

第三章 太阳能电池的基本原理

本章以单晶硅pn结太阳能电池为例，
介绍半导体太阳能电池的基本工作原理、
结构及其特性分析。

一、太阳能电池的结构和基本工作原理

下图示意地画出了单晶硅pn结太阳能电池的结构，其包含上部电极，无反射薄膜覆盖层，n型半导体，p型半导体以及下部电极和基板。

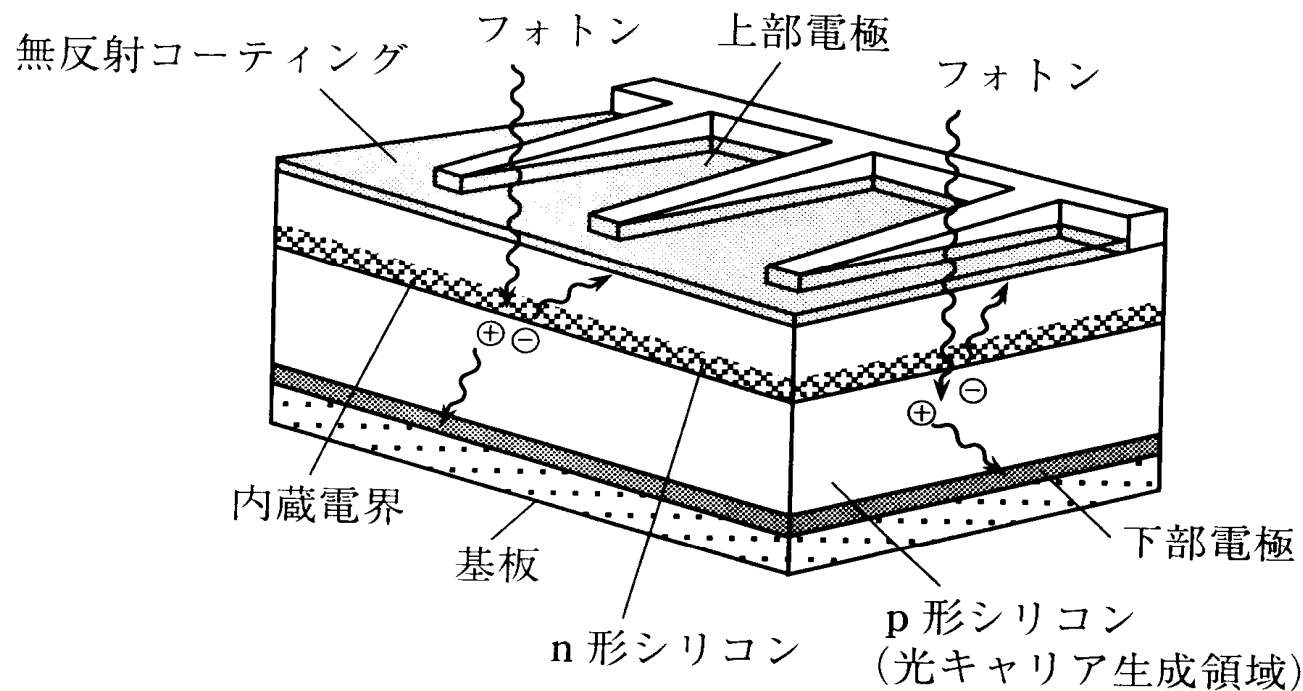
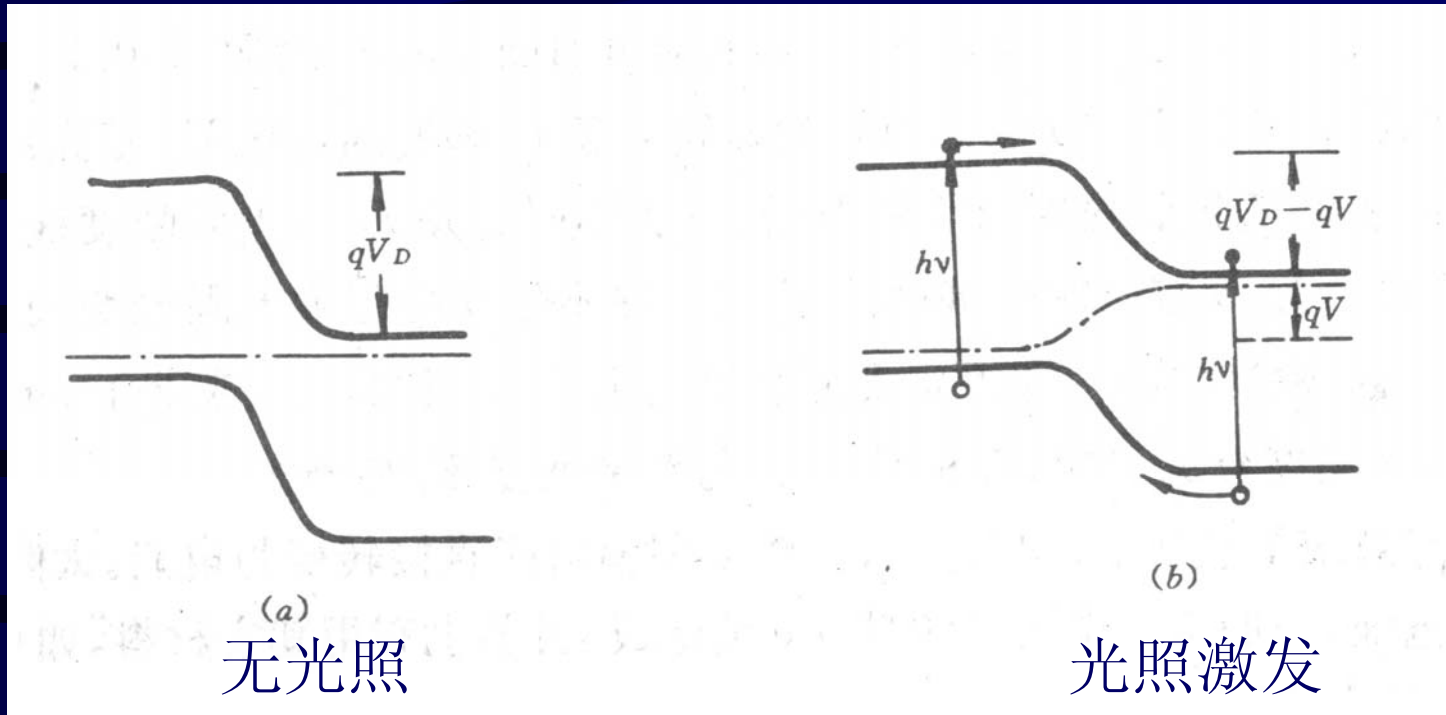


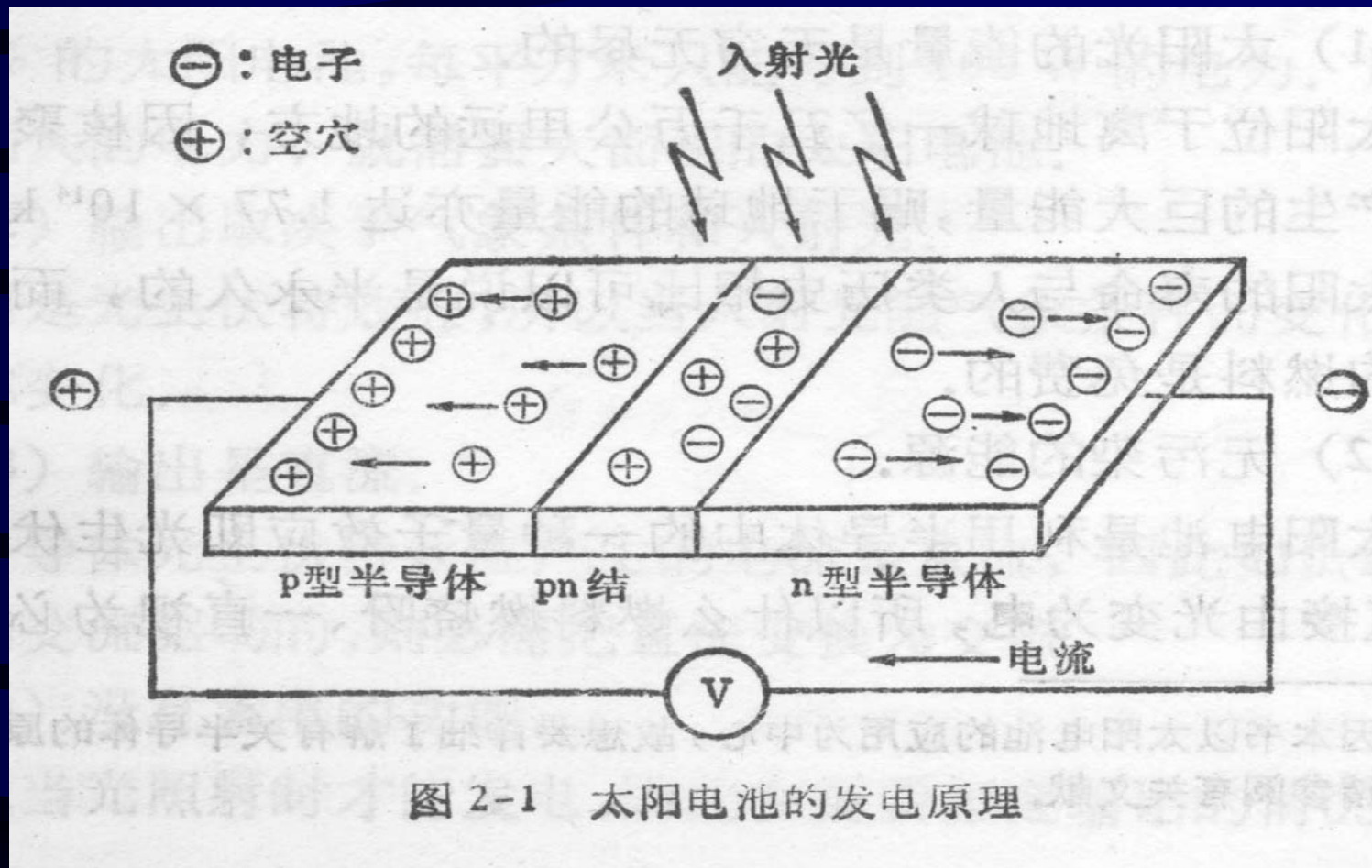
図 2.5 結晶シリコン太陽電池の構成。太陽電池はいわば大面積のpnダイオードであり，その接合界面には強い内蔵電界が存在する。表面の無反射コーティングは，光エネルギーを効率よく半導体に導くための層である。光は，薄い表面のn形層を通過して，接合とp形層に達し，電子-正孔対を生成する。これが電流となる。

当有适当波长的光照射到这个pn结太阳能电池上后，由于光伏效应而在势垒区两边产生了电动势。因而光伏效应是半导体电池实现光电转换的理论基础，也是某些光电器件赖以工作的最重要的物理效应。因此，我们将来仔细分析一下pn结的光伏效应。

设入射光垂直pn结面。如果结较浅，光子将进入pn结区，甚至更深入到半导体内部。能量大于禁带宽度的光子，由本征吸收在结的两边产生电子-空穴对。在光激发下多数载流子浓度一般改变较小，而少数载流子浓度却变化很大，因此应主要研究光生少数载流子的运动。



由于pn结势垒区内存在较强的内建电场（自n区指向p区），结两边的光生少数载流子受该场的作用，各自向相反方向运动：p区的电子穿过p-n结进入n区；n区的空穴进入p区，使p端电势升高，n端电势降低，于是在p-n结两端形成了光生电动势，这就是p-n结的光生伏特效应。由于光照在p-n结两端产生光生电动势，相当于在p-n结两端加正向电压 V ，使势垒降低为 $qV_D - qV$ ，产生正向电流 I_F 。

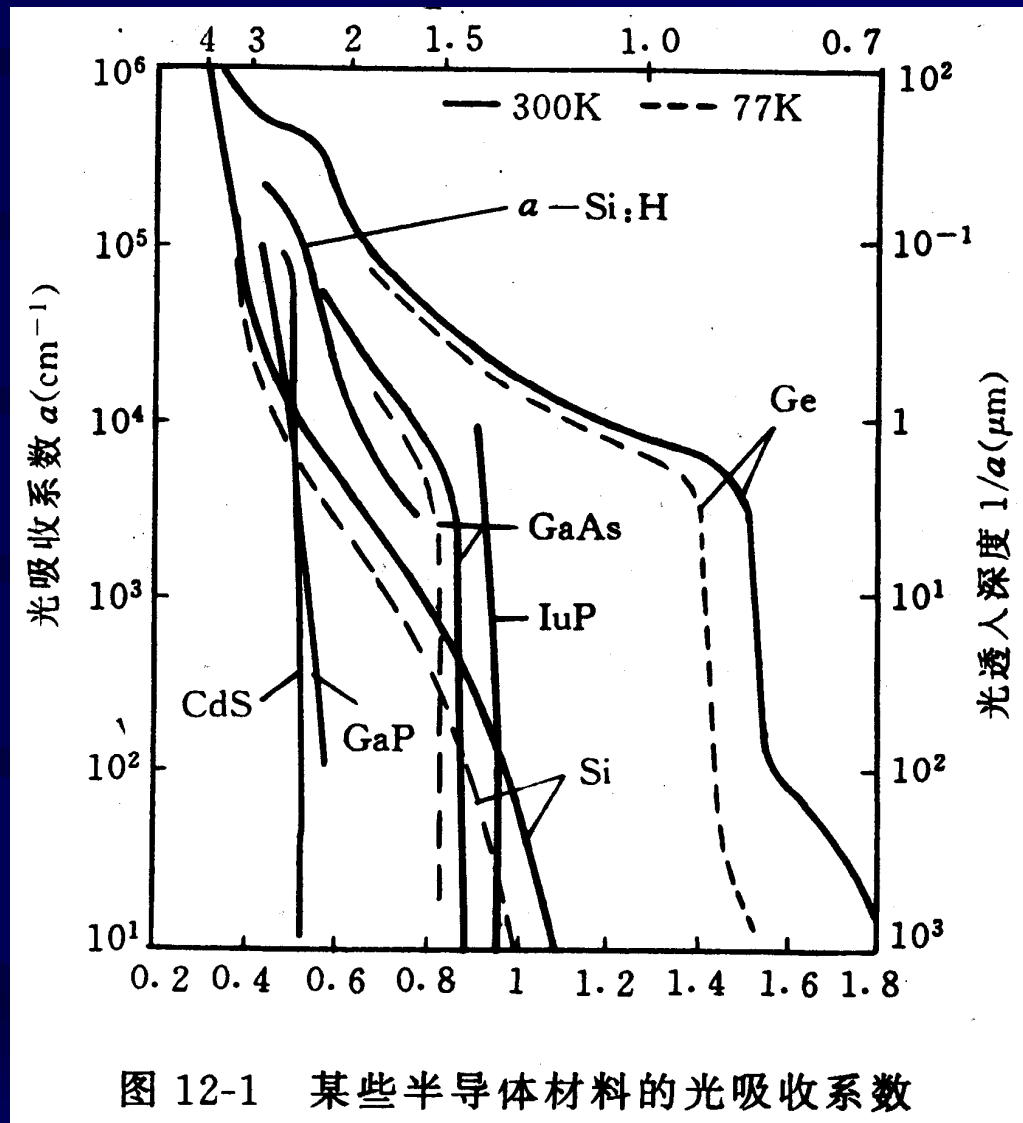


在pn结开路的情况下，光生电流和正向电流相等时，p-n结两端建立起稳定的电势差 V_{oc} ，（p区相对于n区是正的），这就是光电池的开路电压。如将pn结与外电路接通，只要光照不停止，就会有源源不断的电流通过电路，p-n结起了电源的作用。这就是光电池的基本原理。

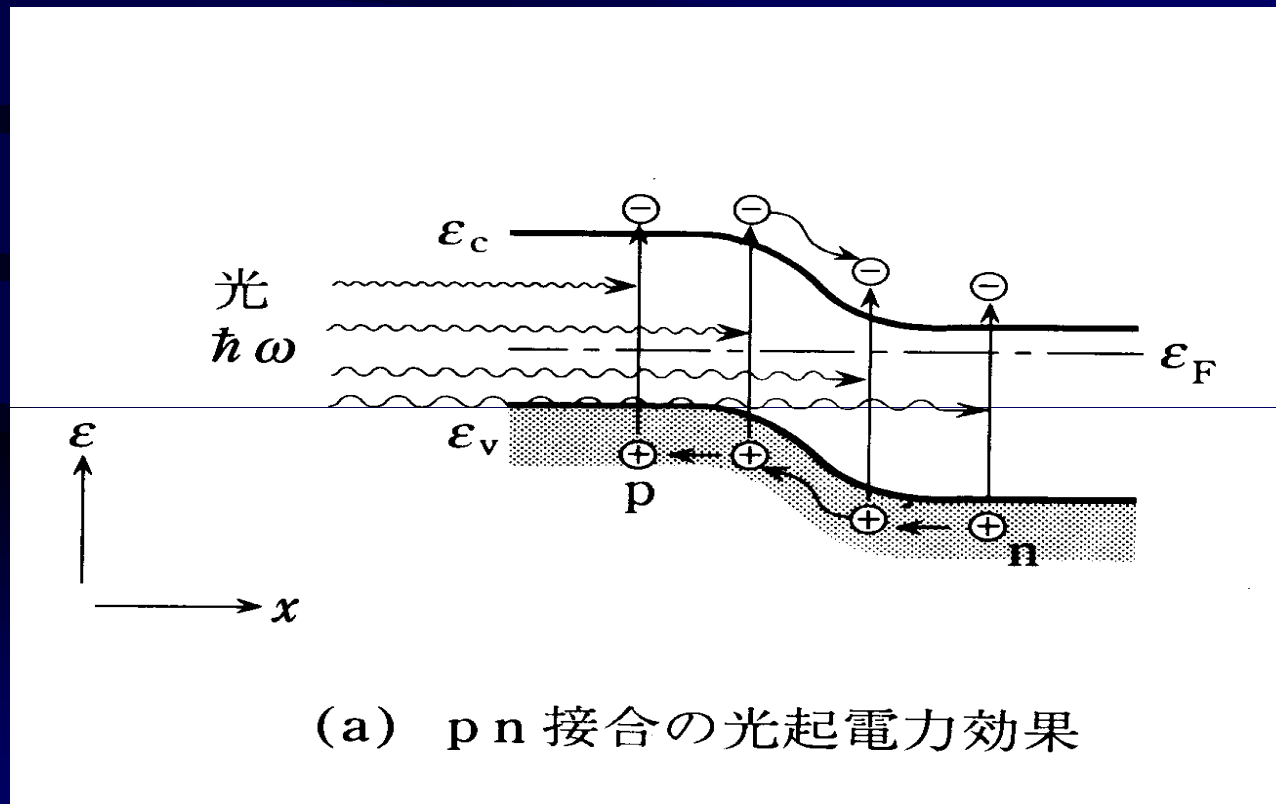
由上面分析可以看出，为使半导体光电器件能产生光生电动势（或光生积累电荷），它们应该满足以下两个条件：

- 1、半导体材料对一定波长的入射光有足够大的光吸收系数 α ，即要求入射光子的能量 $h\nu$ 大于或等于半导体材料的带隙 E_g ，使该入射光子能被半导体吸收而激发出光生非平衡的电子空穴对。

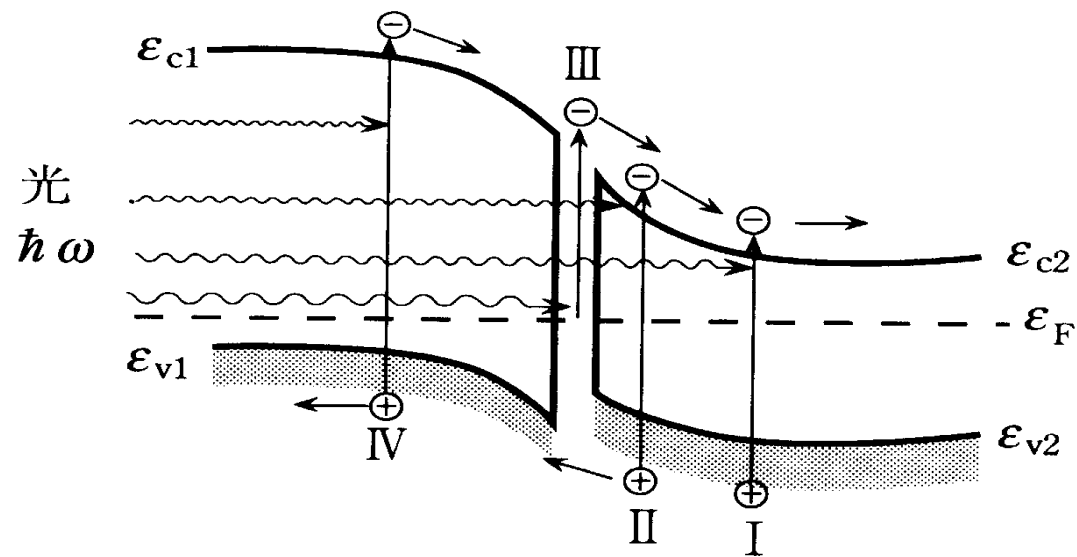
右图是一些材料的吸收曲线。可以发现GaAs和非晶硅的吸收系数比单晶硅大得多，透入深度只有 $1\mu\text{m}$ 左右，即几乎全部吸收入射光。所以这两种电池都可以做成薄膜，节省材料。而硅太阳能电池，对太阳光谱中长波长的光，要求较厚的硅片（约 $100\text{--}300\ \mu\text{m}$ ）才能充分吸收；对于短波长的光，只在入射表面附近 $1\ \mu\text{m}$ 区域内就已充分吸收了。



2、具有光伏结构，即有一个内建电场所对应的势垒区。势垒区的重要作用是分离了两种不同电荷的光生非平衡载流子，在p区内积累了非平衡空穴，而在n区内积累起非平衡电子。产生了一个与平衡pn结内建电场相反的光生电场，于是在p区和n区间建立了光生电动势（或称光生电压）。



除了上述pn结能产生光生伏特效应外，金属-半导体形成的肖特基势垒层等其它许多结构都能产生光生伏特效应。其电子过程和pn结相类似，都是使适当波长的光照射材料后在半导体的界面或表面产生光生载流子，在势垒区电场的作用下，光生电子和空穴向相反的方向漂移从而互相分离，在器件两端积累产生光生电压。



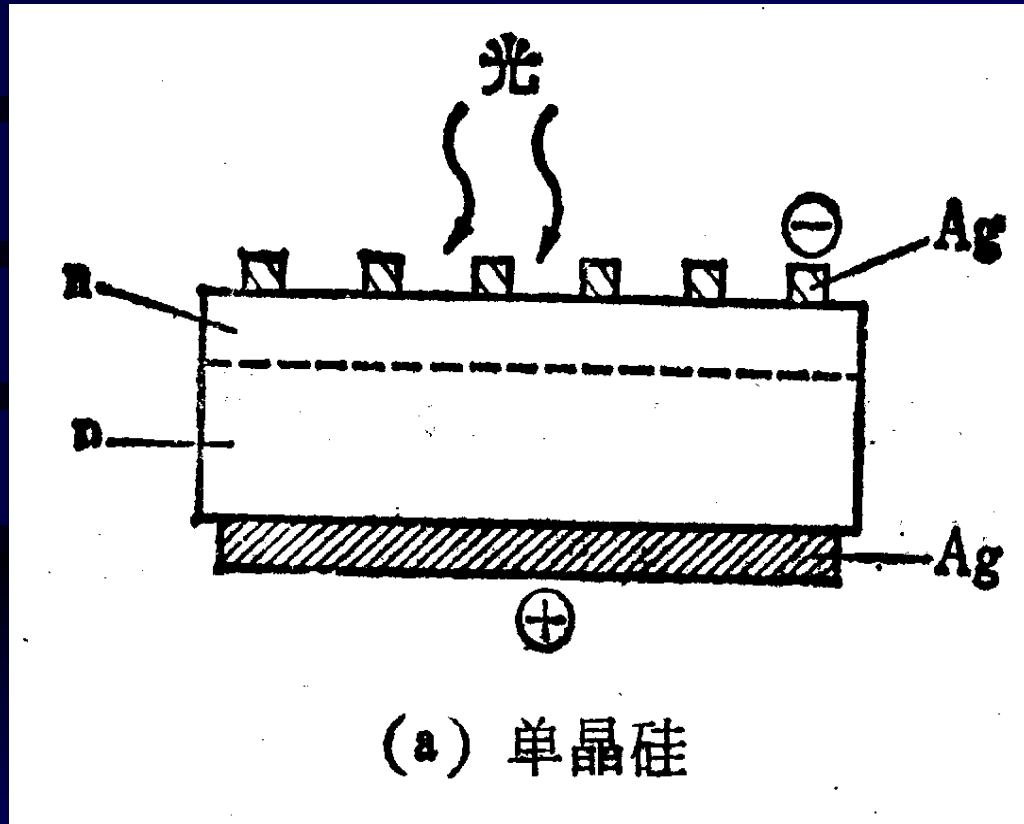
(b) ヘテロ接合の光起電力効果

通常的发电系统如火力发电，就是燃烧石油或煤以其燃烧能来加热水，使之变成蒸汽，推动发电机发电；原子能发电则是以核裂变放出的能量代替燃烧石油或煤，而水力发电则是利用水的落差能使发电机旋转而发电。

太阳能电池发电的原理是全新的，与传统方法是完全不同，既没有马达旋转部分，也不会排出气体，是清洁无污染的发电方式。

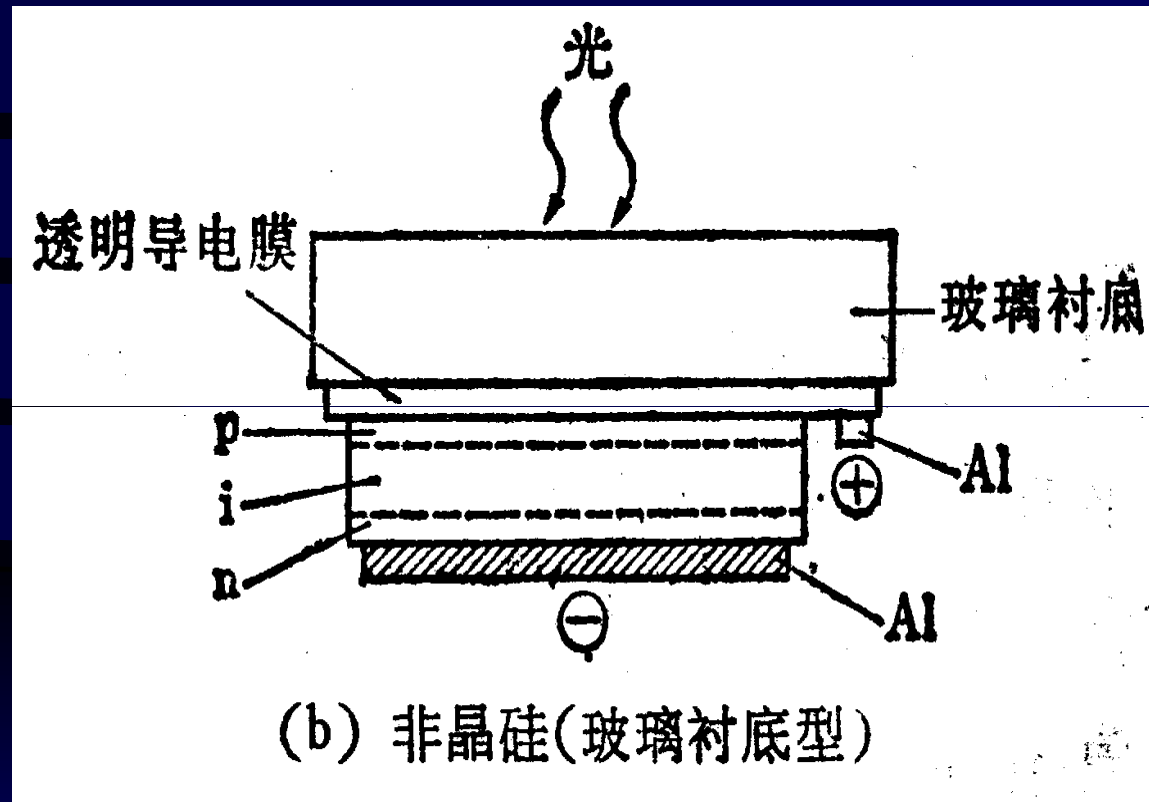
太阳能电池的结构

单晶硅太阳能电池的典型结构如图所示。



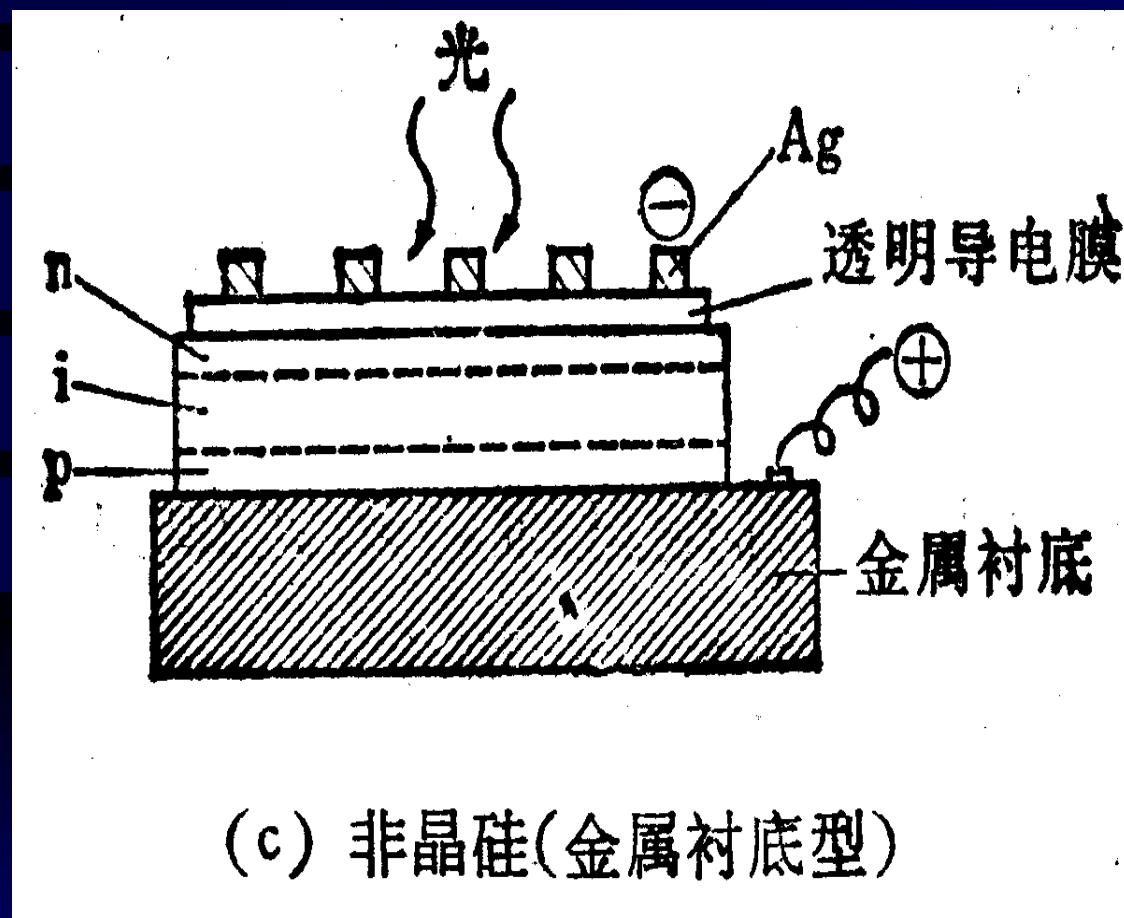
单晶硅太阳能电池通常是以p型Si为衬底，扩散n型杂质，形成如图(a)所示结构。为取出电流，p型衬底的整个下表面涂银并烧结，以形成银电极，接通两电极即能得到电流。

玻璃衬底非晶硅太阳能电池的典型结构如图所示。



玻璃衬底非晶硅太阳能电池是先先在玻璃衬底上淀积透明导电薄膜，然后依次用等离子体反应沉积p型、i型和n型三层a-Si，接着再蒸涂金属电极铝，电池电流从透明导电薄膜和电极铝引出。

不锈钢衬底非晶硅太阳能电池的典型结构如图所示。

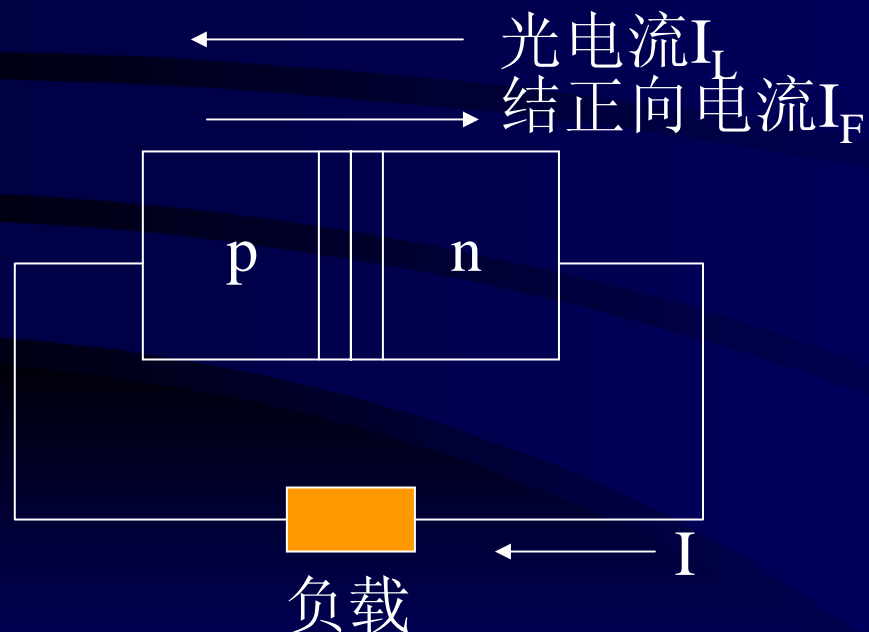


不锈钢衬底型太阳能电池是在不锈钢衬底上沉积pin非晶硅层，其上再沉积透明导电薄膜，最后与单晶硅电池一样制备梳状的银收集电极。电池电流从下面的不锈钢和上面的梳状电极引出。

二、太阳能电池的输出特性

1、光电池的电流电压特性

光电池工作时共有三股电流：光生电流 I_L ，在光生电压 V 作用下的pn结正向电流 I_F ，流经外电路的电流 I 。 I_L 和 I_F 都流经pn结内部，但方向相反。



根据p-n结整流方程，在正向偏压下，通过结的正向电流为：

$$I_F = I_s [\exp(qV/kT) - 1]$$

其中： V 是光生电压， I_s 是反向饱和电流。

设用一定强度的光照射光电池，因存在吸收，光强度随着光透入的深度按指数律下降。因而光生载流子产生率也随光照深入而减少，即产生率 Q 是 x 函数。为了简便起见，用 $\langle Q \rangle$ 表示在结的扩散长度 (L_p+L_n) 内非平衡载流子的平均产生率，并设扩散长度 L_p 内的空穴和 L_n 内的电子都能扩散到 p - n 结面而进入另一边，这样光生电流 I_L 应该是：

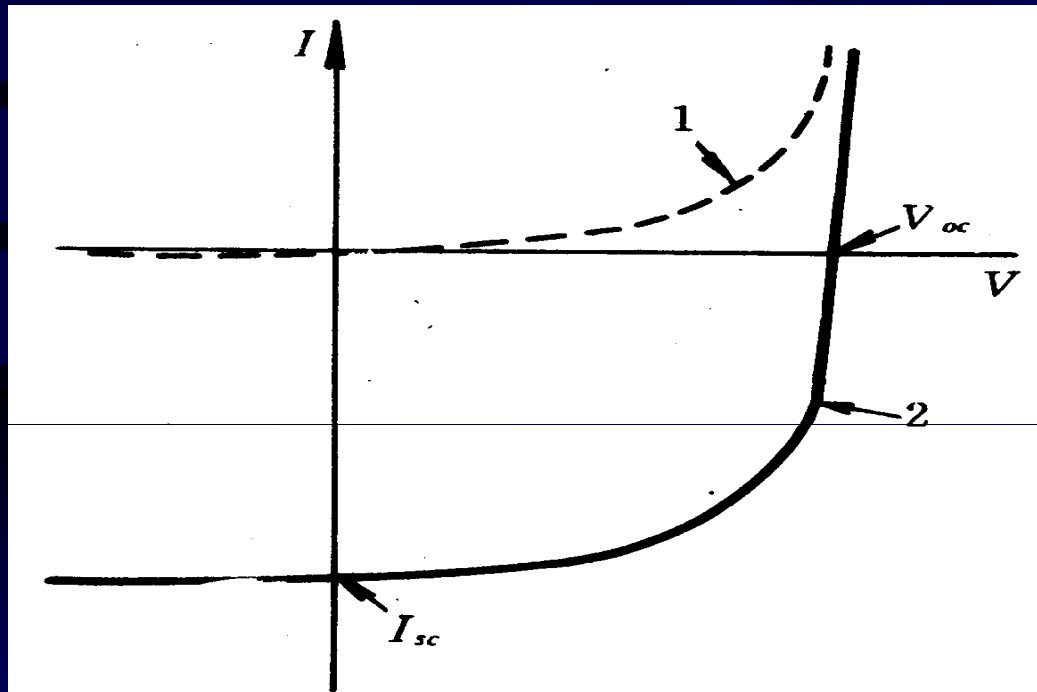
$$I_L = q\langle Q \rangle A(L_p+L_n)$$

其中： A 是 p - n 结面积， q 为电子电量。光生电流 I_L 从 n 区流向 p 区，与 I_F 反向。

如光电池与负载电阻接成通路，通过负载的电流应该是：

$$I = I_F - I_L = I_s [\exp(qV/kT) - 1] - I_L$$

这就是负载电阻上电流与电压的关系，也就是光电池的伏安特性方程。

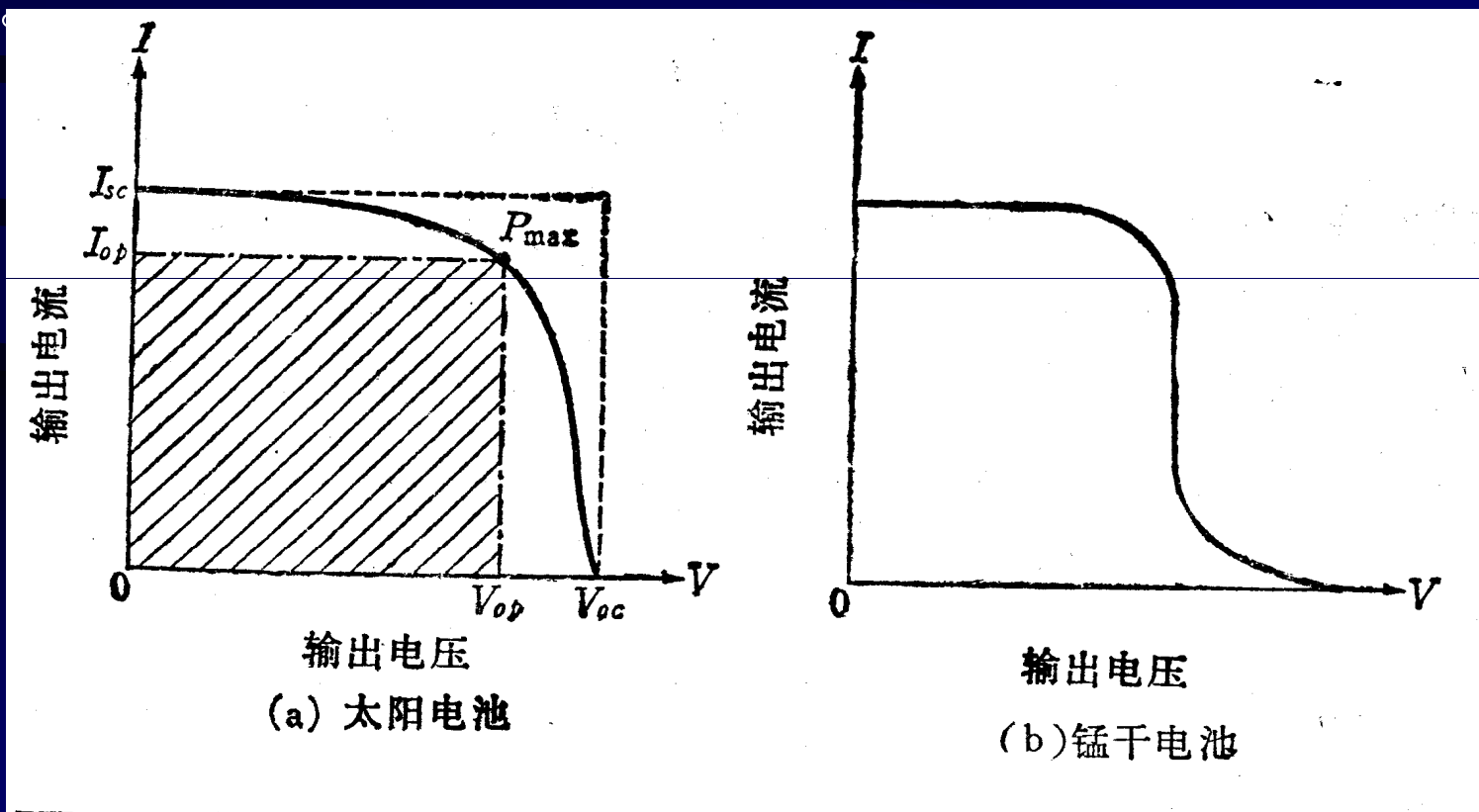


左图分别是无光照和有光照时的光电池的伏安特性曲线。

图 10-23 光电池的伏安特性

2、描述太阳能电池的参数

不论是一般的化学电池还是太阳能电池，其输出特性一般都是用如下图所示的电流—电压曲线来表示。由光电池的伏安特性曲线，可以得到描述太阳能电池的四个输出参数。



1、开路电压 V_{oc}

在p-n结开路情况下 ($R=\infty$)，此时pn结两端的电压即为开路电压 V_{oc} 。

这时， $I=0$ ，即： $I_L=I_F$ 。将 $I=0$ 代入光电池的电流电压方程，得开路电压为：

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right)$$

2、短路电流 I_{sc}

如将pn结短路 ($V=0$)，因而 $I_F=0$ ，这时所得的电流为短路电流 I_{sc} 。显然，短路电流等于光生电流，即：

$$I_{sc} = I_L$$

3、填充因子FF

在光电池的伏安特性曲线任一工作点上的输出功率等于该点所对应的矩形面积，其中只有一点是输出最大功率，称为最佳工作点，该点的电压和电流分别称为最佳工作电压 V_{op} 和最佳工作电流 I_{op} 。

填充因子定义为：
$$FF = \frac{V_{op} I_{op}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}}$$

它表示了最大输出功率点所对应的矩形面积在 V_{oc} 和 I_{sc} 所组成的矩形面积中所占的百分比。特性好的太阳能电池就是能获得较大功率输出的太阳能电池，也就是 V_{oc} ， I_{sc} 和FF乘积较大的电池。对于有合适效率的电池，该值应在0.70-0.85范围之内。

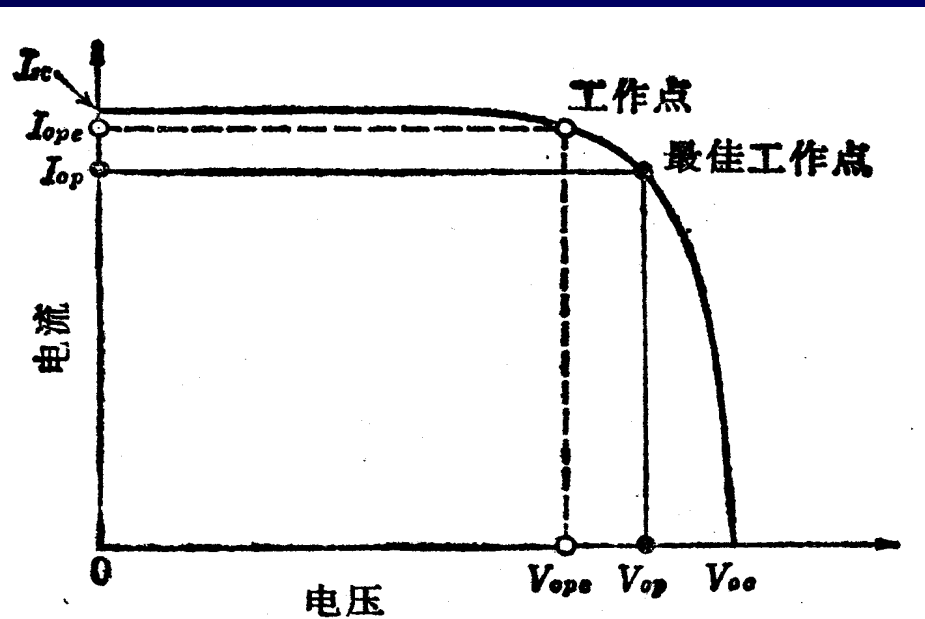


图 6-4 太阳能电池的 $I-V$ 特性和工作点

图中(●)表示最佳工作点，(○)表示实际工作点

4、太阳能电池的能量转化效率 η

表示入射的太阳光能量有多少能转换为有效的电能。

即：

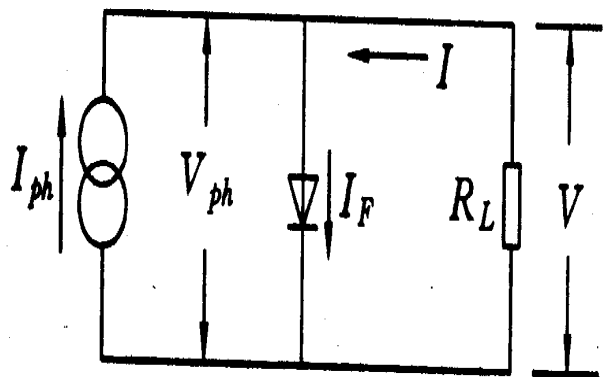
$$\begin{aligned}\eta &= (\text{太阳能电池的输出功率}/\text{入射的太阳光功率}) \times 100\% \\ &= (V_{op} \times I_{op} / P_{in} \times S) \times 100\% \\ &= \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in} \cdot S}\end{aligned}$$

其中 P_{in} 是入射光的能量密度， S 为太阳能电池的面积，当 S 是整个太阳能电池面积时， η 称为**实际转换效率**，当 S 是指电池中的有效发电面积时， η 叫**本征转换效率**。

三、太阳能电池的等效电路

等效电路是描述太阳能电池的最一般方法。

1、理想pn结太阳能电池的等效电路



12-4 理想 pn 结太阳电池的等效电路

理想pn结太阳能电池可以用一恒定电流源 I_{ph} （光生电流）及一理想二极管的并联来表示。其等效电路如左图所示。其电流电压关系满足我们上一节所介绍的方程。
$$I = I_F - I_L = I_s [\exp(qV/kT) - 1] - I_L$$

2、pn结太阳能电池的实际等效电路

实际上，pn结太阳能电池存在着 R_s 和 R_{sh} 的影响。其中， R_s 是由材料体电阻、薄层电阻、电极接触电阻及电极本身传导电流的电阻所构成的总串联电阻。 R_{sh} 是在pn结形成的不完全的部分所导致的漏电流，称为旁路电阻或漏电阻。这样构成的等效电路如右图所示。

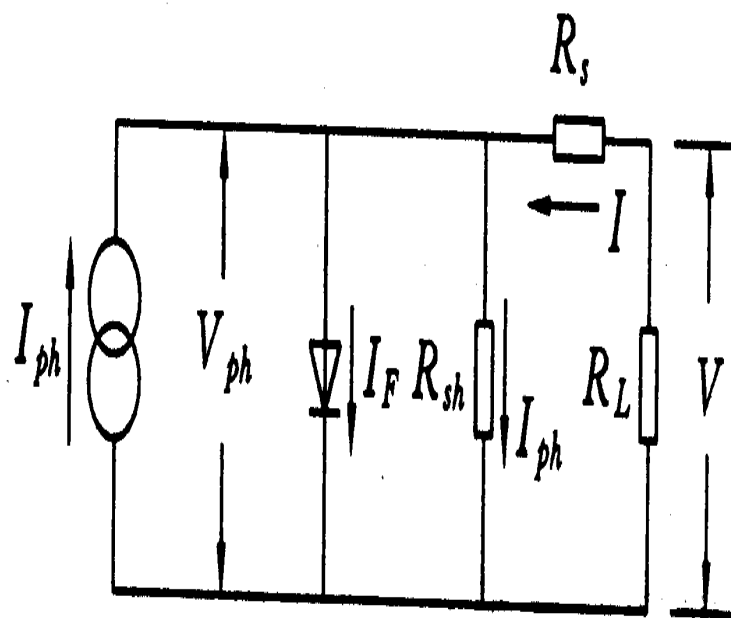


图 12-5 pn 结太阳能电池的实际等效电路

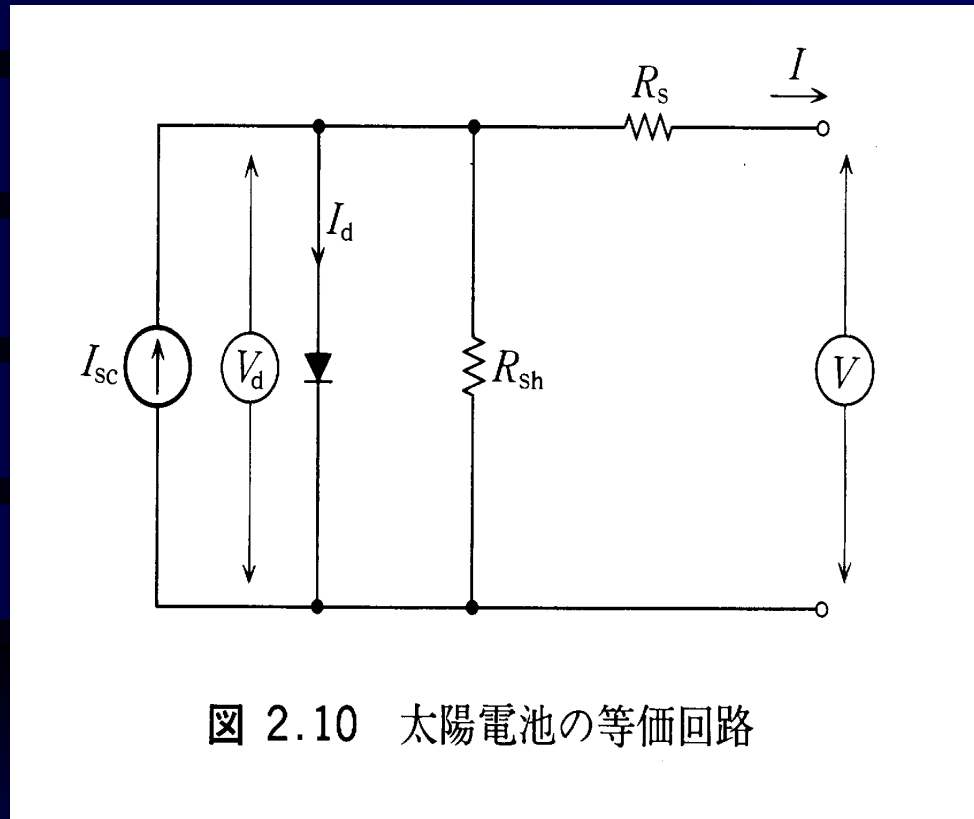
根据前面所示的等效电路，考虑到串联电阻 R_s 和旁路电阻 R_{sh} 的影响。可以得到通过负载的电流电压关系为：

$$I = I_L - I_s \{ \exp[q(V + IR_s)/kT] - 1 \} - (V + IR_s)/R_{sh}$$

上式是表示太阳能电池特性的一般公式，叫做超越方程式。

R_s 值变大会影响电池伏安特性曲线偏离理想曲线，使FF变小， I_{sc} 下降，因而效率也下降；而旁路电阻 R_{sh} 变小，说明无光照时pn结反向漏电流变大，造成 V_{oc} 下降，FF变小，因而效率下降。

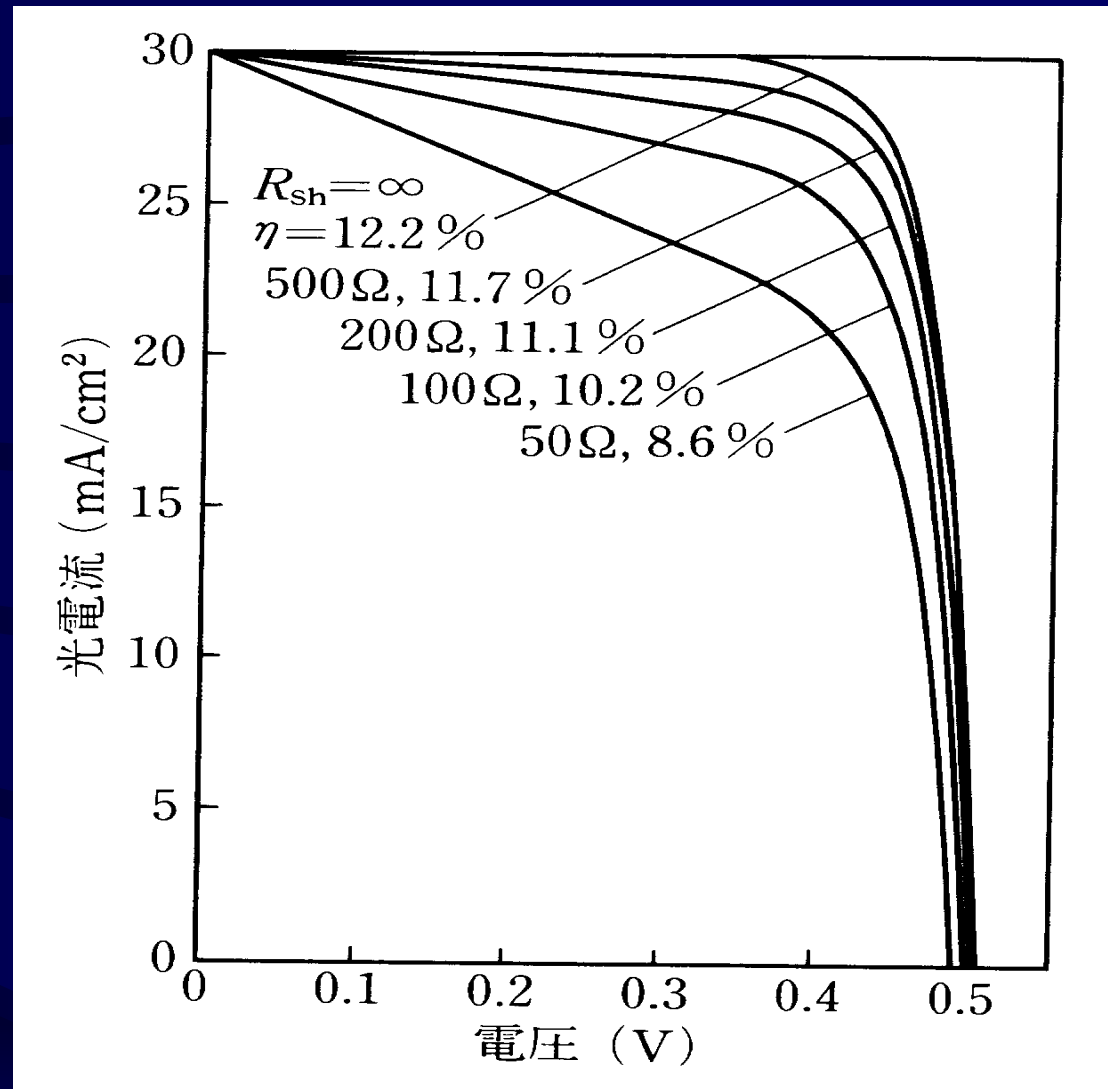
下面我们来分析一下串联电阻 R_s 和漏电电阻 R_{sh} 对光电池效率的影响。



根据图示的电路，对同一个太阳能电池，当入射光强度较弱时， I_L 较小，二极管电流和漏电流大小相差不多，此时， R_{sh} 的影响较大。

$$I = I_L - I_s [\exp(qV/kT) - 1] - V/R_{sh}$$

漏电电阻对光电池输出特性的影响可用右图表示。可以看出，漏电电阻 R_{sh} 对光电流的影响较小，而对开路电压的影响较大。

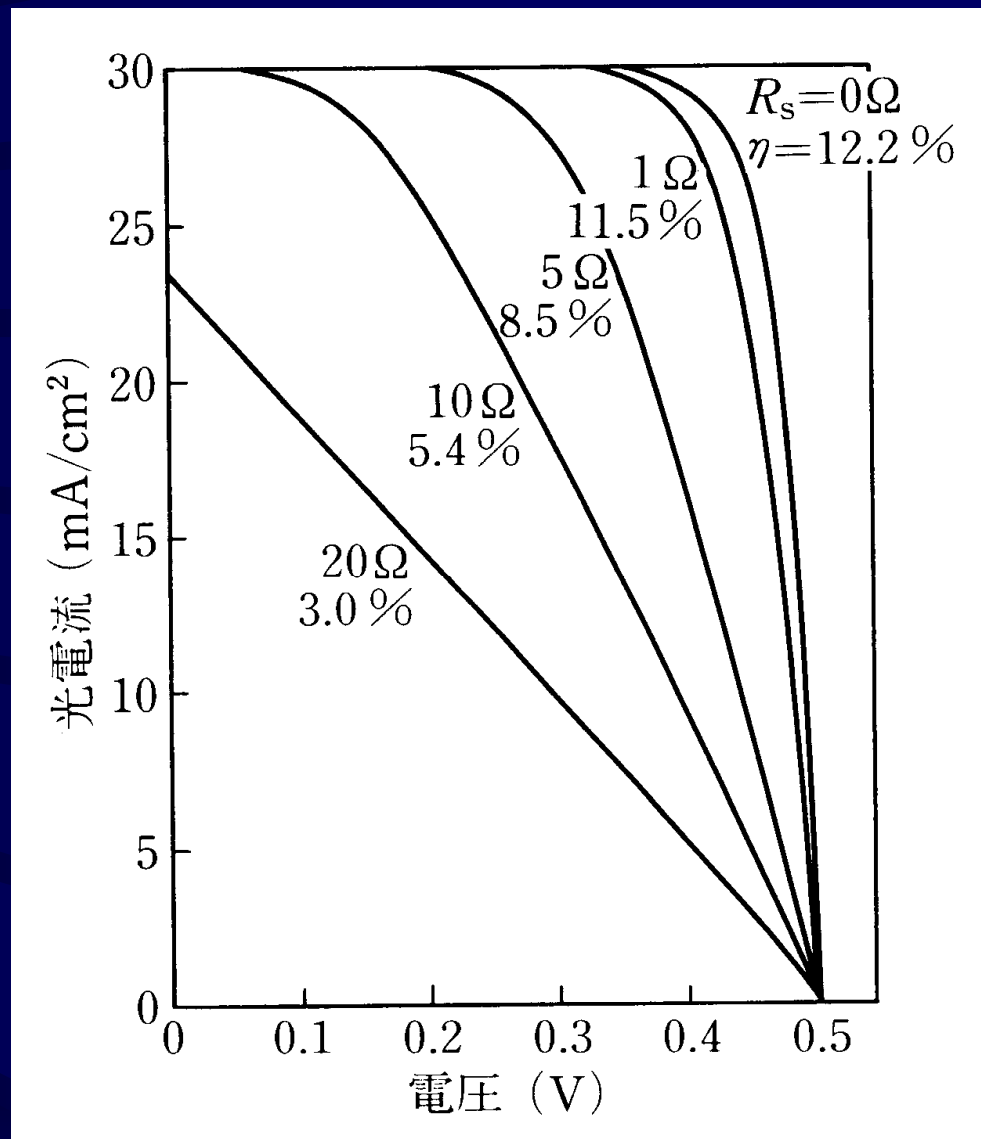


入射光功率一定 (100 mW/cm^2), 并假设 $V_{oc}=0.51\text{V}$, $J_{sc} = 30 \text{ mA/cm}^2$, $R_s=0$ 。

当光照较强时，二极管电流远大于漏电流，此时， R_{sh} 对光电池的影响较小，而相反的， R_s 的影响就变大起来。

$$I = I_L - I_s \{ \exp[q(V + R_s I) / kT] - 1 \}$$

右图给出了 R_s 对光电池输出特性的影响。可以看出光电池的输出特性随着 R_s 有着较大的变化，并且 R_s 对开路电压的影响几乎没有，但对短路电流却有很大的影响。



入射光功率一定 (100 mW/cm^2), 并假设 $V_{oc} = 0.51\text{V}$, $J_{sc} = 30 \text{ mA/cm}^2$, $R_{sh} = \infty$ 。

由前面分析可知，当漏电电阻 R_{sh} 降到100欧姆以下时，对光电池的影响就不可忽略了。对于 1cm^2 的硅电池，只要 R_{sh} 大于500欧姆，砷化镓电池 R_{sh} 大于1000欧姆时，对输出特性的影响就不重要了。另一方面，当总串联电阻 R_s 增加到5欧姆时，电池的转换效率就要下降30%，可见 R_s 的影响较大。最近对于硅电池，要求实用化的产品的 R_s 要在0.5欧姆以下。

四、太阳能电池转换效率的理论上限

1、太阳能电池的理论效率

太阳能电池的理论效率由下式决定：

$$\eta = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in} \cdot S}$$

当入射太阳光谱AM0或AM1.5确定以后，其值就取决于开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和填充因子FF的最大值。

下面我们就来分别考虑开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和填充因子FF的最大值。

短路电流 I_{sc} 的考虑:

我们假设在太阳光谱中波长大于长波限的光对太阳能电池没有贡献，其中长波限满足：

$$\lambda_{\max} = 1.24(\mu\text{m})/E_g(\text{eV})$$

而其余部分的光子，因其能量 $h\nu$ 大于材料的禁带宽度 E_g ，被材料吸收而激发电子-空穴对。假设其量子产额为1，而且被激发出的光生少子在最理想的情况下，百分之百地被收集起来。在上述理想的假设下，最大短路电流值显然仅与材料带隙 E_g 有关，其计算结果如图所示。

在 AMO和AM1.5光照射下的最大短路电流值。

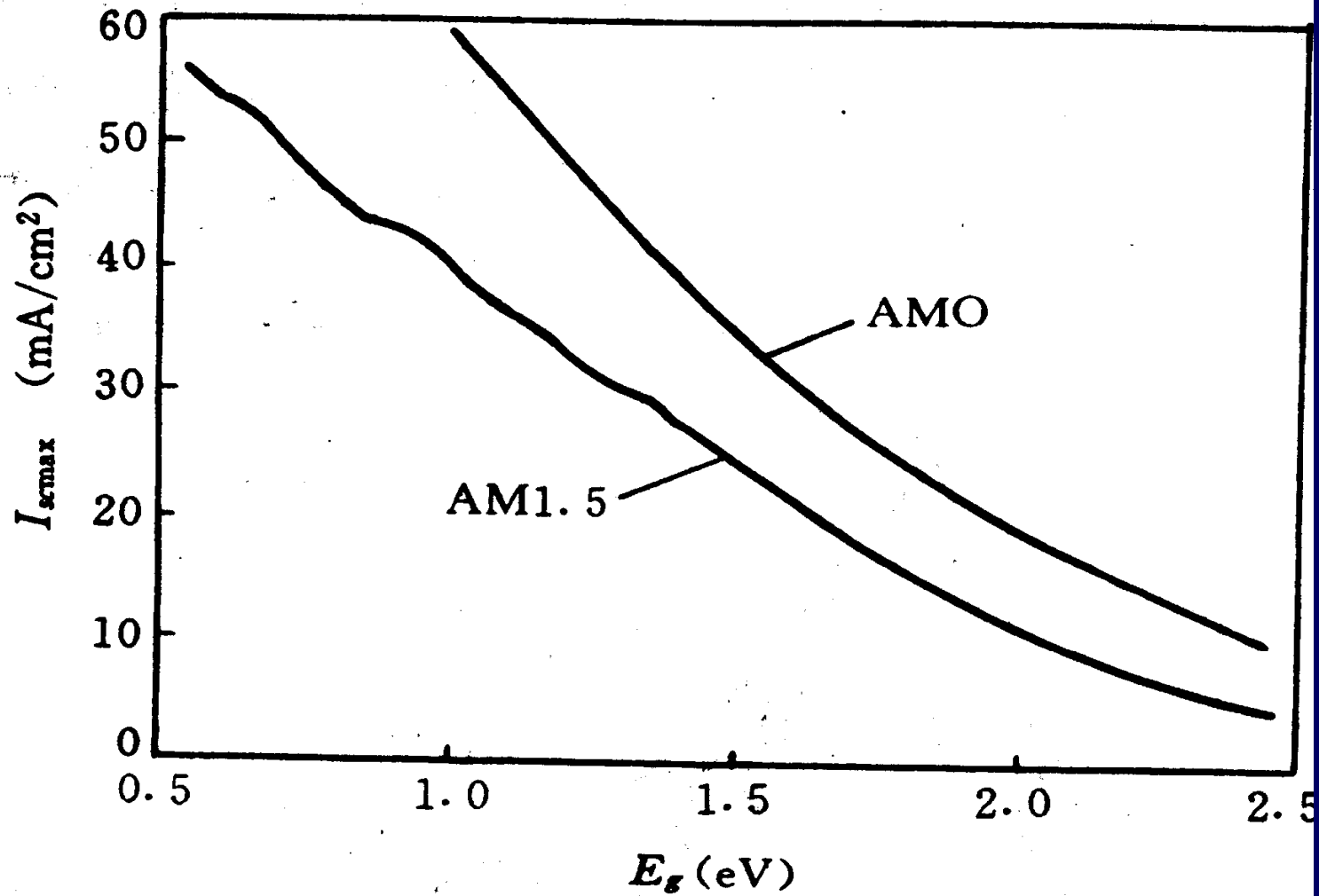


图 12-8 太阳电池 I_{sc} 的上限值与材料 E_g 的关系

开路电压 V_{oc} 的考虑:

开路电压 V_{oc} 的最大值，在理想情况下有下式决定:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right)$$

式中 I_L 是光生电流，在理想情况即为上图所对应的最大短路电流。 I_s 是二极管反向饱和电流，其满足:

$$I_s = Aq(D_n/L_n N_A + D_p/L_p N_D)n_i^2$$
$$n_i^2 = N_c N_v \exp(-E_g/kT)$$

显然， I_s 取决于 E_g 、 L_n 、 L_p 、 N_A 、 N_D 和绝对温度 T 的大小，同时也与光电池结构有关。为了提高 V_{oc} ，常常采用 E_g 大，少子寿命长及低电阻率（例如对硅单晶片选用0.2欧姆厘米）的材料，代入合适的半导体参数的数值，给出硅的最大 V_{oc} 值约700mV左右。

填充因子FF的考虑:

在理想情况下，填充因子FF仅是开路电压 V_{oc} 的函数，可用以下经验公式表示：

$$FF = \frac{U_{oc} - \ln(U_{oc} + 0.72)}{U_{oc} + 1}$$

$$U_{oc} = V_{oc} (kT/q)^{1/2}$$

这样，当开路电压 V_{oc} 的最大值确定后，就可计算得到FF的最大值。

综合上述结果，可得到作为带隙 E_g 的函数的最大转换效率，其结果示于下图中。

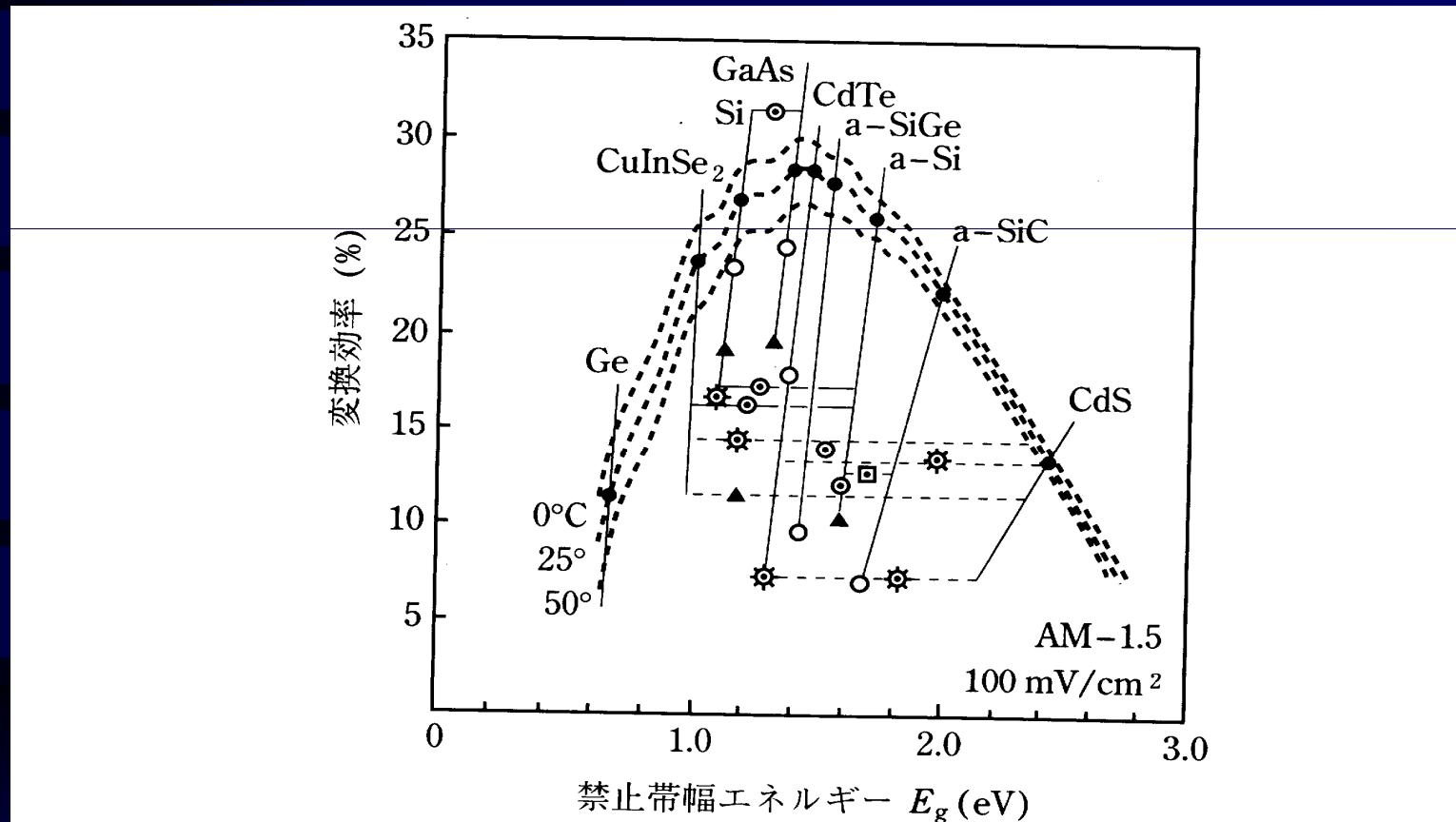


图 2.15 各積太陽電池の室温における理論限界効率 (●)，研究開発段階の最高記録 (○) ならびに大量生産規模での最高記録効率 (▲)。2 種類の材料をまたぐ ⊙ 印はタンデム型太陽電池，⊠ 印はヘテロ接合太陽電池，⊛ 印は多結晶太陽電池，他は多結晶のヘテロ接合太陽電池の効率を示す。

对于单晶硅太阳能电池，理论上限是27%，目前研究得到的最大值为24%左右。

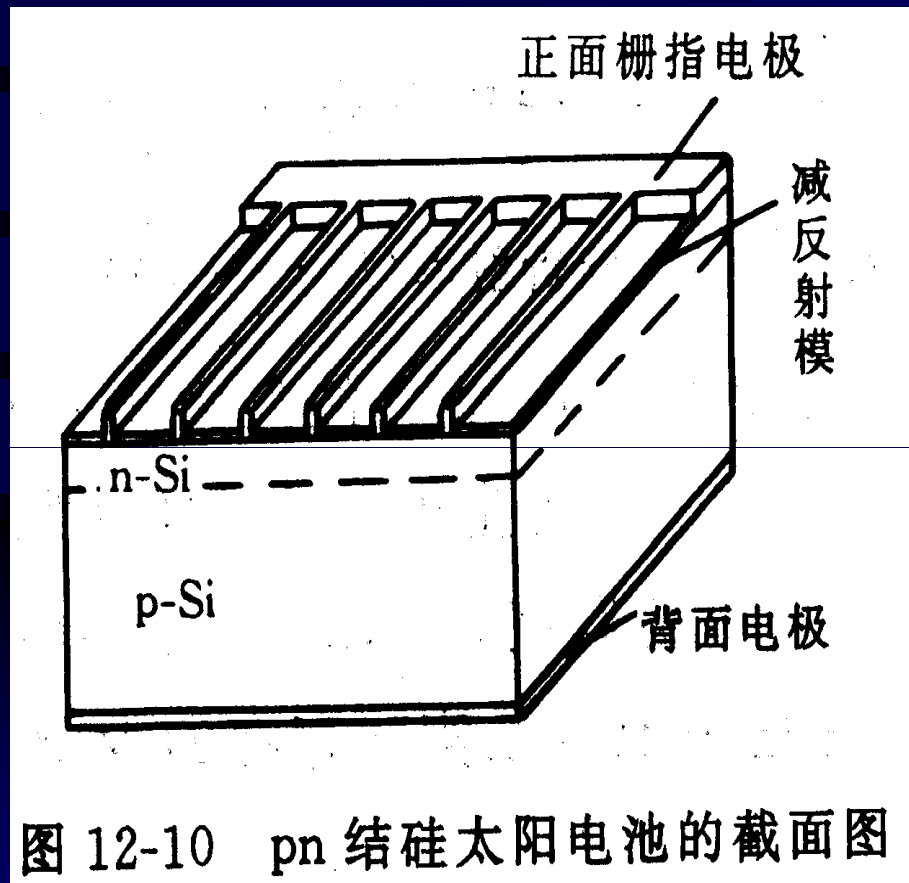
GaAs太阳能电池的转换效率的理论上限为28.5%，现在获得的最大值是24.7%。如何进一步提高太阳能电池的转换效率是当前的研究课题，这也就是所谓的高效率化技术的开发。

2、影响太阳能电池转换效率的一些因素

我们前面介绍了太阳能电池转换效率的理论值，这些理论值都是在理想情况下得到的。而太阳能电池在光电能量转换过程中，由于存在各种附加的能量损失，实际效率比上述的理论极限效率低。下面以pn结硅电池为例，介绍一些影响太阳能电池转换效率的因素。

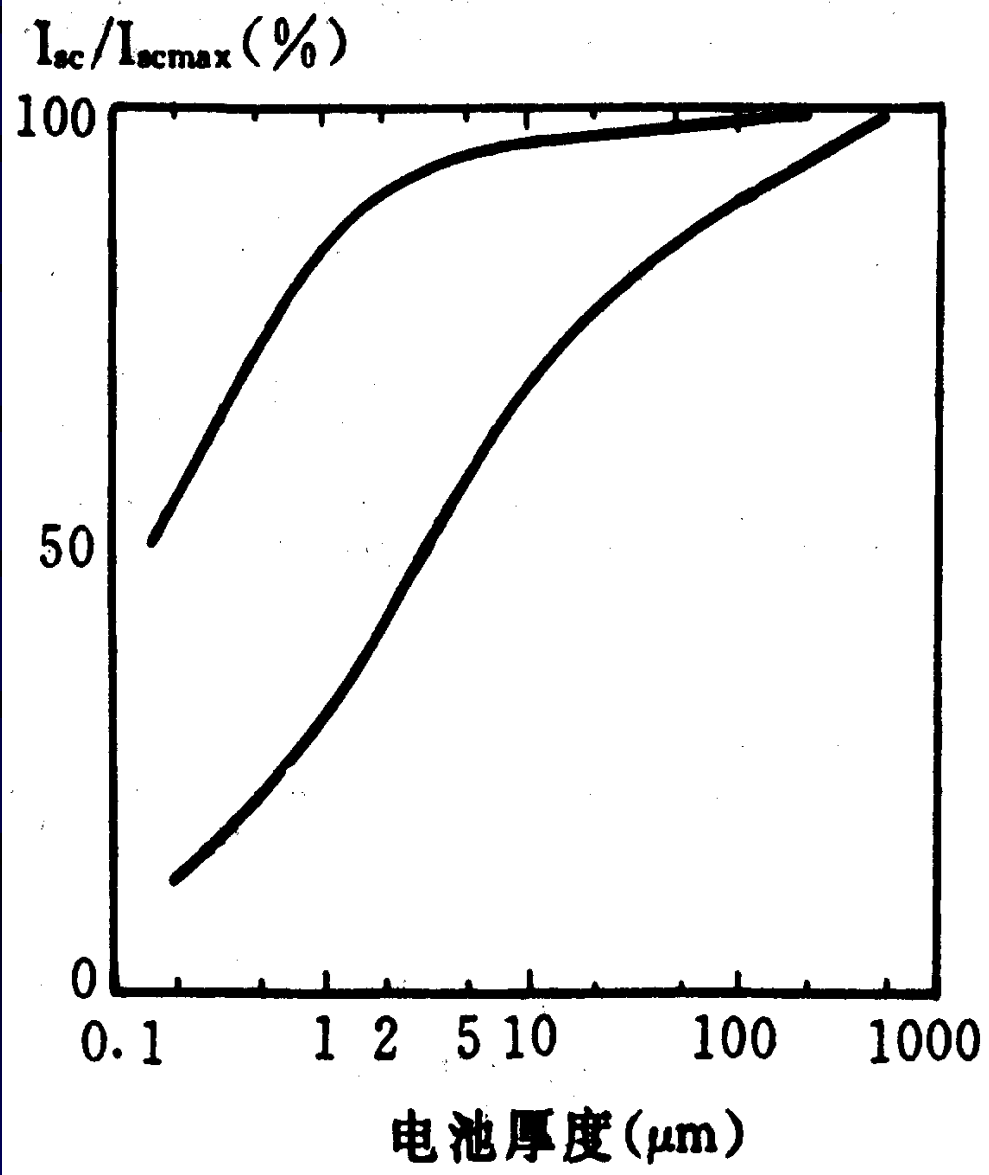
光生电流的光学损失:

太阳能电池的效率损失中, 有三种是属于光学损失, 其主要影响是降低了光生电流值。



反射损失: 从空气(或真空)垂直入射到半导体材料的光的反射。以硅为例, 在感兴趣的太阳光谱中, 超过30%的光能被裸露的硅表面发射掉了。

栅指电极遮光损失 c : 定义为栅指电极遮光面积在太阳能总面积中所占的百分比(见下图)。对一般电池来说, c 约为4%-15%。



透射损失：如果电池厚度不够大，某些能量合适能被吸收的光子可能从电池背面穿出。这决定了半导体材料之最小厚度。间接带隙半导体要求材料的厚度比直接带隙的厚。如图为对硅和砷化镓的计算结果。

光生少子的收集几率：

在太阳能电池内，由于存在少子的复合，所产生的每一个光生少数载流子不可能百分之百地被收集起来。定义光激发少子中对太阳能电池的短路电流有贡献的百分数为收集几率。该参数决定于电池内个区域的复合机理，也与电池结构与空间位置有关。

影响开路电压的实际因素：

决定开路电压 V_{oc} 大小的主要物理过程是半导体的复合。半导体复合率越高，少子扩散长度越短， V_{oc} 也就越低。体复合和表面复合都是重要的。

在p-Si衬底中，影响非平衡少子总复合率的三种复合机理是：复合中心复合、俄歇复合及直接辐射复合。总复合率主要取决三种复合中复合率最大的一个。例如：对于高质量的硅单晶，当掺杂浓度高于 10^{17}cm^{-3} 时，则俄歇复合产生影响，使少子寿命降低。

通常，电池表面还存在表面复合，表面复合也会降低 V_{oc} 值。

(复合中心复合、俄歇复合、直接辐射复合和表面复合?)

辐照效应:

应用在卫星上的太阳能电池受到太空中高能离子辐射，体内产生缺陷，使电池输出功率逐渐下降，可能影响其使用寿命。

辐照产生的缺陷，相当于复合中心。辐照后增大了电池内部的少子复合率 τ^{-1} ，即有：

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} + K' \varphi$$

式中 τ_0 是辐照前的寿命， K' 是常数， φ 是辐照通量。因为扩散长度等于 $(D \tau)^{1/2}$ ，故上式可写成：

$$L^{-2} = L_0^{-2} + K \varphi$$

对太阳能电池的研究表明， n^+p 电池 $K=1.7 \times 10^{-10}$ ，而 p^+n 电池 $K=1.22 \times 10^{-8}$ ，前者比后者抗辐射能力大得多。为了改善辐射容量，可将锂掺入太阳能电池中。Li可扩散到辐射感生点缺陷中，并与之结合起来，阻止寿命减退。太空应用的太阳能电池，一般都覆盖一块掺铈薄玻片，减少进入电池的高能粒子。