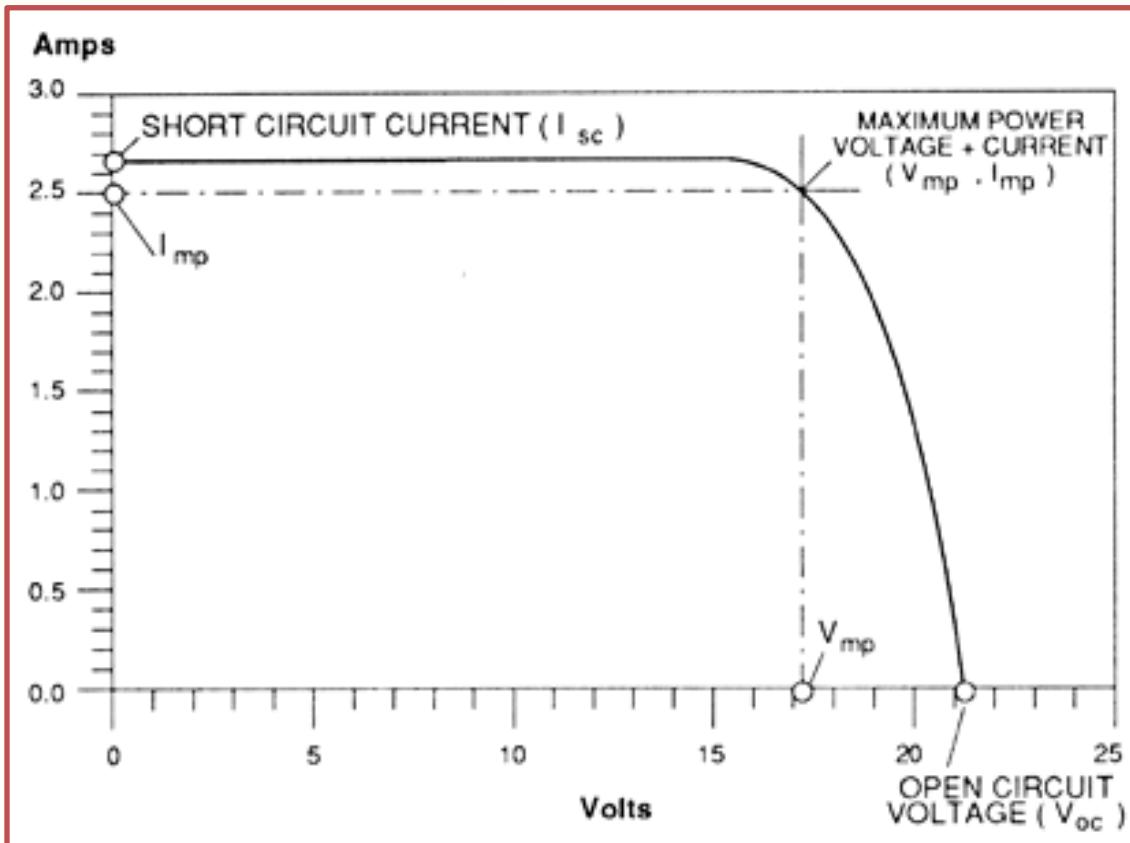
一般通过**实验测试方法**得到，纵坐标表示电流，横坐标表示电压。



三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 最大功率点

- ◆ I-V曲线上任意一点都是工作点，工作点和原点的连线称为负载线，负载线斜率的倒数即为负载 R 的值。
- ◆ 调节负载 R 的值到 R_m 时，对应的工作电流 I_m 和工作电压 U_m 的乘积最大，则M点称为**最佳功率点**





三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 最大功率点

在最大功率点，功率对电压的斜率为0，即：

$$\left(1 + \frac{qU_m}{AkT}\right) e^{\frac{qU_m}{AkT}} = \frac{I_{ph}}{I_0} + 1$$

整理后可得：

$$I_m = \frac{(I_{ph} + I_0) q U_m / AkT}{1 + q U_m / AkT}$$

$$U_m = \frac{AkT}{q} \ln \left[\frac{1 + (I_{ph} / I_0)}{1 + q U_m / AkT} \right] \approx U_{oc} - \frac{AkT}{q} \ln \left(1 + \frac{q U_m}{AkT} \right)$$



三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 最大功率点

$$P_m = I_m U_m \approx I_{ph} \left[U_{oc} - \frac{AkT}{q} \ln \left(1 + \frac{qU_m}{AkT} \right) - \frac{AkT}{q} \right]$$

- ◆ 通常光伏电池所标明的**功率**是指在**标准测试条件下最大功率点所对应的功率**。
- ◆ 实际使用时，并不是在标准的测试条件下，而且一般也不符合最佳负载的条件，同时一天中太阳辐照强度和温度也不断发生变化，所以能达到额定输出功率的时间很少。采用**“最大功率点”追踪**，可在一定程度上增加电能输出。



三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 开路电压

太阳电池在**负载无穷大**，即开路时的端电压，即I-V曲线与**横坐标的交点**，通常用 V_{oc} 表示

$$V_{oc} = \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \approx \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right)$$

单个晶体硅光伏电池的**开路电压一般在0.6-0.65 V左右**；该值乘以逆变器一路输入组件的数量应小于逆变器最大直流电压 V_{max}



三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 短路电流

太阳电池在**短路情况**下的电流，即I-V曲线与**纵坐标的交点**，通常用 I_{sc} 表示

$$I_{sc} = I_{ph}$$

太阳电池的短路电流**与电池面积大小有关**，面积越大，短路电流越大。

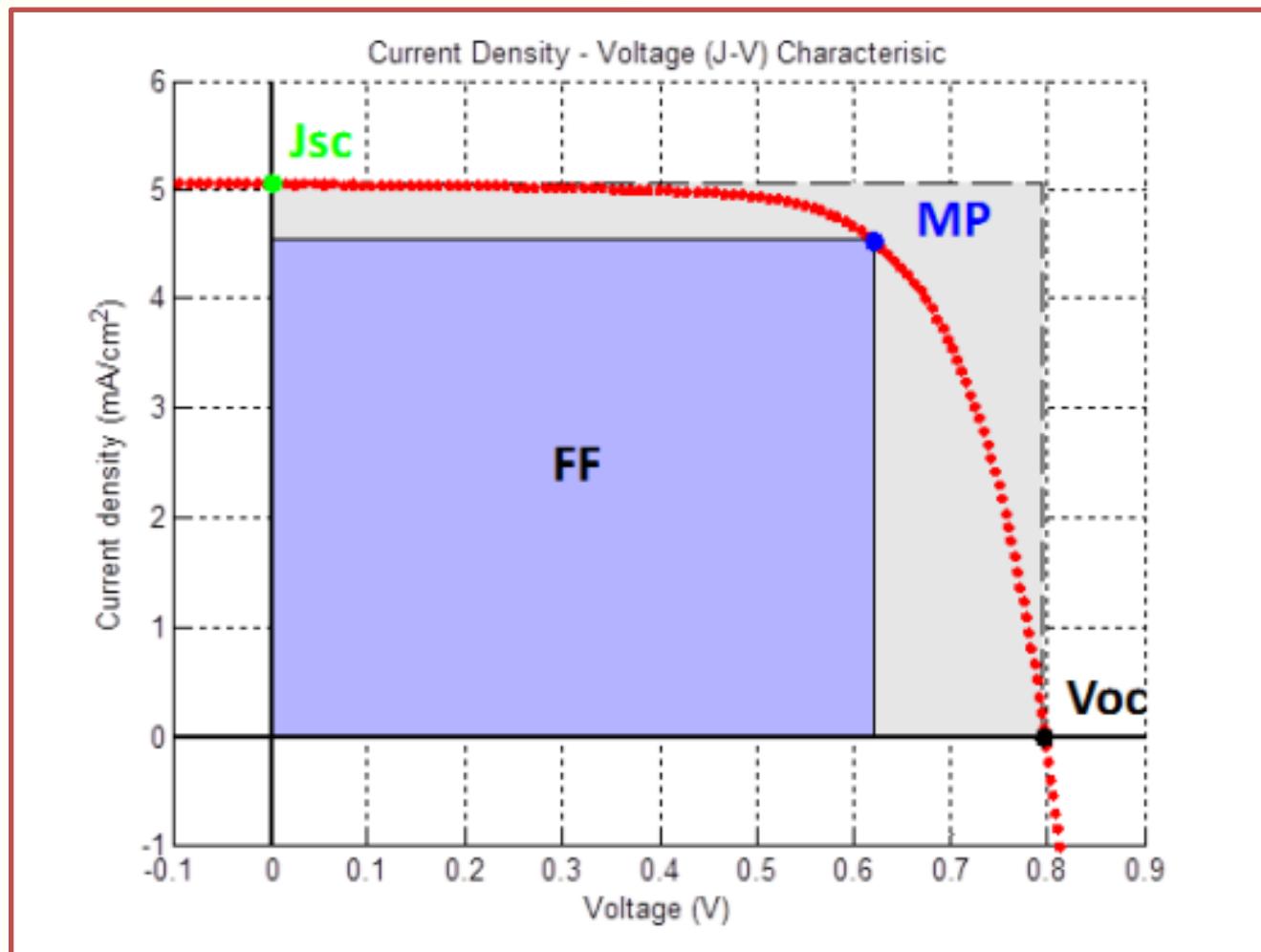
三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 填充因子

表征太阳电池性能优劣的重要参数，
 定义为**最大功率与开路电压和短路
 电流乘积的比值**，用FF表示：

$$FF = \frac{I_m U_m}{I_{sc} U_{oc}}$$

$$= 1 - \frac{AkT}{qU_{oc}} \ln \left(1 + \frac{qU_m}{AkT} \right) - \frac{AkT}{qU_{oc}}$$





三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 太阳电池的转换效率

太阳电池接受光照的**最大功率**与入射到该电池上的**全部辐射功率**的比值

$$\eta = \frac{U_m I_m}{A_t P_{in}}$$

A_t 包含栅线面积在内的太阳电池总面积

P_{in} 单位面积入射光的功率



三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 电流温度系数

温度变化时，太阳电池的输出电流会产生变化。在规定的实验条件下，温度每变化 1°C ，**短路电流**的变化值，用 α 表示

$$I_{sc} = I_0 (1 + \alpha \Delta T)$$

对于一般的晶体硅电池，电流温度系数：

$$\alpha = + (0.06 \sim 0.1) \% / K$$

温度升高，短路电流会**略有上升**。



三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 电压温度系数

温度变化时，太阳电池的输出电压会产生变化。在规定的实验条件下，温度每变化 1°C ，电池**开路电压**的变化值，用 β 表示

$$U_{oc} = U_0 (1 + \beta \Delta T)$$

对于一般的晶体硅电池，电压温度系数：

$$\alpha = -(0.3 \sim 0.4)\% / K$$

温度升高，开路电压会略有**下降**。

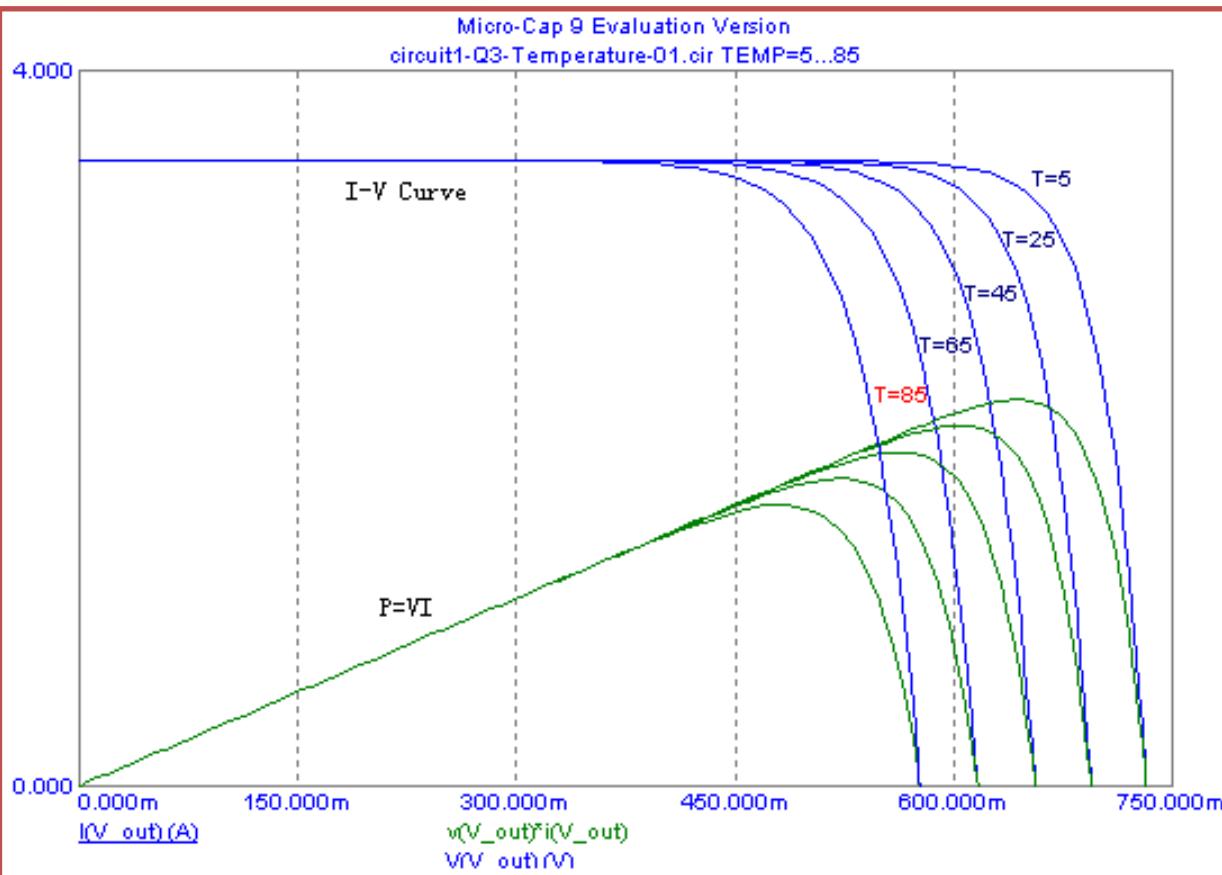
三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 功率温度系数

温度变化时，太阳电池的输出功率会产生变化。在规定的实验条件下，温度每变化 1°C ，电池输出功率的变化值，用 γ 表示

$$\begin{aligned} P_{\max} &= P_0 [1 + (\alpha + \beta) \Delta T] \\ &= P_0 (1 + \gamma \Delta T) \end{aligned}$$

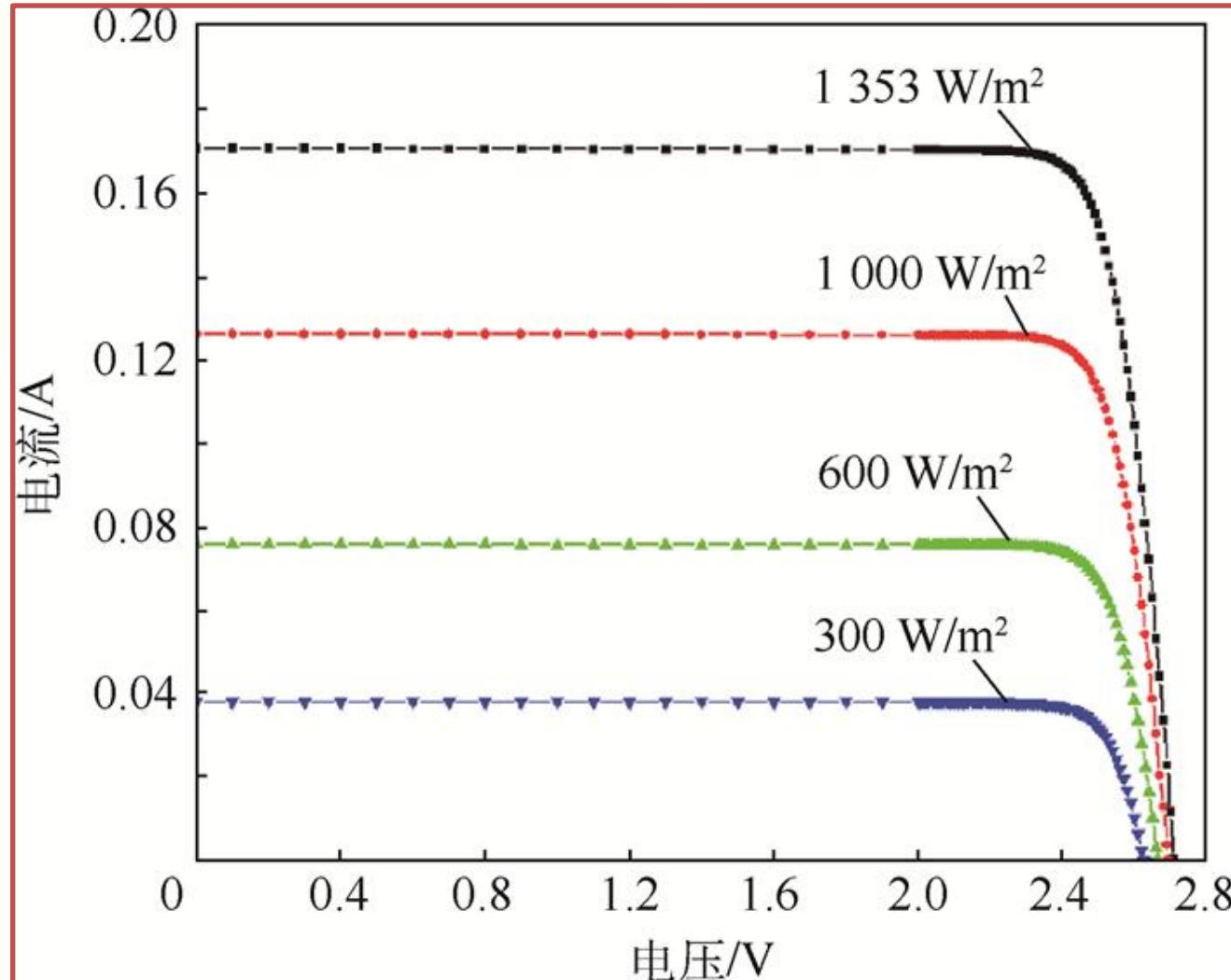
光伏电池发电功率随温度增大而减小。



三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 太阳辐照度的影响

- ◆ 光伏电池的开路电压与入射光谱辐射强度的大小有关。辐照弱时，开路电压与辐照强度呈近似线性变化；辐照强时，呈对数关系变化；
- ◆ 即：辐照从小到大变化时，开路电压，**开始上升较快，辐照较强时，上升速度会变小。**

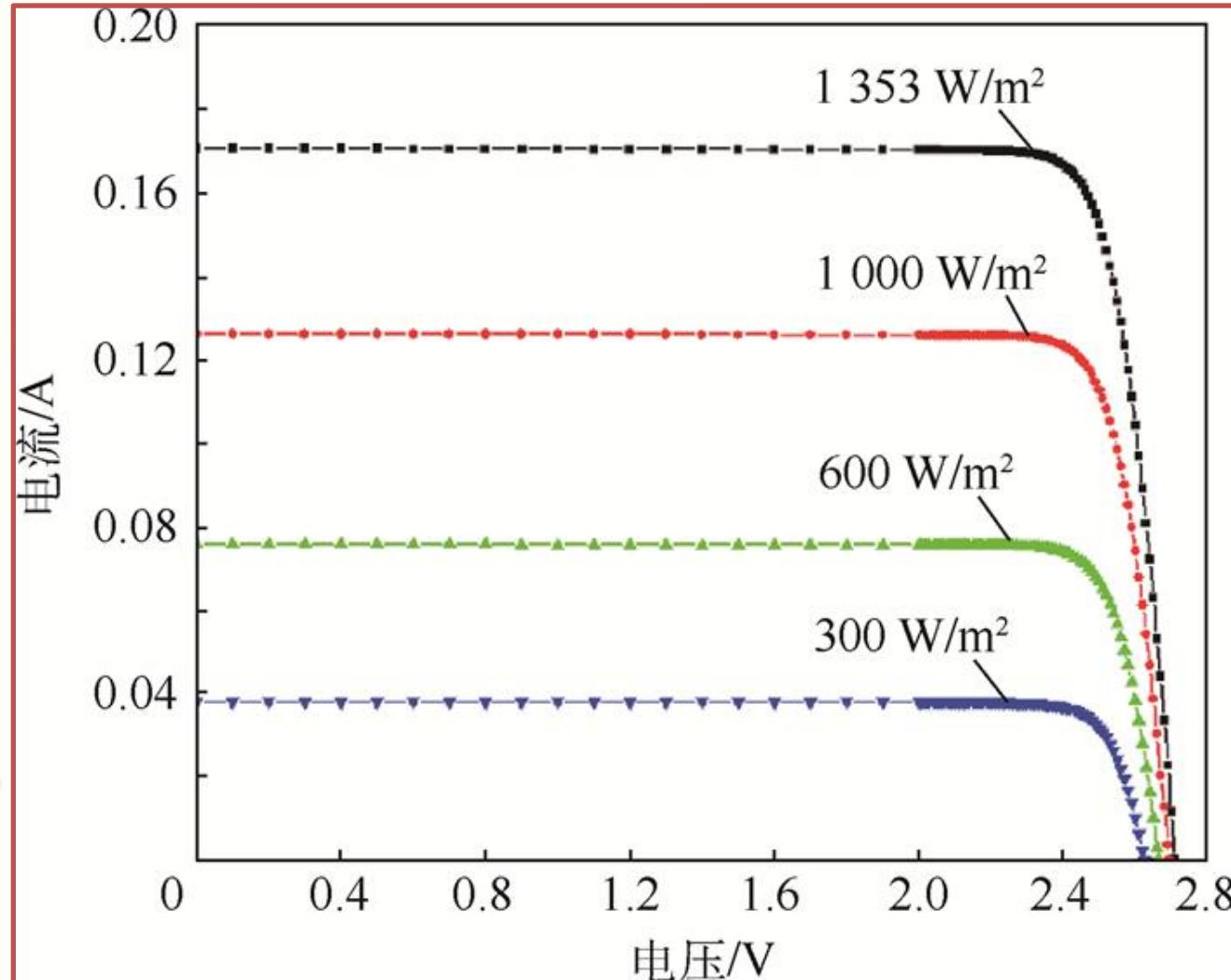


三、太阳能电池的主要技术参数

➤ 太阳辐照度的影响

◆ 光伏电池的短路电流与入射光谱辐射强度**呈正比**的关系。即：当入射辐照强度成倍增加时，短路电流也成倍增加。

辐照增加时，最佳功率点所对应的电压变化较小，但是电流变化较大。





太阳能利用技术



工程热物理