

第一章 太阳能电池的工作原理和基本特性

1.1 半导体物理基础

1.1.1 半导体的性质

世界上的物体如果以导电的性能来区分，有的容易导电，有的不容易导电。容易导电的称为导体，如金、银、铜、铝、铅、锡等各种金属；不容易导电的物体称为绝缘体，常见的有玻璃、橡胶、塑料、石英等等；导电性能介于这两者之间的物体称为半导体，主要有锗、硅、砷化镓、硫化镉等等。众所周知，原子是由原子核及其周围的电子构成的，一些电子脱离原子核的束缚，能够自由运动时，称为自由电子。金属之所以容易导电，是因为在金属体内有大量能够自由运动的电子，在电场的作用下，这些电子有规则地沿着电场的相反方向流动，形成了电流。自由电子的数量越多，或者它们在电场的作用下规则流动的平均速度越高，电流就越大。电子流动运载的是电量，我们把这种运载电量的粒子，称为载流子。在常温下，绝缘体内仅有极少量的自由电子，因此对外不呈现导电性。半导体内有少量的自由电子，在一些特定条件下才能导电。

半导体可以是元素，如硅（Si）和锗（Ge），也可以是化合物，如硫化镉（OCLS）和砷化镓（GaAs），还可以是合金，如 $Ga_xAl_{1-x}As$ ，其中 x 为 0-1 之间的任意数。许多有机化合物，如葱也是半导体。

半导体的电阻率较大（约 $10^{-5} \leq \rho \leq 10^7 \Omega \cdot m$ ），而金属的电阻率则很小（约 $10^{-8} \sim 10^{-6} \Omega \cdot m$ ），绝缘体的电阻率则很大（约 $\rho \geq 10^8 \Omega \cdot m$ ）。半导体的电阻率对温度的反应灵敏，例如锗的温度从 $20^\circ C$ 升高到 $30^\circ C$ ，电阻率就要降低一半左右。金属的电阻率随温度的变化则较小，例如铜的温度每升高 $100^\circ C$ ， ρ 增加 40% 左右。电阻率受杂质的影响显著。金属中含有少量杂质时，看不出电阻率有多大的变化，但在半导体里掺入微量的杂质时，却可以引起电阻率很大的变化，例如在纯硅中掺入百万分之一的硼，硅的电阻率就从 $2.14 \times 10^3 \Omega \cdot m$ 减小到 $0.004 \Omega \cdot m$ 左右。金属的电阻率不受光照影响，但是半导体的电阻率在适当的光线照射下可以发生显著的变化。

1.1.2 半导体物理基础

1.1.2.1 能带结构和导电性

半导体的许多电特性可以用一种简单的模型来解释。硅是四价元素，每个原子的最外壳层上有 4 个电子，在硅晶体中每个原子有 4 个相邻原子，并和每一个相邻原子共有两个价电子，形成稳定的 8 电子壳层。

自由空间的电子所能得到的能量值基本上是连续的，但在晶体中的情况就可能截然不同了，孤立原子中的电子占据非常固定的一组分立的能线，当孤立原子相互靠近，规则整齐排列的晶体中，由于各原子的核外电子相互作用，本来在孤立原子状态是分离的能级扩展，根据情况相互重叠，变成如图 2.1 所示的带状。电子许可占据的能带叫允许带，允许带与允许带间不许电子存在的范围叫禁带。

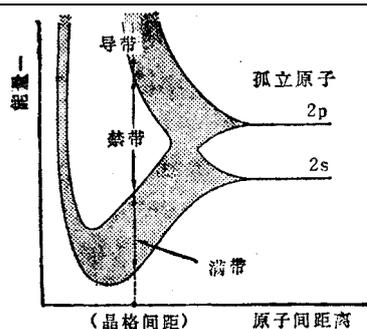


图 2.1 原子间距和电子能级的关系

在低温时，晶体内的电子占有最低的可能能态。但是晶体的平衡状态并不是电子全都处在最低允许能级的一种状态。基本物理定理——泡利（Pauli）不相容原理规定，每个允许能级最多只能被两个自旋方向相反的电子所占据。这意味着，在低温下，晶体的某一能级以下的所有可能能态都将被两个电子占据，该能级称为费米能级（ E_F ）。随着温度的升高，一些电子得到超过费米能级的能量，考虑到泡利不相容原理的限制，任一给定能量 E 的一个所允许的电子能态的占有几率可以根据统计规律计算，其结果是由下式给出的费米—狄拉克分布函数 $f(E)$ ，即

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/KT}}$$

现在就可用电子能带结构来描述金属、绝缘体和半导体之间的差别。

电导现象是随电子填充允许带的方式不同而不同。被电子完全占据的允许带（称为满带）上方，隔着很宽的禁带，存在完全空的允许带（称为导带），这时满带的电子即使加电场也不能移动，所以这种物质便成为绝缘体。允许带不完全占满的情况下，电子在很小的电场作用下就能移动到离允许带少许上方的另一个能级，成为自由电子，而使电导率变得很大，这种物质称为导体。所谓半导体，即是天然具有和绝缘体一样的能带结构，但禁带宽度较小的物质。在这种情况下，满带的电子获得室温的热能，就有可能越过禁带跳到导带成为自由电子，它们将有助于物质的导电性。参与这种电导现象的满带能级在大多数情况下位于满带的最高能级，因此可将能带结构简化为图 2.2。另外，因为这个满带的电子处于各原子的最外层，是参与原子间结合的价电子，所以又把这个满带称为价带。图中省略了导带的上部和价带的下部。半导体结晶在相邻原子间存在着共用价电子的共价键。如图 2.2 所示，一旦从外部获得能量，共价键被破坏后，电子将从价带跃迁到导带，同时在价带中留出电子的一个空位。这个空位可由价带中邻键上的电子来占据，而这个电子移动所留下的新的空位又可以由其它电子来填补。这样，我们可以看成是空位在依次地移动，等效于带正电荷的粒子朝着与电子运动方向相反的方向移动，称它为空穴。在半导体中，空穴和导带中的自由电子一样成为导电的带电粒子（即载流子）。电子和空穴在外电场作用下，朝相反方向运动，但是由于电荷符号也相反，因此，作为电流流动方向则相同，对电导率起迭加作用。

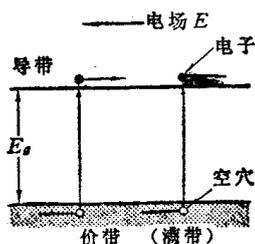


图 2.2 半导体能带结构和载流子的移动

1.1.2.2 本征半导体、掺杂半导体

图 2.2 所示的能带结构中，当禁带宽度 E_g 比较小的情况下，随着温度上升，从价带跃迁到导带的电子数增多，同时在价带产生同样数目的空穴。这个过程叫电子—空穴对的产生，把在室温条件下能进行这样成对的产生并具有一定电导率的半导体叫本征半导体，它只能在极纯的材料情况下得到的。而通常情况下，由于半导体内含有杂质或存在品格缺陷，作为自由载流子的电子或空穴中任意一方增多，就成为掺杂半导体。存在多余电子的称为 n 型半导体，存在多余空穴的称为 P 型半导体。

杂质原子可通过两种方式掺入晶体结构：它们可以挤在基质晶体原子间的位置上，这种情况称它们为间隙杂质；另一种方式是，它们可以替换基质晶体的原子，保持晶体结构中的有规律的原子排列，这种情况下，它们被称为替位杂质。

周期表中 III 族和 V 族原子在硅中充当替位杂质，图 2.3 示出一个 V 族杂质（如磷）替换了一个硅原子的部分晶格。四个价电子与周围的硅原子组成共价键，但第五个却处于不同的情况，它不在共价键内，因此不在价带内，它被束缚于 V 族原子，所

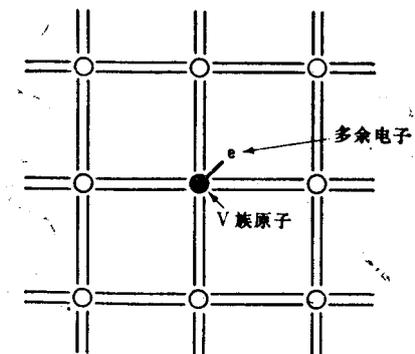


图 2.3 一个 V 族原子替代了一个硅原子的部分硅晶格

以不能穿过晶格自由运动，因此它也不在导带内。可以预期，与束缚在共价键内的自由电子相比，释放这个多余电子只须较小的能量，比硅的带隙能量 1.1eV 小得多。自由电子位于导带中，因此束缚于 V 族原子的多余电子位于低于导带底的能量为 E_i 的地方，如图（格 P28 图 2.13(a) 所示那样。这就在“禁止的”晶隙中安置了一个允许的能级，III 族杂质的分析与此类似。例如，把 V 族元素 (Sb, As, P) 作为杂质掺入单元素半导体硅单晶中时，这

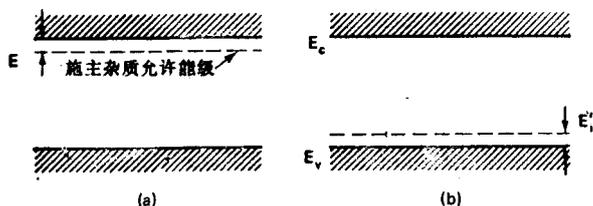


图 2.4

(a) V 族替位杂质在禁带中引入的允许能级 (b) III 族杂质的对应能态

些杂质替代硅原子的位置进入晶格点。它的 5 个价电子除与相邻的硅原子形成共价键外，还多余 1 个价电子，与共价键相比，这个剩余价电子极松弛地结合于杂质原子。因此，只要杂质原子得到很小的能量，就可以释放出电子形成自由电子，而本身变成 1 价正离子，但因受晶格点阵的束缚，它不能运动。这种情况下，形成电子过剩的 n 型半导体。这类可以向半导体提供自由电子的杂质称为施主杂质。其能带结构如图 2.5 所示。在 n 型半导体中，除存在

从这些施主能级产生的电子外，还存在从价带激发到导带的电子。由于这个过程是电子-空穴成对产生的，因此，也存在相同数目的空穴。我们把数量多的电子称为多数载流子，将数量少的空穴称为少数载流子。

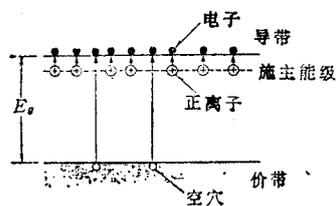


图 2.5 n 型半导体的能带结构

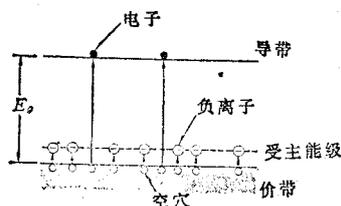


图 2.6 p 型半导体的能带结构

把III族元素 (B、Al、Ga、In) 作为杂质掺入时，由于形成完整的共价键上缺少一个电子。所以，就从相邻的硅原子中夺取一个价电子来形成完整的共价键。被夺走的电子留下一个空位，成为空穴。结果，杂质原子成为 1 价负离子的同时，提供了束缚不紧的空穴。这种结合用很小的能量就可以破坏，而形成自由空穴，使半导体成为空穴过剩的 P 型半导体，可以接受电子的杂质原子称为受主杂质。其能带结构如图 2.6 所示。这种情况下，多数载流子为空穴，少数载流子为电子。

上述的例子都是由掺杂形成的 n 型或 P 型半导体，因此称为掺杂半导体。但为数很多的化合物半导体，根据构成元素某种过剩或不足，有时导电类型发生变化。另外，也有由于构成元素蒸气压差过大等原因，造成即使掺入杂质有时也得不到 n、p 两种导电类型的情况。

1.1.2.3 载流子浓度

半导体处于热平衡状态时，多数载流子和少数载流子的浓度各自达到平衡值。因某种原因，少数载流子一旦超过平衡值，就将发生与多数载流子的复合，企图恢复到原来的平衡的状态。设电子浓度为 n ，空穴浓度为 p ，则空穴浓度随时间的变化率由电子-空穴对的产生和复合之差给出下式：

$$dp/dt = g - rpn \tag{2.1}$$

电子——空穴对的产生几率 g 是由价带中成为激发对象的电子数和导带中可允许占据的能级数决定。然而，空穴少于导带的允许能级时，不依赖于载流子数而成为定值。复合率正比于载流子浓度 n 与 p 的乘积，比例系数 r 表示复合几率。平衡状态时 $dp/dt=0$ ，由此可导出

$$pn = g/r = \text{常数} \tag{2.2}$$

它意味着多数载流子浓度和少数载流子浓度的乘积为确定值。这个关系式也适用于本征半导体，可得到

$$p_i n_i = n_i^2 = g/r \tag{2.3}$$

根据量子理论和量子统计理论可以得到

$$\begin{aligned} pn = n_i^2 &= 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_n^* m_p^*)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \\ &= N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{kT}\right) \end{aligned} \tag{2.4}$$

式中， k ——玻耳兹曼常数；
 h ——普朗克常数；

- m_n^* ——电子有效质量;
- m_p^* ——空穴有效质量;
- T ——绝对温度;
- E_V ——价带顶能量;
- E_C ——导带底能量;
- N_V ——价带顶的有效态密度
- N_C ——导带底的有效态密度

假如知道半导体的禁带亮度 E_g , 就可以很容易地计算出本征载流子浓度。

费米能级在描述半导体的能级图上是重要的参量。所谓费米能级, 即为电子占据几率为 1/2 处的能级, 可根据半导体电中性条件求出, 即

$$\text{自由空穴浓度} + \text{电离施主浓度} = \text{自由电子浓度} + \text{电离受主浓度} \quad (2.5)$$

费米能级在本征半导体中几乎位于禁带中央, 而在 n 型半导体中靠近导带。在 P 型半导体中靠近价带。同时费米能级将根据掺杂浓度的不同, 发生如图 2.6 所示的变化。例如, n 型半导体中设施主浓度为 N_d , 可给出:

$$E_C - E_F \approx kT \ln \frac{N_C}{N_d} \quad (2.6)$$

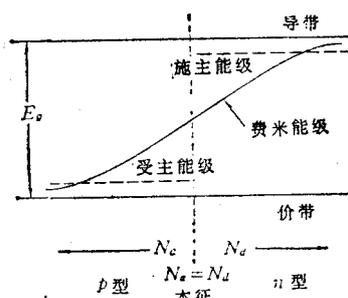


图 2.6 费米能级与杂质浓度的关系

P 型半导体中设受主浓度为 N_a , 则可给出:

$$E_F - E_V \approx kT \ln \frac{N_V}{N_a} \quad (2.7)$$

如果知道了杂质浓度就可以通过计算求得费米能级。

1.1.2.4 载流子的传输

一、漂移

在外加电场 ζ 的影响下, 一个随机运动的自由电子在与电场相反的方向上有一个加速度 $a = \zeta / m$, 在此方向上, 它的速度随时间不断地增加。晶体内的电子处于一种不同的情况, 它运动时的质量不同于自由电子的质量, 它不会长久持续地加速, 最终将与晶格原子、杂质原子或晶体结构内的缺陷相碰撞。这种碰撞将造成电子运动的杂乱无章, 换句话说, 它将降低电子从外加电场得到附加速度, 两次碰撞之间的“平均”时间称为弛豫时间 t_r , 由电子无规则热运动的速度来决定。此速度通常要比电场给与的速度大得多, 在两次碰撞之间由电场所引起的电子平均速度的增量称为漂移速度。导带内电子的漂移速度由下式得出:

$$v_d = \frac{1}{2} a t = \frac{1}{2} \frac{q t_r}{m_e^*} \zeta \quad (2.8)$$

(如果 t_r 是对所有的电子速度取平均, 则去掉系数 2)。电子载流子的迁移率定义为:

$$\mu_d = \frac{v_d}{\xi} = \frac{qt_r}{m_e^*} \quad (2.9)$$

来自导带电子的相应的电流密度将是

$$J_e = qnv_d = q\mu_e n\xi \quad (2.10)$$

对于价带内的空穴, 其类似公式为

$$J_h = q\mu_h p\xi \quad (2.11)$$

总电流就是这两部分的和。因此半导体的电导率 σ 为

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{J}{\xi} = q\mu_e n + q\mu_h p \quad (2.12)$$

其中 ρ 是电阻率。

对于结晶质量很好的比较纯的半导体来说, 使载流子速度变得紊乱的碰撞是由晶体的原子引起的。然而, 电离了的掺杂剂是有效的散射体, 因为它们带有净电荷。因此, 随着半导体掺杂的加重, 两次碰撞间的平均时间以及迁移率都将降低。

当温度升高时, 基体原子的振动更剧烈, 它们变为更大的“靶”, 从而降低了两次碰撞间的平均时间及迁移率。重掺杂时, 这个影响就得不太显著, 因为此时电离了的掺杂剂是有效的载流子的散射体。

电场强度的提高, 最终将使载流子的漂移速度增加到可与无规则热速度相比。因此, 电子的总速度归根结底将随着电场强度的增加而增加。电场的增加使碰撞之间的时间及迁移率减小了。

二、扩散

除了漂移运动以外, 半导体中的载流子也可以由于扩散而流动。象气体分子那样的任何粒子过分集中时, 若不受到限制, 它们就会自己散开。此现象的基本原因是这些粒子的无规则的热速度。

粒子流与浓度梯度的负值成正比。因为电流与荷电粒子流成正比, 所以对应于电子的一维浓度梯度的电流密度是

$$J_e = qD_e \frac{dp}{dx} \quad (2.13)$$

其中 D_e 是扩散常数。同样对于空穴, 有

$$J_h = -qD_h \frac{dp}{dx} \quad (2.14)$$

从根本上讲, 漂移和扩散两个过程是有关系的, 因而, 迁移率和扩散常数不是独立的, 它们通过爱因斯坦关系相互联系, 即

$$D_e = \frac{kT}{q} \mu_e \quad \text{和} \quad D_h = \frac{kT}{q} \mu_h \quad (2.15)$$

kT/q 是在与太阳电池有关的关系式中经常出现的参数，它具有电压的量纲，室温时为 26mV。

1.1.2.5 半导体的吸收系数

半导体晶体的吸光程度由光的频率 ν 和材料的禁带宽度所决定。当频率低、光子能量 $h\nu$ 比半导体的禁带宽度 E_g 小时，大部分光都能穿透；随着频率变高，吸收光的能力急剧增强。吸收某个波长 λ 的光的能力用吸收系数 $\alpha(h\nu)$ 来定义。半导体的光吸收由各种因素决定，这里仅考虑到在太阳电池上用到的电子能带间的跃迁。一般禁带宽度越宽，对某个波长的吸收系数就越小。除此以外，光的吸收还依赖于导带、价带的态密度。

光为价带电子提供能量，使它跃迁到导带，在跃迁过程中，能量和动量守恒，对没有声子参与的情况，即不伴随有动量变化的跃迁称为直接跃迁，其吸收过程的形式示于图 2.7，而伴随声子的跃迁称为间接跃迁，其吸收跃迁过程示于图 2.8。

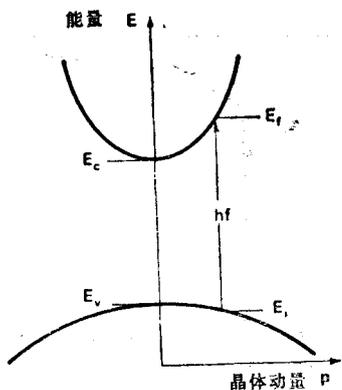


图 2.7 直接带隙半导体的能量—晶体动量图

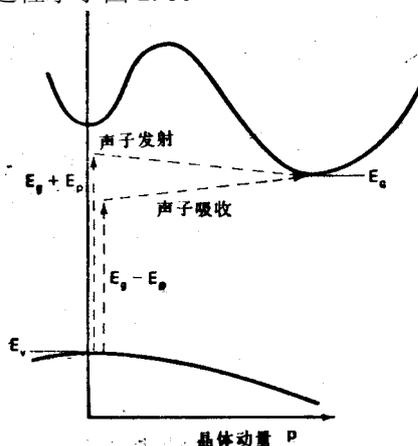


图 2.8 间接带隙半导体的能量—晶体动量图

硅属于间接跃迁类型，其吸收系数上升非常平缓，所以在太阳光照射下，光可到达距表面 $20\mu\text{m}$ 以上相当深的地方，在此还能产生电子—空穴对。与此相反，对直接跃迁型材料 GaAs，在其禁带宽度附近吸收系数急剧增加，对能量大于禁带宽度的光子的吸收缓慢增加，此时，光吸收和电子—空穴对的产生，大部分是在距表面 $2\mu\text{m}$ 左右的极薄区域中发生。简言之，制造太阳电池时，用直接跃迁型材料，即使厚度很薄，也能充分的吸收太阳光，而用间接跃迁型材料，没有一定的厚度，就不能保证光的充分吸收。但是作为太阳电池必要的厚度，并不是仅仅由吸收系数来决定的，与少数载流子的寿命也有关系，当半导体掺杂时，吸收系数将向高能量一侧发生偏移。

由于一部分光在半导体表面被反射掉，因此，进入内部的光实际上等于扣除反射后所剩部分。为了充分利用太阳光，应在半导体表面制备绒面和减反射层，以减少光在其表面的反射损失。

1.1.2.6 载流子的复合

一 弛豫到平衡

适当波长的光照射在半导体上会产生电子—空穴对。因此，光照射时材料的载流子浓度将超过无光照时的值。如果切断光源，则载流子浓度就衰减到它们平衡时的值。这个衰减过程通称为复合过程。下面将介绍几种不同的复合机构。

二 辐射复合

辐射复合就是光吸收过程的逆过程。占据比热平衡时更高能态的电子有可能跃迁到空的低能态，其全部（或大部分）初末态间的能量差以光的方式发射。所有已考虑到的吸收机构都有相反的辐射复合过程。由于间接带隙半导体需要包括声子的两级过程，所以辐射复合在直接带隙半导体中比间接带隙半导体中进行得快。

总的辐射复合速率 R_R 与导带中占有态（电子）的浓度和价带中未占有态（空穴）的浓度的乘积成正比，即

$$R_R = Bnp \quad (2.16)$$

式中， B 对给定的半导体来说是一个常数。由于光吸收和这种复合过程之间的关系，由半导体的吸收系数能够计算出 B 。

热平衡时，即 $np=n_i^2$ 时，复合率由数目相等但过程相反的产生率所平衡。在不存在由外部激励源产生载流子对的情况下，与上式相对应的净复合率 U_R 由总的复合率减去热平衡时的产生率得到，即

$$U_R = B(np - n_i^2) \quad (2.17)$$

对任何复合机构，都可定义有关载流子寿命（对电子）和（对空穴）它们分别为

$$\begin{aligned} \tau_e &= \frac{\Delta n}{U} \\ \tau_h &= \frac{\Delta p}{U} \end{aligned} \quad (2.18)$$

式中， U 为净复合率， Δn 和 Δp 是相应载流子从它们热平衡时的值 n_0 和 p_0 的扰动。

对 $\Delta n = \Delta p$ 的辐射复合机构而言，由式（2.17）确定的特征寿命是

$$\tau = \frac{n_0 p_0}{B n_i^2 (n_0 + p_0)} \quad (2.19)$$

硅的 B 值约为 $2 \times 10^{-15} \text{cm}^3/\text{s}$ 。

正如前面所说的直接带隙材料的复合寿命比间接带隙材料的小得多。利用 GaAs 及其合金为材料的商用半导体激光器和光发射二极管就是以辐射复合过程作为基础的。但对硅来说，其它的复合机构远比这重要得多。

三、俄歇复合

在俄歇 (Auger) 效应中, 电子与空穴复合时, 将多余的能量传给第二个电子而不是发射光。图 2.9 示出了这个过程。然后, 第二个电子通过发射声子弛豫回到它初始所在的能级。俄歇复合就是更熟悉的碰撞电离效应的逆过程。对具有充足的电子和空穴的材料来说, 与俄歇过程有关的特征寿命 τ 分别是

$$\frac{1}{\tau} = Cnp + Dn^2 \quad \text{或} \quad \frac{1}{\tau} = Cnp + Dp^2 \quad (2.20)$$

在每种情况下, 右边的第一项描述少数载流子能带的电子激发, 第二项描述多数载流子能带的电子激发。由于第二项的影响, 高掺杂材料中俄歇复合尤其显著。对于高质量硅, 掺杂浓度大于 10^{17}cm^{-3} 时, 俄歇复合处于支配地位。

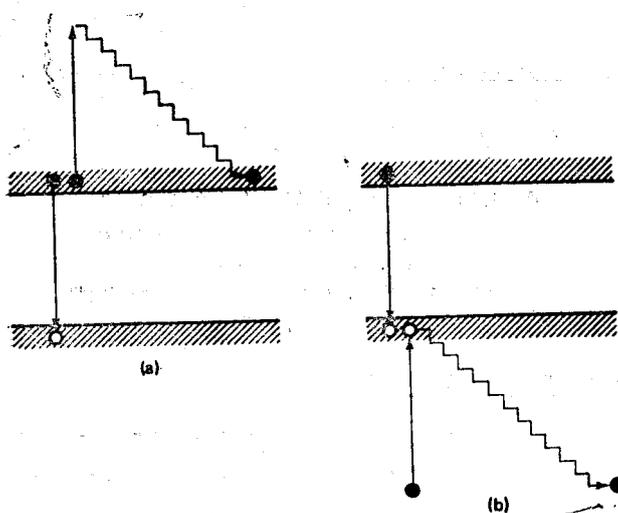
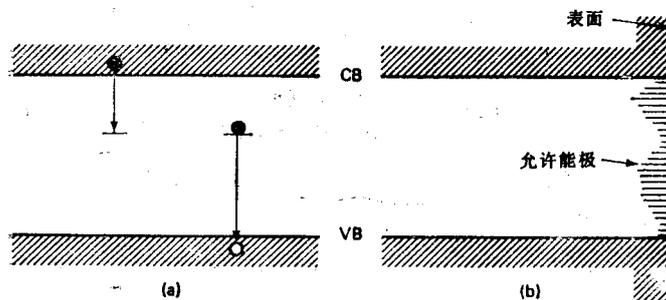


图 2.9 俄歇复合过程

- (a) 多余的能量传给导带中的电子
- (b) 多余的能量传给价带中的电子

四、通过陷阱的复合

前面已指出, 半导体中的杂质和缺陷会在禁带中产生允许能级。这些缺陷能级引起一



种很有效的两级复合过程。如图 2.10 (a) 所示, 在此过程中, 电子从导带能级弛豫到缺陷能级, 然后再弛豫到价带, 结果与一个空穴复合。

图 2.10

- (a) 通过半导体禁带中的陷阱能级的两级复合过程
- (b) 在半导体表面位于禁带中的表面态

对此过程进行动力学分析可得，通过陷阱的净复合—产生率 U_T 可写为

$$U_T = \frac{np - n_i^2}{\tau_{h_0}(n + n_1) + \tau_{e_0}(p + p_1)} \quad (2.21)$$

式中， τ_{h_0} 和 τ_{e_0} 是寿命参数，它们的大小取决于陷阱的类型和陷阱缺陷的体密度， n_1 和 p_1 是分析过程中产生的参数，此分析过程还引入一个复合速率与陷阱能 E_t 的关系式：

$$n_1 = N_C \exp\left(\frac{E_t - E_c}{kT}\right) \quad (2.22)$$

$$n_1 p_1 = n_i^2 \quad (2.23)$$

式(2.22)在形式上与用费米能级表示电子浓度的公式很相似。如果 τ_{e_0} 和 τ_{h_0} 数量级相同，可知当 $n_1 \approx p_1$ 时， U 有其峰值。当缺陷能级位于禁带中央附近时，就出现这种情况。因此，在带隙中央引入能级的杂质是有效的复合中心。

五、表面复合

表面可以说是晶体结构中有相当严重缺陷的地方。如图 2.10 (b) 所示，在表面处存在许多能量位于禁带中的允许能态。因此由上面所叙述的机构，在表面处，复合很容易发生。单能级表面态每单位面积的净复合率 U_A 具有与 2.21 类似的形式，即

$$U_A = \frac{S_{e_0} S_{h_0} (np - n_i^2)}{S_{e_0} (n + n_1) + S_{h_0} (p + p_1)} \quad (2.24)$$

式中 S_{e_0} 和 S_{h_0} 是表面复合速度。位于带隙中央附近的表面态能级也是最有效的复合中心。

1.1.2.7 半导体器件物理学基本方程

前面几节中已经概述了半导体的有关特性，这些内容现在将被归纳为一组能描述半导体器件工作的基本方程。这些方程的解使我们能够确定包括太阳电池在内的大部分半导体器件的理想特性。忽略其余两维空间的变化，方程组将写成一维的形式。

1、泊松方程

它描述了电场散度与空间电荷密度 ρ 之间的关系，在一维情况下，其形式为：

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.25)$$

式中 ϵ 是介电常数。 ρ 为电荷密度。在半导体中， ρ 值为

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (2.26)$$

式中， p 和 n 是空穴和电子的浓度， N_D^+ 和 N_A^- 分别是已电离的施主和受主的浓度。在正常情况下，大部分施主和受主都被电离，因此

$$\begin{aligned} N_D^+ &\approx N_D \\ N_A^- &\approx N_A \end{aligned} \quad (2.27)$$

式中 N_b 和 N_a 为施主和受主杂质的总浓度。

2、电流密度方程

电子和空穴通过漂移和扩散过程可对电流作出贡献。因此，电子和空穴的总电流密度 J_e 和 J_h 的表达式为

$$\begin{aligned} J_e &= q\mu_e n \xi + qD_e \frac{dn}{dx} \\ J_h &= q\mu_h p \xi - qD_h \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad (2.28)$$

迁移率和扩散系数的关系由爱因斯坦关系式 [$D_e = (kT/q)\mu_e$ 和 $D_h = (kT/q)\mu_h$] 确定。

3、连续方程

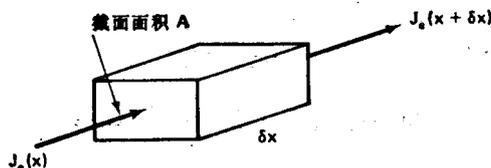


图 2.11 推导电子连续方程用的单元体积

参看图 2.11 中长为 δx 、横截面积为 A 的单元体积，可以说这个体积中电子的净增加几率等于它们进入的速率减去它们出去的速率，加上该体积中它们的产生率，减去它们的复合率，写成方程为：

$$\text{进入速率} - \text{出去速率} = \frac{A}{q} \{-J_e(x) - [-J_e(x + \delta x)]\} = \frac{A}{q} \frac{dJ_e}{dx} \delta x \quad (2.29)$$

$$\text{产生率} - \text{复合率} = A \delta_x (G - U) \quad (2.30)$$

式中 G 是由于外部作用（如光照）所一引起的净产生率， U 是净复合率。在稳态情况下，净增加率必须为 0，这样就有

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_e}{dx} = U - G \quad (2.31)$$

同样，对于空穴有

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_h}{dx} = -(U - G) \quad (2.32)$$

4、方程组

由上述方程，我们可得到应用于半导体器件的基本方程组：

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{dx} &= \frac{q}{\varepsilon} (p - n + N_D - N_A) \\ J_e &= q\mu_e n \xi + qD_e \frac{dn}{dx} \\ J_h &= q\mu_h p \xi - qD_h \frac{dp}{dx} \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_e}{dx} = U - G$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_h}{dx} = -(U - G)$$

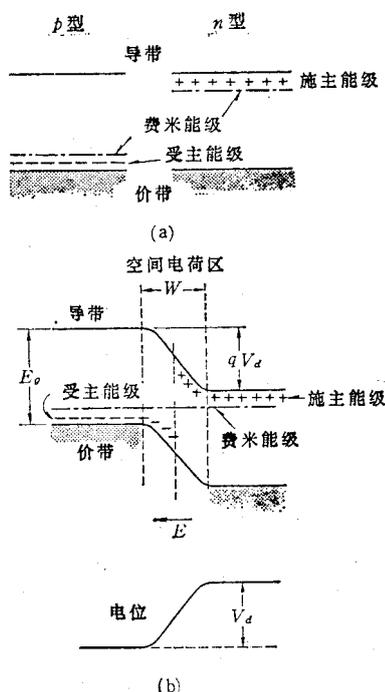
利用计算机，通过引入一些考虑周详的近似处理，可能极简单地就可求得这些方程的解。

1.1.3 半导体 pn 结

1.1.3.1 能带图

在一块半导体晶体内，P 型和 n 型紧接在一起时，将它们交界处称为 pn 结。当 p 型，n 型单独存在时，费米能级如图 2.12 (a) 所示，分别位于价带和导带附近。

一旦形成 pn 结，由于结两边的电子和空穴的浓度不同，电子就强烈地要从 n 区向 p 区扩散，空穴则要向相反方向扩散，其结果在 n 型一边出现正电荷，在 p 型一边出现负电荷，



这两种电荷层在半导体内部建立了一个内建电场，这个电场反过来又在结处产生一个内部电位降，阻挡了电子和空穴的进一步扩散，包含这两种电荷层的空间称为耗尽区或空间电荷区。通过这个空间电荷区的作用，使费米能级成同一水平，达到平衡状态。图 2.12 (b) 表示 pn 结的能带图及从 p 区向 n 区变化的空间电荷区。内建电场从 n 区指向 p 区，形成势垒。

在平衡状态下，由于扩散，从 p 区越过势垒向 n 区移动的空穴数目等同于空间电荷区附近 n 区中由于热运动产生的少数载流子空穴在空间电荷区内建电场的作用下漂移到 p 区的数目，因此没有电流流过。对于电子也可做同样的论述。

1.1.3.2 电流电压特性

在 pn 结上加偏置电压时，由于空间电荷区内没有载流子（又称为耗尽区）形成高阻区，因此，电压几乎全部跨落在空间电荷区上。当外加电压使得 p 区为正时，势垒高度减小，空穴从 p 区向 n 区的移动以及电子从 n 区向 p 区的移动变得容易，在两个区内有少数载流子注入，因此电流容易流动（称为正向）。当外加电压使得 n 区为正时，势垒高度增加，载流子的移动就变得困难，几乎没有电流流过（此时称为反向）。当存在外加电压时，空间电荷区的 n 区边界和 p 区边界的空穴浓度 p_n 及电子浓度 n_p 如下：

$$\begin{aligned} p_n &= p_{n_0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \\ n_p &= n_{p_0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.34)$$

当加正向电压时 $V > 0$ ，加反向电压时 $V < 0$ 。

由于我们认为外加电压仅跨越在空间电荷区，所以可视为 n 区内没有电场，由空穴构成的电流只是由于它的浓度梯度形成的扩散电流。电流密度 J_p 为

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} (p_n - p_{n_0}) = qp_{n_0} \frac{D_p}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.35)$$

同样，注入到 p 区的少数载流子电子的电流密度 J_n 为

$$J_n = qn_{p_0} \frac{D_n}{L_n} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.36)$$

因加偏压 V 而产生的总电流是空穴电流与电子电流之和，故总电流密度 J 为：

$$J = J_p + J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.37)$$

$$J_0 = qp_{n_0} \frac{D_p}{L_p} + qn_{p_0} \frac{D_n}{L_n} \quad (2.38)$$

总电流密度 J 具有如图 2.13 所示的整流特性。正向时，在电压较大的区域，电流密度与 $\exp(qV/kT)$ 成正比；反向时则趋近于 $-J_0$ 。称 J_0 为饱和电流密度。

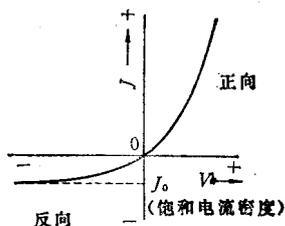


图 2.13 pn 结的电流—电压特性

1.2 太阳能电池工作原理

1.2.1 半导体的内光电效应

当光照射到半导体上时，光子将能量提供给电子，电子将跃迁到更高的能态，在这些电子中，作为实际使用的光电器件里可利用的电子有：

- (1) 价带电子；
- (2) 自由电子或空穴 (Free Carrier)；
- (3) 存在于杂质能级上的电子。

太阳能电池可利用的电子主要是价带电子。由价带电子得到光的能量跃迁到导带的过程决定的光的吸收称为本征或固有吸收。

太阳能电池能量转换的基础是结的光生伏特效应。当光照射到 pn 结上时，产生电子—空穴对，在半导体内部结附近生成的载流子没有被复合而到达空间电荷区，受内建电场的吸引，电子流入 n 区，空穴流入 p 区，结果使 n 区储存了过剩的电子，p 区有过剩的空穴。它们在 pn 结附近形成与势垒方向相反的光生电场。光生电场除了部分抵消势垒电场的作用外，还使 p 区带正电，N 区带负电，在 N 区和 P 区之间的薄层就产生电动势，这就是光生伏特效应。此时，如果将外电路短路，则外电路中就有与入射光能量成正比的光电流流过，这个电流称作短路电流，另一方面，若将 PN 结两端开路，则由于电子和空穴分别流入 N 区和 P 区，使 N 区的费米能级比 P 区的费米能级高，在这两个费米能级之间就产生了电位差 V_{oc} 。可以测得这个值，并称为开路电压。由于此时结处于正向偏置，因此，上述短路光电流和二极管的正向电流相等，并由此可以决定 V_{oc} 的值。

1.2.2 太阳能电池的能量转换过程

太阳能电池是将太阳能直接转换成电能的器件。它的基本构造是由半导体的 PN 结组成。此外，异质结、肖特基势垒等也可以得到较好的光电转换效率。本节以最普通的硅 PN 结太阳能电池为例，详细地观察光能转换成电能的情况。

首先研究使太阳能电池工作时，在外部观测到的特性。图 2.14 表示了无光照时典型的电流电压特性（暗电流）。当太阳光照射到这个太阳能电池上时，将有和暗电流方向相反的光电流 I_{ph} 流过。

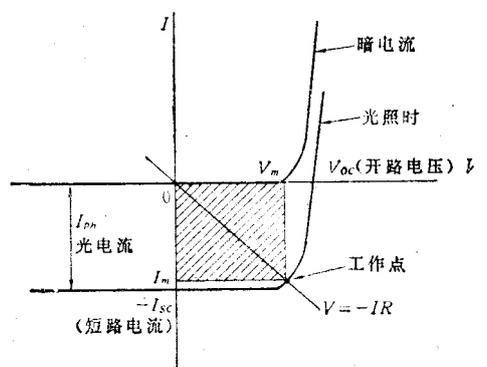


图 2.14 无光照及光照时电流—电压特性

当给太阳能电池连结负载 R ，并用太阳光照射时，则负载上的电流 I_m 和电压 V_m 将由图中有光照时的电流—电压特性曲线与 $V=-IR$ 表示的直线的交点来确定。此时负载上有 $P_{out}=RI_m^2$ 的功率消耗，它清楚地表明正在进行着光电能量的转换。通过调整负载的大小，可以在一个最佳的工作点上得到最大输出功率。**输出功率（电能）与输入功率（光能）之比称为太阳能电池的能量转换效率。**



下面我们把目光转到太阳能电池的内部，详细研究能量转换过程。太阳能电池由硅 pn 结构成，在表面及背面形成无整流特性的欧姆接触。并假设除负载电阻 R 外，电路中无其它电阻成分。当具有 $h\nu$ (eV) ($h\nu > E_g$, E_g 为硅的禁带宽度) 能量的光子照射在太阳能电池上时，产生电子—空穴对。由于光子的能量比硅的禁带宽度大，因此电子被激发到比导带底还高的能级处。对于 p 型硅来说，少数载流子浓度 n_0 极小 (一般小于 $10^5/cm^3$)，导带的能级几乎都是空的，因此电子又马上落在导带底。这时电子及空穴将总的 $h\nu - E_g$ (eV) 的多余能量以声子 (晶格振动) 的形式传给晶格。落到导带底的电子有的向表面或结扩散，有的在半导体内部或表面复合而消失了。但有一部分到达结的载流子，受结处的内建电场加速而流入 n 型硅中。在 n 型硅中，由于电子是多数载流子，流入的电子按介电弛豫时间的顺序传播，同时为满足 n 型硅内的载流子电中性条件，与流入的电子相同数目的电子从连接 n 型硅的电极流出。这时，电子失去相当于空间电荷区的电位高度及导带底和费米能级之间电位差的能量。设负载电阻上每秒每立方厘米流入 N 个电子，则加在负载电阻上的电压 $V=QNr=IR$ 表示。由于电路中无电源，电压 $V=IR$ 实际加在太阳能电池的结上，即结处于正向偏置。一旦结处于正向偏置时，二极管电流 $I_d=I_0[\exp(qV/nkT)-1]$ 朝着与光激发产生的载流子形成的光电流 I_{ph} 相反的方向流动，因而流入负载电阻的电流值为

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0[\exp(qV/nkT) - 1] \quad (2.39)$$

在负载电阻上，一个电子失去一个 qV 的能量，即等于光子能量 $h\nu$ 转换成电能 qV 。流过负载电阻的电子到达 p 型硅表面电极处，在 P 型硅中成为过剩载流子，于是和被扫出来的空穴复合，形成光电流

1.3 太阳能电池的基本特性

1.3.1 短路电流

太阳能电池的短路电流等于其光生电流。分析短路电流的最方便的方法是将太阳光谱划分成许多段，每一段只有很窄的波长范围，并找出每一段光谱所对应的电流，电池的总短路电流是全部光谱段贡献的总和：

$$I_{sc} = \int_0^{\infty} j_{sc}(\lambda) d\lambda \approx \int_{0.3\mu m}^{\lambda_0} j_{sc}(\lambda) d\lambda = \int_{0.3\mu m}^{\lambda_0} (1 - R(\lambda)) q F(\lambda) \eta(\lambda) d\lambda \quad (2.40)$$

式中

λ_0 ——本征吸收波长限

$R(\lambda)$ ——表面反射率

$F(\lambda)$ ——太阳光谱中波长为 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 间隔内的光子数。

$F(\lambda)$ 的值很大的程度上依赖于太阳天顶角。作为表示 $F(\lambda)$ 分布的参数是 AM (AirMass)。AM 表示入射到地球大气的太阳直射光所通过的路程长度，定义为

$$AM = \frac{b}{b_0} \sec Z \quad (2.41)$$

式中:

- b_0 ——标准大气压
- b ——测定时的大气压
- Z ——太阳天顶距离

一般情况下, $b \approx b_0$, 例如, AM1 相当于太阳在天顶位置时的情况, AM2 相当于太阳高度角为 30° 时的情况, AM0 则表示在宇宙空间中的分布

在实际的半导体表面的反射率与入射光的波长有关, 一般为 $30\sim 50\%$ 。为防止表面的反射, 在半导体表面制备折射率介于半导体和空气折射率之间的透明薄膜层。这个薄膜层称为减反射膜 (Antireflective coating)。

设半导体、减反射膜、空气的折射率分别为 n_2 、 n_1 、 n_0 , 减反射膜厚度为 d_1 , 则反射率 R 为

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta} \quad (2.42)$$

式中:

- $r_1 = (n_0 - n_1) / (n_0 + n_1)$
- $r_2 = (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)$
- $\theta = 2\pi n_1 d_1 / \lambda$
- λ — 波长

显然, 减反射膜的厚度 d_1 为 $1/4$ 波长时, R 为最小。即

$$d_1 = \frac{1}{4} \frac{\lambda'}{n_1} \quad \text{时}$$

$$R_{\min} = \left[\frac{(n_1^2 - n_0 n_2)}{(n_1^2 + n_0 n_2)} \right]^2 \quad (\lambda = \lambda') \quad (2.43)$$

一般在太阳光谱的峰值波长处, 使得 R 变为最小, 以此来决定 d_1 的值。

以硅电池为例, 因为在可见光至红外光范围内, 硅的折射率为 $n_2 = 3.4\sim 4.0$, 使式(2.43)为零, 则 n_1 的值 ($n_1 \sqrt{n_0 n_2}$, $n_0 = 1$) 为 $1.8 \leq n_1 \leq 2.0$ 。设 $\lambda' = 4800$ 埃, 则 $600 \text{ 埃} \leq d_1 \leq 667$ 埃, 满足这些条件的材料一般可采用一氧化硅, 在中心波长处, 反射率达到 1% 左右。由于制备了减反射膜, 短路电流可以增加 $30\sim 40\%$ 。此外, 采用的减反射膜 SiO_2 ($n_1 \approx 1.5$)、 Al_2O_3 ($n_1 \approx 1.9$)、 Sb_2O_3 ($n_1 \approx 1.9$)、 Tl_2O_3 、 Ta_2O_5 ($n_1 \approx 2.25$)。将具有不同折射率的氧化膜重叠二层, 在满足一定的条件下, 就可以在更宽的的波长范围内减少反射率。此外也可以将表面加工成棱锥体状的方法, 来防止表面反射。

1.3.2 开路电压

当太阳电池处于开路状态时，对应光电流的大小产生电动势，这就是开路电压。在式 (2.39) 中，设 $I=0$ (开路)， $I_{ph}=I_{sc}$ ，则

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln[(I_{sc}/I_0) + 1] \quad (2.44)$$

在可以忽略串联、并联电阻的影响时， I_{sc} 为与入射光强度成正比的值，在很弱的阳光下， $I_{sc} \ll I_0$ ，因此

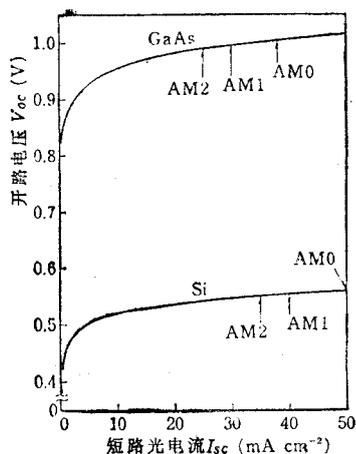
$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \frac{I_L}{I_0} = I_L R_0 \quad (2.45)$$

其中 $R_0 = \frac{nkT}{qI_0}$ ，

在很强的阳光下， $I_{sc} \gg I_0$ ，

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \frac{I_{sc}}{I_0} \quad (2.46)$$

由此可见，在较弱阳光时，硅太阳电池的开路电压随光的强度作近似直线的变化。而当有较



强的阳光时， V_{oc} 则与入射光的强度的对数成正比。图 2.15 表示具有代表性的硅和 GaAs 太阳电池的 I_{sc} 与 V_{oc} 之间的关系。Si 与 GaAs 比较，因 GaAs 的禁带宽度宽，故 I_0 值比 Si 的小几个数量级，GaAs 的 V_{oc} 值比 Si 的高 0.45 伏左右。假如结形成的很好，禁带宽度愈宽的半导体， V_{oc} 也愈大。

图 2.15 开路电压与短路电流的关系

1.3.3 太阳电池的输出特性

1.3.3.1 等效电路

为了描述电池的工作状态，往往将电池及负载系统用一等效电路来模拟。在恒定光照下，一个处于工作状态的太阳电池，其光电流不随工作状态而变化，在等效电路中可把它看

作是恒流源。光电流一部分流经负载 R_L ，在负载两端建立起端电压 V ，反过来它又正向偏置于 p-n 结二极管，引起一股与光电流方向相反的暗电流 I_{bk} ，这样，一个理想的 PN 同质结太阳能电池的等效电路就被绘制成如图 2.16 (a) 所示。但是，由于前面和背面的电极和接触，以及材料本身具有一定的电阻率，基区和顶层都不可避免的要引入附加电阻。流经负载的电流，经过它们时，必然引起损耗。在等效电路中，可将它们的总效果用一个串联电阻 R_S 来表示。由于电池边沿的漏电和制作金属化电极时，在电池的微裂纹、划痕等处形成的金属桥漏电等，使一部分本应通过负载的电流短路，这种作用的大小可用一并联电阻 R_{Sh} 来等效。其等效电路就绘制成上图 2.16 (b) 的形式。其中暗电流等于总面积 AT 与 J_{bk} 乘积，而光电流 I_L 为电池的有效受光面积 A_E 与 J_L 的乘积，这时的结电压不等于负载的端电压，由图可见

$$V_j = IR_S + V \quad (2.47)$$

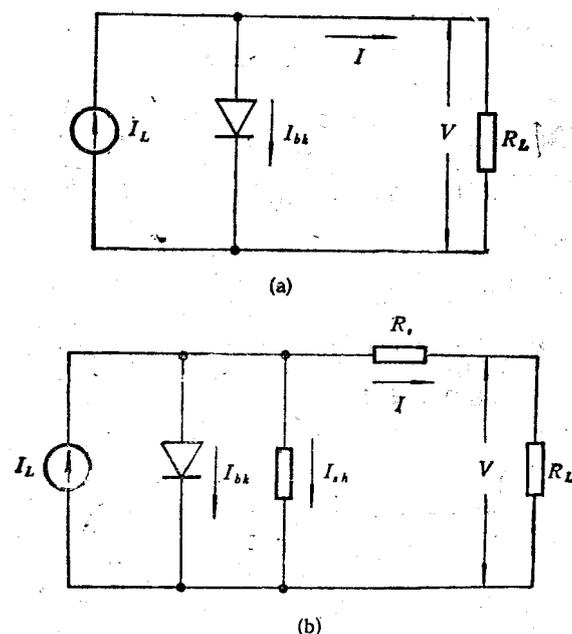


图 2.16 pn 同质结太阳能电池等效电路

(a) 不考虑串并联电阻 (b) 考虑串并联电阻

1.3.3.2 输出特性

根据上图就可以写出输出电流 I 和输出电压 V 之间的关系

$$I = \frac{R_{Sh}}{R_S + R_{Sh}} \left[I_L - \frac{V}{R_{Sh}} - I_{bk}(V) \right] \quad (2.48)$$

其中暗电流 I_{bk} 应为结电压 V_j 的函数，而 V_j 又是通过式 (2.47) 与输出电压 V 相联系的。

当负载 R_L 从 0 变化到无穷大时，输出电压 V 则从 0 变到 V_{oc} ，同时输出电流便从 I_{sc} 变到 0，由此得到电池的输出特性曲线，如图 2.17 所示。曲线上任何一点都可以作为工作点，工作点所对应的纵横坐标，即为工作电流和工作电压，其乘积

$$P=IV$$

为电池的输出功率

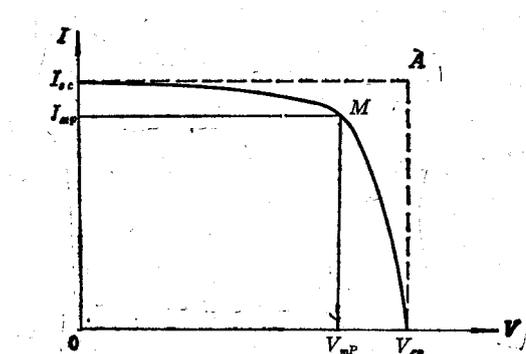


图 2.17 太阳能电池的输出特性

1.3.4 转换效率

转换效率表示在外电路连接最佳负载电阻 R 时，得到的最大能量转换效率，其定义为

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{P_{in}}$$

即电池的最大功率输出与入射功率之比，

这里我们定义一个填充因子 FF 为

$$FF = \frac{I_{mp} V_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.49)$$

填充因子正好是 I - V 曲线下最大长方形面积与乘积 $V_{oc} \times I_{sc}$ 之比，所以转换效率可表示为

$$\eta = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (2.50)$$

1.3.5 太阳能电池的光谱响应

太阳能电池的光谱响应是指光电流与入射光波长的关系，设单位时间波长为 λ 的光入射到单位面积的光子数为 $\Phi_0(\lambda)$ ，表面反射系数为 $\rho(\lambda)$ ，产生的光电流为 J_L ，则光谱响应 $SR(\lambda)$ 定义为

$$SR(\lambda) = \frac{J_L(\lambda)}{q\Phi_0(\lambda)[1 - \rho(\lambda)]} \quad (2.51)$$

其中 $J_L = J_L|_{\text{顶层}} + J_L|_{\text{势垒}} + J_L|_{\text{基区}}$ 。

理想吸收材料的光谱响应应该是：当光子能量 $h\nu < E_g$ 时， $SR=0$ ； $h\nu > E_g$ 时， $SR=1$ 。

1.3.6 太阳能电池的温度效应

载流子的扩散系数随温度的增高而增大，所以少数载流子的扩散长度也随温度的升高

稍有增大，因此，光生电流 J_L 也随温度的升高有所增加。但是 J_0 随温度的升高是指数增大，因而 V_{oc} 随温度的升高急剧下降。当温度升高时， $I-V$ 曲线形状改变，填充因子下降，所以转换效率随温度的增加而降低。

1.3.7 太阳电池的辐照效应

作为人造卫星和宇宙飞船的电源，太阳电池已获得了广泛的应用。但是在外层空间存在着高能粒子，如电子、质子、 γ 粒子等。高能粒子辐照时通过与晶格原子的碰撞，将能量传给晶格，当传递的能量大于某一阈值时，便使晶格原子发生位移，产生晶格缺陷，如填隙原子、空位、缺陷簇、空位-杂质复合体等。这些缺陷将起复合中心的作用，从而降低少子寿命。大量研究工作表明，寿命参数对辐照缺陷最为灵敏，也正因为辐照影响了寿命值，从而使太阳电池性能下降。

1.4 影响太阳电池转换效率的因素

一、禁带亮度

V_{oc} 随 E_g 的增大而增大，但另一方面， J_{sc} 随 E_g 的增大而减小。结果是可期望在某一个确定的 E_g 随处出现太阳电池效率的峰值。

二、温度

随温度的增加，效率 η 下降。 I_{sc} 对温度 T 很敏感，温度还对 V_{oc} 起主要作用。

对于 Si，温度每增加 1°C ， V_{oc} 下降室温值的 0.4%， η 也因而降低约同样的百分数。例如，一个硅电池在 20°C 时的效率为 20%，当温度升到 120°C 时，效率仅为 12%。又如 GaAs 电池，温度每升高 1°C ， V_{oc} 降低 1.7mV 或降低 0.2%。

三、复合寿命

希望载流子的复合寿命越长越好，这主要是因为这样做 I_{sc} 大。在间接带隙半导体材料如 Si 中，离结 $100\mu\text{m}$ 处也产生相当多的载流子，所以希望它们的寿命能大于 $1\mu\text{s}$ 。在直接带隙材料，如 GaAs 或 Ga_2S 中，只要 10ns 的复合寿命就已足够长了。长寿命也会减小暗电流并增大 V_{oc} 。

达到长寿命的关键是在材料制备和电池的生产过程中，要避免形成复合中心。在加工过程中，适当而且经常进行工艺处理，可以使复合中心移走，因而延长寿命。

四、光强

将太阳光聚焦于太阳电池，可使一个小小的太阳电池产生出大量的电能。设想光强被浓缩了 X 倍，单位电池面积的输入功率和 J_{sc} 都将增加 X 倍，同时 V_{oc} 也随着增加 $(kT/q) \ln X$ 倍。因而输出功率的增加将大大超过 X 倍，而且聚光的结果也使转换效率提高了。

五、掺杂浓度及剖面分布

对 V_{oc} 有明显的影响的另一因素是掺杂浓度。虽然 N_d 和 N_a 出现在 V_{oc} 定义的对数项中，它们的数量级也是很容易改变的。掺杂浓度愈高， V_{oc} 愈高。一种称为重掺杂效应的现象近年来已引起较多的关注，在高掺杂浓度下，由于能带结构变形及电子统计规律的变化，所有方程中的 N_d 和 N_a 都应以 $(N_d)_{eff}$ 和 $(N_a)_{eff}$ 代替。如图 2.18。既然 $(N_d)_{eff}$ 和 $(N_a)_{eff}$ 显现出峰值，那么用很高的 N_d 和 N_a 不会再有好处，特别是在高掺杂浓度下寿命还会减小。上图 (b) 说明了这一点。

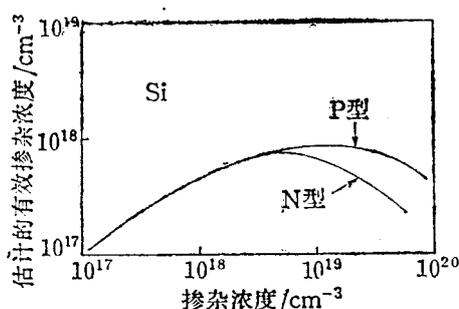


图 2.18 高掺杂效应。随掺杂浓度增加有效掺杂浓度饱和，甚至会下降

目前，在 Si 太阳能电池中，掺杂浓度大约为 10^{16} cm^{-3} ，在直接带隙材料制做的太阳能电池中约为 10^{17} cm^{-3} 。为了减小串联电阻，前扩散区的掺杂浓度经常高于 10^{19} cm^{-3} ，因此重掺杂效应在扩散区是较为重要的。

当 N_d 和 N_a 或 $(N_d)_{eff}$ 和 $(N_a)_{eff}$ 不均匀且朝着结的方向降低时，就会建立起一个电场，其方向能有助于光生载流子的收集，因而也改善了 I_{sc} 。这种不均匀掺杂的剖面分布，在电池基区中通常是做不到的；而在扩散区中是很自然的。

六、表面复合速率

低的表面复合速率有助于提高 I_{sc} ，并由于 I_0 的减小而使 V_{oc} 改善。前表面的复合速率测量起来很困难，经常被假设为无穷大。一种称为背表面场 (BSF) 电池设计为，在沉积金属接触之前，电池的背面先扩散一层 P^+ 附加层。图 2.19 表示了这种结构，在 P/P^+ 界面

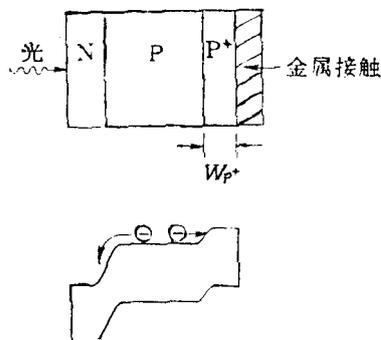


图 2.19 背表面场电池。在 P/P^+ 结处的电场妨碍电子朝背表面流动

存在一个电子势垒，它容易做到欧姆接触，在这里电子也被复合，在 P/P^+ 界面处的复合速

率可表示为

$$S_n = \frac{N_a}{N_a^+} \frac{D_{n^+}}{L_{n^+}} \coth \frac{W_{p^+}}{L_{n^+}} \quad (2.52)$$

其中 N_a^+ , D_{n^+} 和 L_{n^+} 分别是 P^+ 区中的掺杂浓度、扩散系数和扩散长度。如果 $W_{p^+}=0$, 则 $S_n=\infty$, 正如前面提到的。如果 W_{p^+} 与 L_{n^+} 能比拟, 且 $N_a^+ \gg N_a$, 则 S_n 可以估计零, S_n 对 J_{sc} 、 V_{oc} 和 η 的影响见图 2.20。当 S_n 很小时, J_{sc} 和 η 都呈现出一个峰。

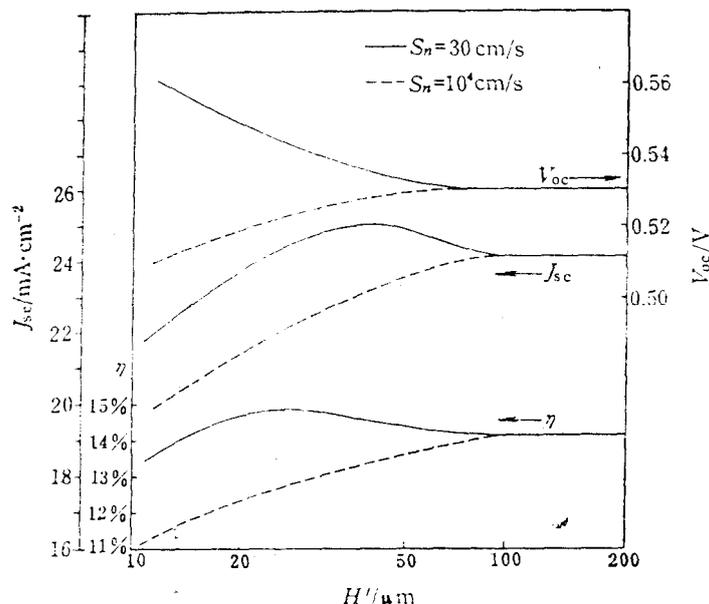


图 2.20 背表面复合速率对电场参数的影响。注意, S_n 较小时, 在某个电池厚度出现 η 峰

七、串联电阻

在任何一个实际的太阳电池中, 都存在着串联电阻, 其来源可以是引线、金属接触栅或电池体电阻。不过通常情况下, 串联电阻主要来自薄扩散层。PN 结收集的电流必须经过表面薄层再流入最靠近的金属导线, 这就是一条存在电阻的路线, 显然通过金属线的密布可以使串联电阻减小。一定的串联电阻 R_s 的影响是改变 $I-V$ 曲线的位置。

八、金属栅和光反射

在前表面上的金属栅线不能透过阳光。为了使 I_{sc} 最大, 金属栅占有的面积应最小。为了使 R_s 小, 一般是使金属栅做成又密又细的形状。

因为有太阳光反射的存在, 不是全部光线都能进入 Si 中。裸 Si 表面的反射率约为 40%。使用减反射膜可降低反射率。对于垂直地投射到电池上的单波长的光, 用一种厚为 $1/4$ 波长、折射率等于 \sqrt{n} (n 为 Si 的折射率) 的涂层能使反射率降为零。对太阳光, 采用多层涂层能得到更好的效果。

1.5 小结

许多结构，如 PN 结和金属半导体结，具有明显的单向导电的 I-V 特性。在照明条件下，它们的 I-V 曲线沿电流轴平移，接上负载后，该器件在正电压和正电流象限工作，给负载提供功率。

一个太阳电池的转换效率是其输出功率与输入功率之比。为获取高效率，希望有大的短路电流，高的开路电压和大的填充因子，如果太阳电池用禁带宽度 (E_g) 小的材料做成，则短路电流较大。好的制造工艺及好的电池设计因载流子复合最小，也能使短路电流提高。太阳电池若用 E_g 大的材料做成，则具有较高的开路电压。填充因子是 I-V 曲线拐点处陡度的量度，串联电阻可使它变小。通常开路电压较高时，FF 也较大。转换效率随光强增大而增大，随温度降低也增大。

用 E_g 值介于 1.2~1.6eV 的材料做成太阳电池，可望达到最高效率。薄膜电池用直接带隙半导体更为可取，因为它能在表面附近吸收光子。

第二章 硅太阳能电池常规工艺

自1953年研制出具有一定光电转换效率的硅太阳能电池后，便被主要应用于空间飞行器的能源系统。最早在尖兵一号卫星上装备了太阳电池，从此，太阳电池在空间的应用不断扩大。

相应地，研制了生产满足空间电池的标准电池工艺流程。该工艺在六十年代和七十年代初期一直被沿用。

到七十年代中期，由于石油危机，人们将注意力投到新能源上。一些企业开始生产专门用于地面的电池，生产电池的工艺有了某些重大的改变。其基本工艺可以归纳为下列步骤：

- 1、砂子还原成冶金级硅
- 2、冶金级硅提纯为半导体级硅
- 3、半导体级硅转变为硅片
- 4、硅片制成太阳电池
- 5、太阳电池封装成电池组件

2.1 硅材料的制备与选取

硅是地球外壳第二位最丰富的元素，提炼硅的原料是 SiO_2 。在目前工业提炼工艺中，一般采用 SiO_2 的结晶态，即石英砂在电弧炉中（如图3.1）用碳还原的方法冶炼得反应方程为

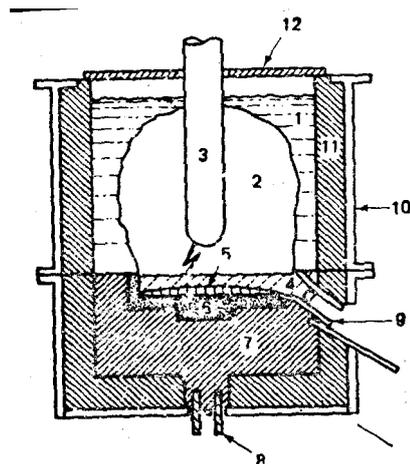
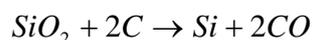


图3.1 生产冶金级硅的电弧炉的断面图

1. 碳和石英岩；2. 内腔；3. 电极；4. 硅；5. 碳化硅；
6. 炉床；7. 电极膏；8. 铜电极；9. 出料喷口；
10. 铸铁壁；11. 陶瓷；12. 石墨盖

工业硅的纯度一般为95%~99%，所含的杂质主要为Fe、Al、Ga、Mg等。

由工业硅制成硅的卤化物（如三氯硅烷，四氯化硅）通过还原剂还原成为元素硅，最后长成棒状（或针状、块状）多晶硅。习惯上把这种还原沉积出的高纯硅棒叫作多晶硅。

多晶硅经过区熔法（Fz）和坩埚直拉法（CG）制成单晶硅棒。随着太阳电池的应用从空间扩展到地面，电池生产成本成为推广应用的障碍。硅片质量直接影响成品电池的性能，它的价格在很大程度上决定了成品电池的成本。质量和价格是必须要重点考虑的因素。

降低太阳电池的成本决定于硅材料成本的降低。而硅材料成本的关键在于材料的制造方法。为了能与其它能源竞争，一般要和晶硅太阳电池的转换效率大于10%。达到这一要求实际上并不需要使用半导体级硅。人们研制、生产太阳电池级硅（SOG—Si）。我们知道一些金属（Ta、Mo、Nb、Zr、W、Ti和V）只要很低的浓度就能降低电池的性能，而另一些杂质即便浓度超过 $10^{15} / \text{cm}^2$ 仍不成问题，此浓度大约比半导体级硅的杂质浓度高100倍，这样就可以选用成本较低的工艺来生产纯度稍低的太阳电池级硅，而仍旧能制造性能比较好的电池。为了进一步降低电池成本，人们还在研究单晶硅。如图3.2和图3.3

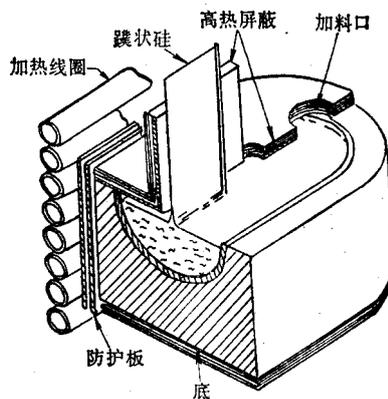


图 3.2 蹼状硅生产设备示意图

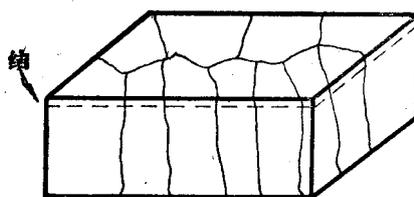


图 3.3 柱形晶粒的多晶硅太阳电池

除了价格、成本和来源难易外，根据不同用途，可以从以下几方面选用硅材料

1、导电类型：从国内外硅太阳电池生产的情况来看，多数采用P型硅材料，这是基于 n^+ / p 型电池在空间的应用及其传统的生产历史。也由于该种材料易得。

2、电阻率：由硅太阳电池的原理知道，在一定范围内，电池的开路电压随着硅基体电阻率的下降而增加，材料电阻率较低时，能得到较高的开路电压，而路电流则略低，总的转换效率较高。所以，地面应用倾向于 $0.5 \sim 3.0 \Omega \text{cm}$ 的材料。太低的电阻率。反而使

开路电压降低，并且导致填充因子下降。

3、晶向、位错、寿命

太阳能电池较多选用(111)和(100)晶向生长的单晶。由于绒面电池相对有较高的吸光性能，较多采用(100)间的硅衬底材料。在不要求太阳能电池有很高转换效率的场合，位错密度和电子寿命不作严格要求。

2.2 单体电池的制造

硅单体太阳能电池的主要制造工艺主要包括表面准备、扩散制结、制作电极和减反射膜几道工序，下面分别作一叙述：

2.2.1 硅片的表面处理

硅片的表面准备是制造硅太阳能电池的第一步主要工艺，它包括硅片的化学清洗和表面腐蚀。

2.2.1.1 硅片的化学处理

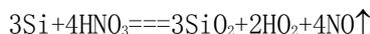
通常，由单晶棒所切割的硅片表面可能污染的杂质大致可归纳为三类：1、油脂、松香、蜡等有机物质。2、金属、金属离子及各种无机化合物。3、尘埃以及其它可溶性物质，通过一些化学清洗剂可以达到去污的目的。如硫酸、王水、酸性和碱性过氧化氢溶液等。

2.2.1.2 硅片的表面腐蚀

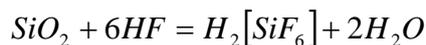
硅片经过初步清洗去污后，要进行表面腐蚀，这是由于机械切片后，在硅片表面留下的平均为30~50μm厚的损伤层，腐蚀液有酸性和碱性两类。

1、酸性腐蚀法

硝酸和氢氟酸的混合液可以起到很好的腐蚀作用，其溶液配比为浓硝酸：氢氟酸=10：1到2：1。硝酸的作用是使单质硅氧化为二氧化硅，其反应为



而氢氟酸使在硅表面形成的二氧化硅不断溶解，使反应不断进行，其反应为



生成的络合物六氟硅酸溶于水，通过调整硝酸和氢氟酸的比例，溶液的温度可控制腐蚀速度，如在腐蚀液中加入醋酸作缓冲剂，可使硅片表面光亮。一般酸性腐蚀液的配比为

硝酸：氢氟酸：醋酸==5：3：3或5：1：1

2、碱性腐蚀

硅可与氢氧化钠、氢氧化钾等碱的溶液起作用，生成硅酸盐并放出氢气，化学反应为： $\text{Si}+2\text{NaOH}+\text{H}_2\text{O}===\text{Na}_2\text{SiO}_3+2\text{H}_2\uparrow$

出于经济上的考虑，通常用较廉价的 NaOH 溶液，图 3.4 为 100℃ 下不同浓度的 NaOH 溶液对 (100) 晶向硅片的腐蚀速度。

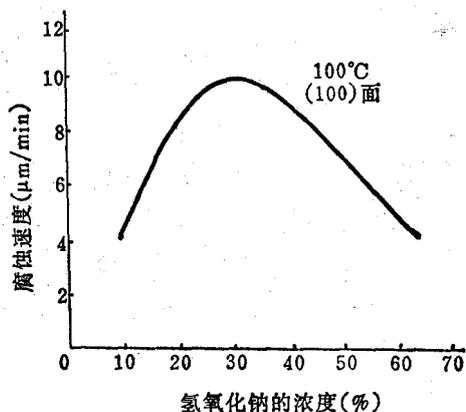


图 3.4 硅片在不同浓度 NaOH 溶液中的腐蚀速率

碱腐蚀的硅片表面虽然没有酸腐蚀光亮平整，但制成的电池性能完全相同，目前，国内外在硅太阳能电池生产中的应用表明，碱腐蚀液由于成本较低，对环境污染较小，是较理想的硅表面腐蚀液，另外碱腐蚀还可以用于硅片的减薄技术，制造薄型硅太阳能电池。

2.2.1.3 碱面硅表面的制备

太阳能电池主要进展之一是应用了绒面硅片，绒面状的硅表面是利用硅的各向异性腐蚀，在硅表面形成无数的四面方锥体，图 3.5 为扫描电子显微镜观察到的绒面硅表面。

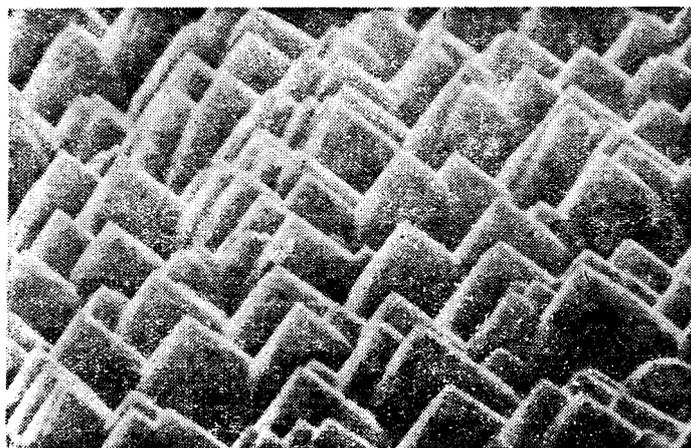


图 3.5 在扫描电镜下绒面电池表面的外貌
高 10μm 的峰是方形底面金字塔的顶。这些金字塔的侧面是硅晶体结构中相交的(111)面

由于入射光在表面的多次反射和折射，增加了光的吸收，其反射率很低，故绒面电池也称为黑电池或无反射电池。

各向异性腐蚀即腐蚀速度随单晶的不同结晶方向而变化，一般说来，晶面间的共价键密度越高，也就越难腐蚀。对于硅而言，如选择合适的腐蚀液和腐蚀温度，(100)面可比(111)面腐蚀速度大数十倍以上。因此，(100)硅片的各向异性腐蚀最终导致在表面产生许多密布的表面为(111)面的四面方锥体，由于腐蚀过程的随机性，方锥体的大小不等，以控制在 $3\sim 6\mu\text{m}$ 为宜。

硅的各向异性腐蚀液通常用热的碱性溶液，如氢氧化钠，氢氧化钾，氢氧化锂，联氨和乙二胺等，商品化电池的生产中，通常使用廉价的氢氧化钠稀溶液（浓度为 $1\sim 2\%$ ）来制备绒面硅，腐蚀温度为 80°C 左右，为了获得均匀的绒面，还应在溶液中添加醇类（如无水乙醇或异丙醇等）作为络合剂，加快硅的腐蚀。

2.2.2 扩散制结

制结过程是在一块基体材料上生成导电类型不同的扩散层，它和制结前的表面处理均是电池制造过程中的关键工序。制结方法有热扩散，离子注入，外延，激光及高频电注入法等。本节主要介绍热扩散法。

扩散是物质分子或原子运动引起的一种自然现象，热扩散制 p—n 结法为用加热方法使 V 族杂质掺入 P 型或 III 族杂质掺入 n 型硅。硅太阳能电池中最常用的 V 族杂质元素为磷，III 族杂质元素为硼。

对扩散的要求是获得适合于太阳电池 p—n 结需要的结深和扩散层方块电阻，浅结死层小，电池短波响应好，而浅结引起串联电阻增加，只有提高栅电极的密度，才能有效提高电池的填充因子，这样，增加了工艺难度，结深太深，死层比较明显，如果扩散浓度太大，则引起重掺杂效应，使电池开路电压和短路电流均下降，实际电池制作中，考虑到各个因素，太阳电池的结深一般控制在 $0.3\sim 0.5\mu\text{m}$ ，方块电阻均 $20\sim 70\Omega/\square$ ，硅太阳能电池所用的主要热扩散方法有涂布源扩散，液态源扩散，固态源扩散等，下面分别对这几种方法作简单介绍。

2.2.2.1 涂布源扩散

涂布源扩散一般分简单涂源扩散和二氧化硅乳胶源涂布扩散。

简单涂源扩散是用一、二滴五氧化二磷或三氧化二硼在水（或乙醇）中稀溶液，预先滴涂于 p 型或 n 型硅片表面作杂质源与硅反应，生成磷或硼硅玻璃。沉积在硅表面的杂质元素在扩散温度下向硅内部扩散。因而形成 pn 或 np 结。

工业生产中，涂布源方法有喷涂，刷涂，丝网印刷，浸涂，旋转涂布等。该方法成本低廉，适宜于小批量生产涂源扩散工艺的主要控制因素是扩散温度，扩散时间和杂质源浓度，最佳扩散条件常随硅片的性质和扩散设备而变化。

实例：

p 型硅片 晶向 (111)
电阻率 $1.0\Omega\text{cm}$
扩散温度 $900\sim 950^\circ\text{C}$

扩散时间 10~15min
 氮气流量 30~70ml/min
 杂质源为特纯 P_2O_5 在水或乙醇中的溶液
 表面方块电阻 20~40 Ω /□

二氧化硅乳胶实际上是一种有机硅氧烷的水解聚合物，能溶于乙醇等有机溶剂中，形成有一定粘度的溶液，它在 100~400 $^{\circ}C$ 下烧烘烤后逐步形成无定型的二氧化硅。二氧化硅乳胶可在硅酸乙酯中加水和无水乙醇经过水解而成，也可将四氯化硅通入醋酸后加乙醇制得。乳胶中适量溶解五氧化二磷或三氧化二硼等杂质，并经乙醇稀释成可用的二氧化硅乳胶源。

实例

1 Ω cm P 型硅片中，将掺杂五氧化二磷的这种源涂布，
 干燥温度 200 $^{\circ}C$
 扩散温度 800~950 $^{\circ}C$
 扩散时间 15~60min
 则可使方块电阻为 10~40 Ω /□
 结深 0.5 μ m 左右。

2.2.2.2 液态源扩散

液态源扩散有三氯氧磷液态源扩散和硼的液态源扩散，它是通过气体携带法将杂质带入扩散炉内实现扩散。其原理如图 3.6:

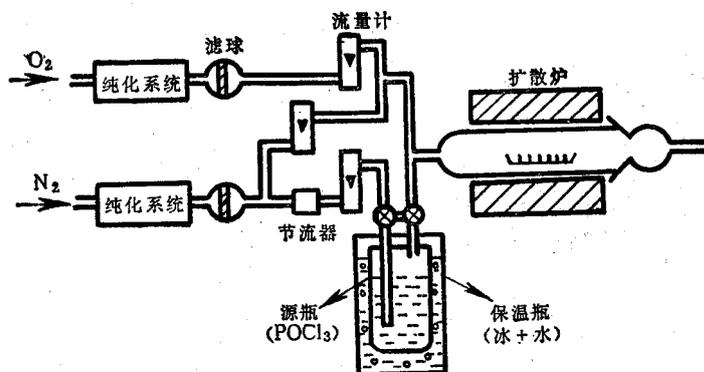


图 3.6 三氯氧磷扩散装置示意图

对于 p 型 10 Ω cm 硅片，三氯氧磷扩散过程举例如下：

(1) 将扩散炉预先升温至扩散温度 (850~900 $^{\circ}C$)。先通入大流量的氮气 (500~1000ml/min)，驱除管道内气体。如果是新处理的石英管，还应接着通源，即通小流量氮气，(40~100ml/min) 和氧气 (30~90ml/min)，使石英壁吸收饱和。

(2) 取出经过表面准备的硅片，装入石英舟，推入恒温区，在大流量氮气 (500~1000ml/min) 保护下预热 5 分钟。

- (3) 调小流量, 氮气 40~100ml/min、氧气流量 30~90ml/min。通源时间 10~15min。
 (4) 失源, 继续通大流量的氮气 5 min, 以赶走残存在管道内的源蒸气。

(5) 把石英舟拉至炉口降温 5 分钟, 取出扩散好的硅片, 硼液态源扩散时, 其扩散装置与三氯氧磷扩散装置相同, 但不通氧气。

2.2.2.3 固态氮化硼源扩散

固态氮化硼扩散通常采用片状氮化硼作源, 在氮气保护下进行扩散。片状氮化硼可用高纯氮化硼棒切割成和硅片大小一样的薄片, 也可用粉状氮化硼冲压成片。扩散前, 氮化硼片预先在扩散温度下通氧 30 分钟使氮化硼表面的三氧化二硼与硅发生反应, 形成硼硅玻璃沉积下在硅表面, 硼向硅内部扩散。扩散温度为 950~1000°C, 扩散时间 15~30 分钟, 氮气流量 2000 ml/min 以下, 氮气流量较低, 可使扩散更为均匀。

2.2.2.4 各种扩散方法的比较

扩散方法	比 较
简单涂布源扩散	设备简单, 操作方便。工艺要求较低, 比较成熟。扩散硅片中表面状态欠佳, p-n 结面不太平整, 对于大面积硅片薄层电阻值相差较大。
二氧化硅乳胶源涂布扩散	设备简单, 操作方便, 扩散硅片表面状态良好, p-n 结平整。均匀性, 重复性较好。改进涂布设备。可以适用自动化, 流水线生产。
液态源扩散	设备和操作比较复杂。扩散硅片表面状态好, p-n 结面平整, 均匀性, 重复性较好, 工艺成熟。
氮化硼固态源扩散	设备简单, 操作方便, 扩散硅片表面状态好, p-n 结面平整, 均匀性, 重复性比液态源扩散好适合于大批量生产。

2.2.3 去边

扩散过程中, 在硅片的周边表面也形成了扩散层。周边扩散层使电池的上下电极形成短路环, 必须将它除去。周边上存在任何微小的局部短路都会使电池并联电阻下降, 以至成为废品。

去边的方法有腐蚀法, 即将硅片两面掩好。在硝酸、氢氟酸组成的腐蚀液中腐蚀 30 秒钟左右。挤压法是用大小与硅片相同, 略带弹性的耐酸橡胶或塑料, 与硅片相间整齐隔开,

施加一定压力后，阻止腐蚀液渗入缝隙取得掩蔽。

目前，工业化生产用等离子干法腐蚀，在辉光放电条件下通过氟和氧交替对硅作用，去除含有扩散层的周边。

2.2.4 去除背结

去除背结常用下面三种方法，化学腐蚀法，磨沙法和蒸铝烧结，丝网印刷铝烧结法。

2.2.4.1. 化学腐法

化学腐蚀是一种比较早使用方法，该方法可同时除去背结和周边的扩散层，因此可省去腐蚀周边的工序。腐蚀后背面平整光亮，适合于制作真空蒸镀的电极。前结的掩蔽一般用涂黑胶的方法，黑胶是用真空封蜡或质量较好的沥青溶于甲苯，二甲苯或其它溶剂制成。硅片腐蚀去背结后用溶剂溶去真空封蜡，再经过浓硫酸或清洗液煮清洗。

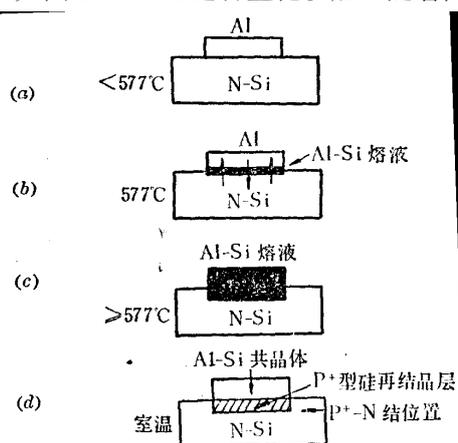
2.2.4.2 磨片法

磨片法是用金钢砂将背结磨去，也可以用压缩空气携带砂粒喷射到硅片背面除去。磨片后背面形成一个粗糙的硅表面，因此适应于化学镀镍制造的后电极。

2.2.4.3 蒸铝或丝网印刷铝浆烧结法

前两种去除背结的方法，对于 n^+ / n 和 P^+ / n 型电池都适用，蒸铝或丝网印刷铝浆烧结法仅适用于 n^+ / p 型太阳能电池制作工艺。

该方法是在扩散硅片背面真空蒸镀或丝网印刷一层铝，加热或烧结到铝—硅共熔点（577°C）以上烧结合金（如图 3.7）。经过合金化以后，随着降温，液相中的硅将重新凝固



出来，形成含有一定量的铝的再结晶层。实际上是一个对硅掺杂的过程。它补偿了背面 n^+ 层中的施主杂质，得到以铝掺杂的 p 型层，由硅—铝二元相图可知（图 3.8）随着合金温度的上升，液相中铝的比率增加。在足够的铝量和合金温度下，背面甚至能形成与前结方向相同的电场，称为背面场，目前该工艺已被用于大批量的生产工艺。从而提高了电池的开路电压和短路电流，并减小了电极的接触电阻。

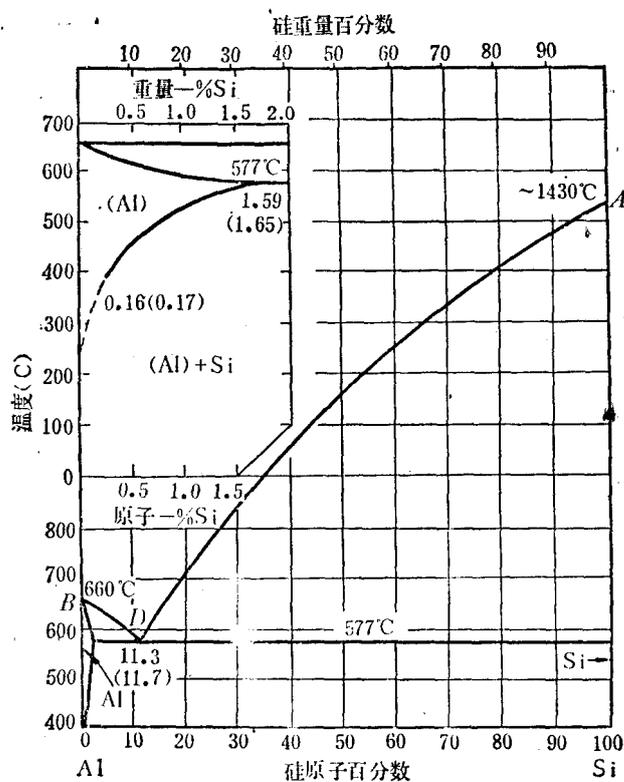
图 3.7 硅合金过程示意图

图 3.8 铝硅相图

背结能否烧穿与下列因素有关，基体材料的电阻率，背面扩散层的掺杂浓度和厚度，背面蒸镀或印刷铝层的厚度，烧结的温度，时间和气氛等因素。

2.2.5 制作上下电极

电极就是与 p-n 结两端形成紧密欧姆接触的导电材料。习惯上把制作在电池光照面上的电极称为上电极。把制作在电池背面的电极称为下极或背电极。制造电极的方法主要有真空蒸镀、化学镀镍，铝浆印刷烧结等。铝浆印刷是近几年比较成熟和在商品化电池生产中大量被采用的工艺方法。



电极及电极材料的选择:

对于制作的上下电极材料一般要满足下列要求:

- (1) 能与硅形成牢固的接触
- (2) 接触电阻比较小，应是一种欧姆接触
- (3) 有优良的导电性
- (4) 遮挡面积小，一般小于 8%
- (5) 收集效率高
- (6) 可焊性强
- (7) 成本低廉

(8) 污染比较小。

欧姆接触一般分高复合接触，低势垒接触，高掺杂接触等，制作方法有：

(1) **真空蒸镀法**

一般用光刻方法或用带电极图形掩膜的电极模具板。掩膜由线切割机，光刻加工或激光加工的不锈钢箔或镀铜箔制成。

(2) **化学镀镍制作电极**

利用镍盐（氯化镍或硫酸镍）溶液在强还原剂次磷酸盐的作用下，依靠镀件表面具有的催化作用，使次磷酸盐分解出生成原子氢将镍离子还原成金属镍，同时次磷酸盐分解析出磷，因此在镀件表面上获得镍磷合金的沉积镀层，化学镀镍的配方很多，碱性溶液用于半导体镀镍比酸性溶液好，下面是一种典型镀液的万分：

氯化镍	30g/l
氯化铵	50g/l
柠檬酸铵	65g/l
次磷酸钠	10g/l

(3) **丝网印刷制作电极**

真空蒸镀和化学镀镍制作电极的方法是一种传统的制作方法，但存在工艺成本较高，耗能量大，批量小，不适宜于自动化生产，为了降低生产成本和提高产量，人们将厚膜集成电路的丝网漏印工艺引入太阳电池的生产中。目前，该工艺已走向成熟，使线条的宽度可降到 50 μm ，高度达到 10~20 μm 。

上电极的设计的一个重要方向是上电极金属栅线的设计。当单体电池的尺寸增加时，这方面就变得愈加重要。图 3.9 为几种在地面应用电池中使用的上电极的设计方法。对于普通的电极设计，设计原则是使电池的输出最大，即电池的串联电阻尽可能小和电池的光照作用面积尽可能大。

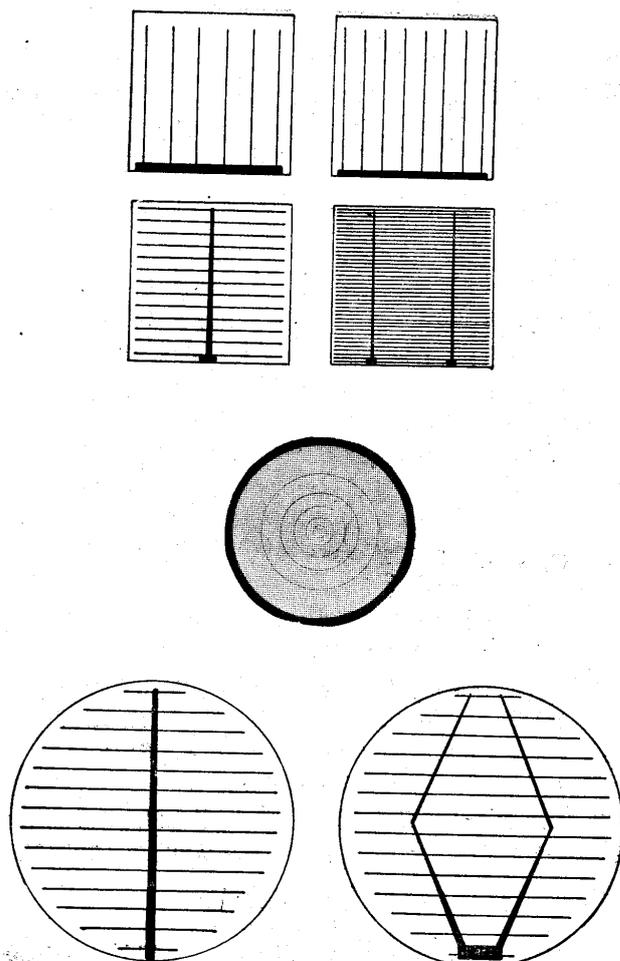


图 3.9 常见的上电极图形

金属电极一般由两部分构成如图 3.10 所示，主线是直接将电流输到外部的较粗部分，栅线则是为了把电流收集起来传递到主线上去的较细的部分。如图 3.10 (a) 那样的对称分布可以分解成如图 3.10 (b) 所示的一个个的单体电池。这种单电池的最大输出功率可由 $ABJ_{mp}V_{mp}$ 得到，式中 AB 为单电池的面积， J_{mp} 和 V_{mp} 分别为最大功率点的电流密度和电压。用单电池的最大功率输出归一化后，得到栅线和主线的电阻功率损耗分别为

$$\rho_{rf} = \frac{1}{m} B^2 \rho_{smf} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{S}{W_F} \quad (1)$$

$$\rho_{rb} = \frac{1}{m} A^2 B \rho_{smb} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{1}{W_B} \quad (2)$$

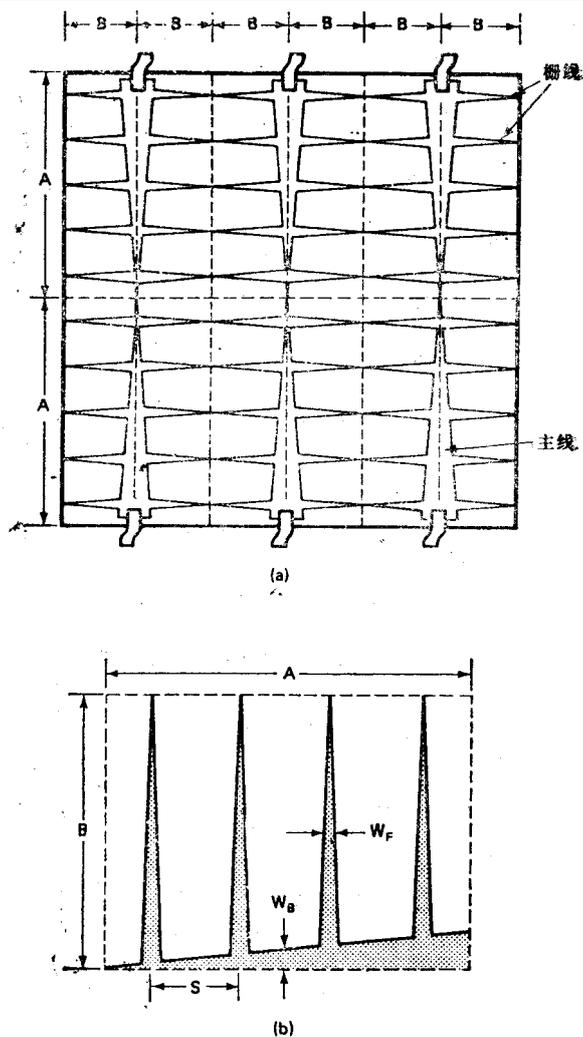


图 3.10

(a) 示出主线和栅线的上电极设计的示意图。图中也表示出这个设计的对称性。根据这种对称性电极可以分解成 12 个相同的单电池；(b) 典型的单电池的重要尺寸

ρ_{smf} 和 ρ_{smb} 分别为电极的栅线和主线的金属层的薄层电阻。在某些情况下，这两种电阻是相等的。而在另一些情况下，如浸过锡的电池，在较宽的主线上又盖了一层较厚的锡， ρ_{smb} 就比较小。如果电极各部分是线性地逐渐变细的，则 m 值为 4，如果宽度是均匀的，则 m 值为 3。 W_F 和 W_b 是单电池栅线和主线的平均宽度。 S 是栅线的线距。

由于栅线和主线的遮挡而引起的功率损失是：

$$\rho_{sf} = \frac{W_F}{S} \quad (3)$$

$$\rho_{sb} = \frac{W_b}{S} \quad (4)$$

忽略直接由半导体到主线的电流，接触电阻损耗仅仅是由于栅线所引起的，这部分功率损耗一般近似为

$$\rho_{cf} = \rho_c \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \frac{S}{W_F} \quad (5)$$

其中 ρ_c 是接触电阻率。对于硅电池来说，在一个太阳下工作时，接触电阻损耗一般不是主要问题。余下的是由于在电池的顶层横向电池所引起的损耗。其归一化形式为

$$P_{tl} = \frac{\rho_s}{12} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} S^2 \quad (6)$$

其中 ρ_s 是电池表面扩散层的方块电阻。

主线的最佳尺寸可以由(2)和(4)式相加，然后对 W_B 求导而得出。结果为当主线的电阻损耗等于其遮挡损失时，其尺寸最佳，这时，

$$W_B = AB \sqrt{\frac{\rho_{smb} J_{mp}}{m V_{mp}}} \quad (7)$$

同时，这部分功率损失的最小值由下式得出：

$$(\rho_{rb} + \rho_{sb})_{\min} = 2A \sqrt{\frac{\rho_{smb} J_{mp}}{m V_{mp}}} \quad (8)$$

这表明使用逐渐变细的主线（ $m=4$ ）而不是等宽度的主线时（ $m=3$ ），功率损失大约低13%。

从上面一些式子可看出，单从数字上讲，当栅线的间距变得非常小以致横向电流损耗可忽略不计时，出现最佳值。于是，最佳值由下面条件给出，即

$$\delta \rightarrow 0$$

$$\frac{W_F}{S} = B \sqrt{\frac{\rho_{smf} + \rho_c m / B^2}{m} \cdot \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (9)$$

$$\text{即：} \quad (\rho_{rf} + \rho_{cf} + \rho_{sf} + \rho_{tl})_{\min} = 2B \sqrt{\frac{\rho_{smf} + \rho_c m / B^2}{m} \cdot \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (10)$$

实际上，不可能得到这个最佳值，在特定的条件下，要保持产品有较高的成品率， W_F 及 S 的最小值均受到工艺条件的限制。

在这种情况下，可通过简单的迭代法实现最佳栅线的设计。若把栅线宽度 W_F 取作在特定工艺条件下的最小值，则对应于这个最小的 S 值能够用渐近法求出，对某个设定值 S' ，可计算出相应的各部分功率损失 ρ_{sf} ， ρ_{cf} ， ρ_{sf} 和 ρ_{st} 。然后可按下式求出一个更接近最佳值的值 S''

$$S'' = \frac{S'(3\rho_{sf} - \rho_{rf} - \rho_{cf})}{2(\rho_{sf} + \rho_{tl})} \quad (11)$$

这个过程将很快收敛到相应于最佳值的一个不变的值上。从式（10）计算的 S 值是一个过高的估计值，由此可求出最佳的初试值。用式（10）所算出的 S 值的一半作初试值即可得出一个稳定的迭代结果。

对于下电极的要求是尽可能布满背面，对于丝网印刷，覆盖面积将影响到填充因子。

2.2.6 减反射膜制作

光照射到平面的硅片上，其中一部分被反射，即使对绒面的硅表面，由于入射光产生多次反射而增加了吸收，但也有约 11% 的反射损失。在其上覆盖一层减反射膜层，可大大降低光的反射，图 3.11 中示出四分之一波长减反射膜的原理。从第二个界面返回到第一个界面的反射光与第一个界面的反射光相位差 180°，所以前者在一定程度上抵消了后者。

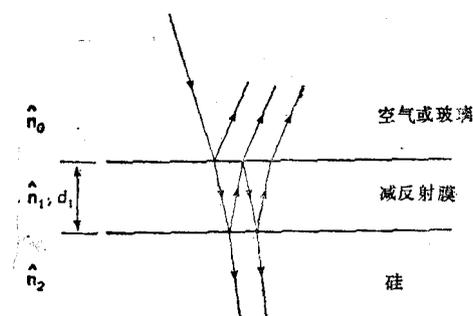


图 3.11 由四分之一波长减反射膜产生的干涉效应

在正常入射光束中从覆盖了一层厚度为 d_1 的透明层的材料表面反射的能量所占比例的表达式为

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \theta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta} \quad (12)$$

其中 r_1 、 r_2 由下式得出：

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (13)$$

式中 n_i 代表不同媒质层的折射率。由下式给出：

$$\theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad (14)$$

当 $n_1 d_1 = \lambda_0 / 4$ 时，反射有最小值：

$$R_{\min} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \quad (15)$$

如果反射率是其两边材料的折射率的几何平均值 ($n_1^2 = n_0 n_2$)，则反射值为零。对于在空气中的硅电池 ($n_{\text{si}} = 3.8$)，减反射膜的最佳折射率是硅折射率的平方根 (即 $n_{\text{opt}} = 1.9$)。图

3.12 中有一条曲线表示出在硅表面覆盖有最佳折射率 (1.9) 的减反射膜的情况下, 从硅表面反射的入射光的百分比与波长的关系。

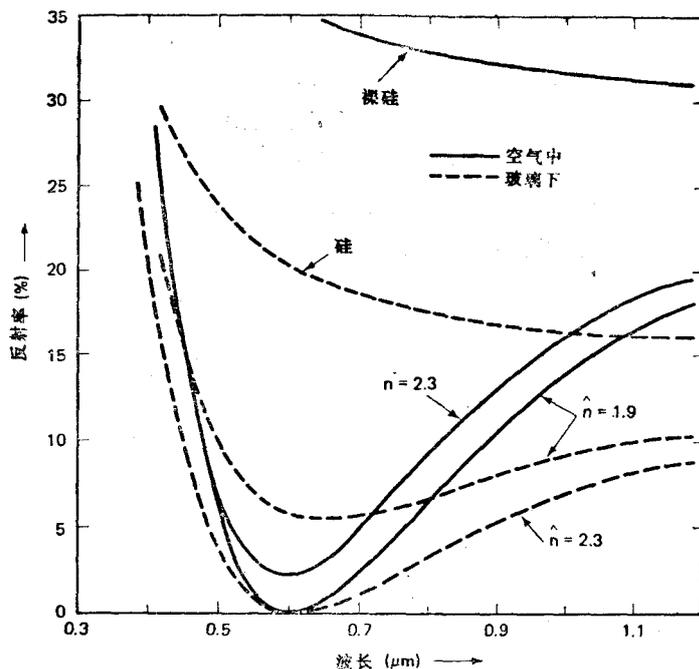


图 3.12 从裸露的硅表面和从覆盖有折射率为 1.9 和 2.3 的减反射膜的硅表面反射的正常入射光的百分比与波长的关系
减反射膜的厚度的选取使得波长在 600nm 处产生最小的反射。虚线表示将硅封装在玻璃或有类似折射率的材料之下的结果

电池通常是装在玻璃之下 ($n_0=1.5$)。这使减反射膜的折射率的最佳值增加到大约 2.3。覆盖有折射率为 2.3 的减反膜的电池在封装前为封装后对光的反射情况也表示在图 12 中。商品化太阳电池中使用的一些减反射膜材料的折射率如下表。除了有合适的折射率外, 减反射膜材料还必须是透明的, 减反射膜常沉积为非结晶的或无定形的薄层, 以防止在晶界处的光散射问题。

表: 制作减反射膜所用材料的折射系数

材料	折射系数
MgF ₂	1.3~1.4
SiO ₂	1.4~1.5
Al ₂ O ₃	1.8~1.9
SiO	1.8~1.9
Si ₃ N ₄	~1.9
TiO ₂	~2.3
Ta ₂ O ₅	2.1~2.3
ZnS	2.3~2.4

减反膜的制备方法:

真空镀	SiO	类金刚石膜
溅射法	Ta ₂ O ₅	IT 膜
	Nb ₂ O ₅	SiO ₂ TiO ₂
印刷法	TiO	Ta ₂ O ₅
喷涂法	Ti(OC ₂ H ₅) ₄	钛酸乙酰
PECVD 沉积	Si ₃ N ₄	

2.3 太阳电池组件及封装

单体太阳电池不能直接作电池使用。作电源用必须将若干单体电池串、并联连接并严密封装成组件。对太阳电池组件要求为:

- (1) 有一定的标称工作电流输出功率。
- (2) 工作寿命长, 要求组件能正常工作 20~30 年, 因此要求组件所使用的材料, 零部件及结构, 在使用寿命上互相一致, 避免因一处损坏而使整个组件失效。
- (3) 有足够的机械强度, 能经受在运输、安装和使用过程中发生的冲突, 振动及其它应力。
- (4) 组合引起的电性能损失小。
- (5) 组合成本低。

2.3.1 太阳电池组件的常见结构形式

常规的太阳电池组件结构形式有下列几种, 玻璃壳体式结构如图 3.13, 底盒式组件如图 3.14, 平板式组件如图 3.15, 无盖板的全胶密封组件如图 3.16。目前还出现较新的双面钢化玻璃封装组件。

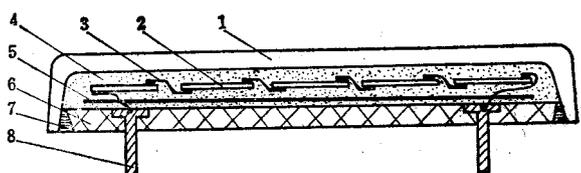


图 3.13 玻璃壳体式太阳电池组件示意图

1—玻璃壳体；2—硅太阳电池；3—互连条；4—粘接剂；
5—衬底；6—下底板；7—边框线；8—电极接线柱。

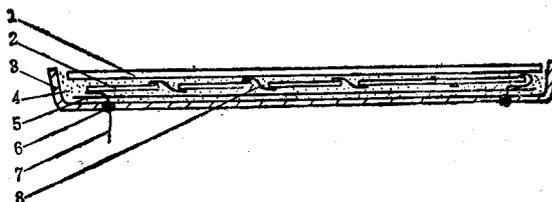


图 3.14 底盒式太阳电池组件示意图

1—玻璃盖板；2—硅太阳电池；3—盒式下底板；4—粘接剂；5—衬底；

6—固定绝缘胶；7—电极引线；8—互连条。

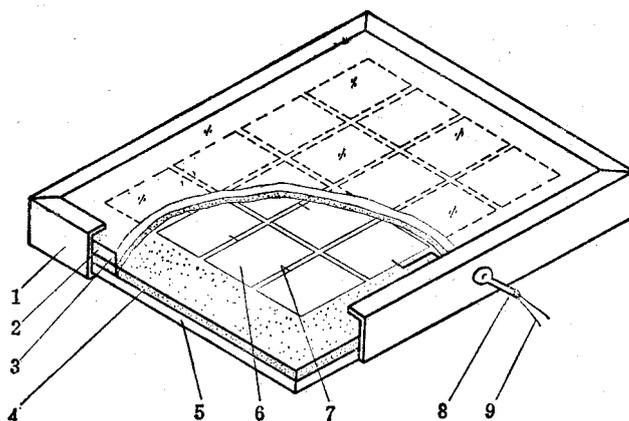


图 3.15 平板式太阳能电池组件示意图

1—边框；2—边框封装胶；3—上玻璃盖板；4—粘接剂；5—下底板；
6—硅太阳能电池；7—互连条；8—引线护套；9—电极引线。

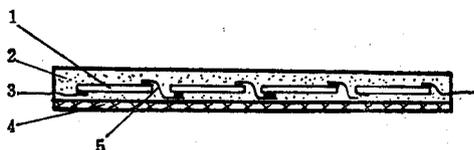


图 3.16 全胶密封太阳能电池组件示意图

1—硅太阳能电池；2—粘接剂；3—电极引线；4—下底板；5—互连条。

2.3.2 太阳能电池组件的封装材料

组件工作寿命的长短和封装材料，封装工艺有很大的关系，它的长短是决定组件寿命的重要因素之一。在组件中它是一项易被忽视但在实用中是决不能轻视的部件。现对材料分述如下。

2.3.2.1 上盖板

上盖板覆盖在太阳能电池组件的正面，构成组件的最外层，它既要透光率高，又要坚固，起到长期保护电池的作用。

作上盖板的材料有：钢化玻璃、聚丙烯酸类树脂、氟化乙烯丙烯、透明聚酯、聚碳酸酯等。目前，低铁钢化玻璃为最为普遍的上盖板材料

2.3.2.2 粘结剂

主要有：室温固化硅橡胶、氟化乙烯丙烯、聚乙烯醇缩丁醛、透明双氧树脂、聚醋酸乙烯等。一般要求其：

- (1) 在可见光范围内具有高透光性
- (2) 具有弹性
- (3) 具有良好的电绝缘性能。

(4) 能适用自动化的组件封装

2.3.2.3 底板

一般为钢化玻璃、铝合金、有机玻璃、TPF 等。

目前较多应用的是 TPF 复合膜，要求：

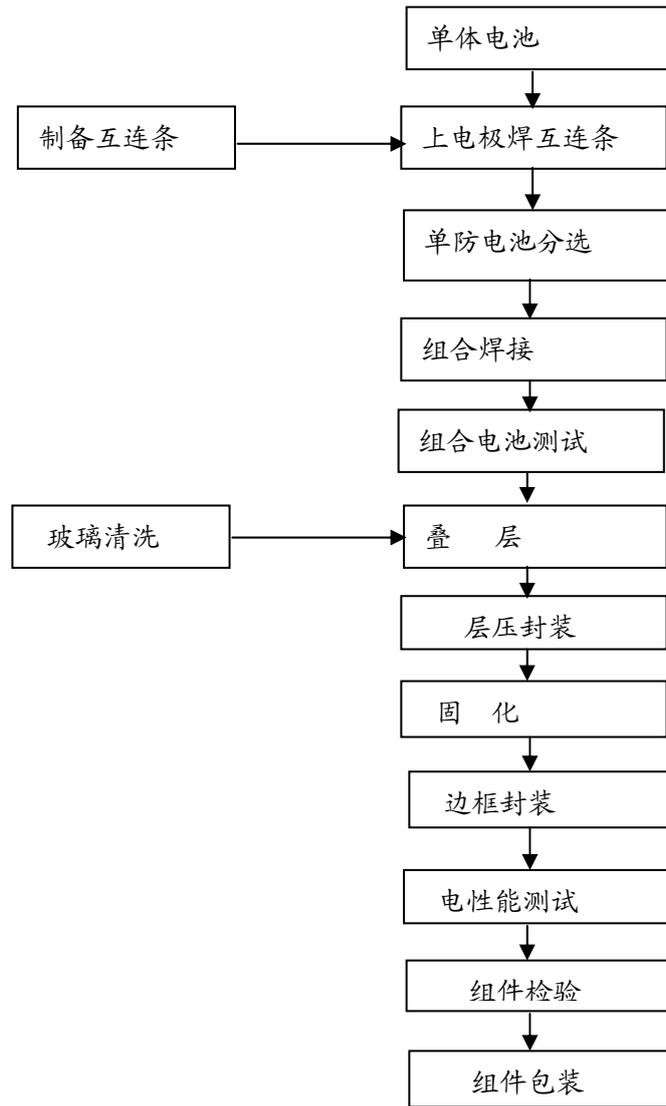
- (1) 具有良好的耐气候性能
- (2) 层压温度下不起任何变化
- (3) 与粘接材料结合牢固

2.3.2.4 边框

平板组件必须有边框，以保护组件和组件与方阵的连接固定。边框为粘结剂构成对组件边缘的密封。主要材料有不锈钢，铝合金，橡胶，增强塑料等。

2.3.3 组件制造工艺

平板式组件制造工艺流程如下：



第三章 太阳电池测试

3.1 太阳模拟器

3.1.1 概述

太阳电池是将太阳能转变成电能的半导体器件，从应用和研究的角度来考虑，其光电转换效率、输出伏安特性曲线及参数是必须测量的，而这种测量必须在规定的标准太阳光下进行才有参考意义。如果测试光源的特性和太阳光相差很远，则测得的数据不能代表它在太阳光下使用时的真实情况，甚至也无法换算到真实的情况，考虑到太阳光本身随时间、地点而变化，因此必须规定一种标准阳光条件，才能使测量结果既能彼此进行相对比较，又能根据标准阳光下的测试数据估算出实际应用时太阳电池的性能参数。

3.1.2 太阳辐射的基本特性

3.1.2.1 几个描述光的物理概念：

(1) 发光强度。按照 1979 年第 16 届国防计量会议 (CGPN) 确定，以坎德拉 (cd) 为发光强度的计量单位。坎德拉是一光源在给定的方向上的光强度，该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的光学辐射，且在此方向上的辐射强度为 $1/683 \text{ Wsr}^{-1}$

(2) 光通量。光通量的单位是流明 (lm)，它用来计量所发出的总光量，发光强度为 1cd 的点光源，向周围空间均匀发出 4π 流明的光能量。

(3) 光强度。指照射于一表面的光强度，它用勒克斯 (lx) 作为单位，当 1lm 光通量的光强射到 1m^2 面积上时，该面积所受的光照度 (简称照度) 就是 1lx。

(4) 辐射度，通常称为光强，即入射到单位面积上的光功率，单位是 W/m^2 或 mw/cm^2 。

3.1.2.2 辐照度及其均匀性

对空间应用，规定的标准辐照度为 1367 w/m^2 (另一种较早的标准规定为 1353 w/m^2)，对地面应用，规定的标准辐照度为 1000 w/m^2 。实际上地面阳光和很多复杂因素有关，这一数值仅在特定的时间及理想的气候和地理条件下才能获得。地面上比较常见的辐射照度是在 $600 \sim 900 \text{ w/m}^2$ 范围内，除了辐照度数值范围以外，太阳辐射的特点之一是其均匀性，这种均匀性保证了同一太阳电池方阵上各点的辐照度相同。

3.1.2.3 光谱分布

太阳电池对不同波长的光具有不同的响应，就是说辐照度相同而光谱成分不同的光照射到同一太阳电池上，其效果是不同的，太阳光是各种波长的复合光，它所含的光谱成分组成光谱分布曲线，而且其光谱分布也随地点、时间及其它条件的差异而不同，在大气层外情况很单纯，太阳光谱几乎相当于 6000K 的黑体辐射光谱，称为 AM0 光谱。在地面上，由于太阳光透过大气层后被吸收掉一部分，这种吸收和大气层的厚度及组成有关，因此是选择性吸收，结果导致非常复杂的光谱分布。而且随着太阳天顶角的变化，阳光透射的途径不同吸收情况也不同。所以地面阳光的光谱随时都在变化。因此从测试的角度来考虑，需要规定一个标准的地面太阳光谱分布。目前国内外的标准都规定，在晴朗的气候条件下，当太阳透过大气层到达地面所经过的路程为大气层厚度的 1.5 倍时，其光谱为标准地面太阳光谱，简称 AM1.5 标准太阳光谱。此时太阳的天顶角为 48.19°，原因是这种情况在地面上比较有代表性。

3.1.2.4 总辐射和间接辐射

在大气层外，太阳光在真空中辐射，没有任何漫射现象，全部太阳辐射都直接从太阳照射过来。地面上的情况则不同，一部分太阳光直接从太阳照射下来，而另一部分则来自大气层或周围环境的散射，前者称为直接辐射，后者称为天空辐射。二部分合起来称为总辐射，在正常的大气条件下，直接辐射占总辐射的 75% 以上，否则就是大气条件不正常所致，例如由于云层反射或严重的大气污染所致。

3.1.2.5 辐照稳定性

天气晴朗时，阳光辐照是非常稳定的，仅随高度角而缓慢的变化，当天空有浮云或严重的气流影响时才会产生不稳定现象，这种气候条件不适宜于测量太阳电池，否则会得到不确定的结果。

3.2 太阳模拟器

综上所述，标准地面阳光条件具有 1000 w/m^2 的辐照度，AM1.5 的太阳光谱以及足够好的均匀性和稳定性，这样的标准阳光在室外能找到的机会很少，而太阳电池又必须在这种条件下测量，因此，唯一的办法是用人造光源来模拟太阳光，即所谓太阳模拟器。

3.2.1 稳态太阳模拟器和脉冲式太阳模拟器

稳态太阳模拟器是在工作时输出辐照度稳定不变的太阳模拟器，它的优点是能提供连续照射的标准太阳光，使测量工作能从容不迫的进行。缺点是为了获得较大的辐照面积，它的光学系统，以及光源的供电系统非常庞大。因此比较适合于制造小面积太阳模拟器，脉冲式太阳模拟器在工作时并不连续发光，只在很短的时间内（通常是毫秒量级以下）以脉冲形式发光。其优点是瞬间功率可以很大，而平均功率却很小。其缺点是由于测试工作在极短的时间内进行，因此数据采集系统相当复杂，在大面积太阳电池组件测量时，目前一般都采用脉冲式太阳模拟器，用计算机进行数据采集和处理。

3.2.2 太阳模拟器的电光源及滤光装置

用来装置太阳模拟器的电光源通常有以下几种：

卤光灯：简易型太阳模拟器常用卤光灯来装置。但卤光灯的色温值在 2300K 左右，它的光谱和日光相差很远，红外线含量太多，紫外线含量太少。作为廉价的太阳模拟器避免采用昂贵的滤光设备，通常用 3cm 厚的水膜来滤除一部分红外线，使它近红外区的光谱适当改善，但却无法补充过少的紫外线。

冷光灯：冷光灯是由卤钨灯和一种介质膜反射镜构成的组合装置。这种反射镜对红外线几乎是透明的，而对其余光线却能起良好的反射作用。因此经反射后红外线大大减弱而其它光线却成倍增加。和卤钨灯相比，冷光灯的光谱有了大幅度的改善，而且避免了非常累赘的水膜滤光装置。因此目前简易型太阳模拟器多数采用冷光灯。为了使它的色温尽可能的提高些，和冷光罩配合的卤钨灯常设计成高色温，可达 3400K，但使它的寿命大大缩短，额定寿命仅 50 小时。因此需经常更换。

氙灯：氙灯的光谱分布从总的情况来看比较接近于日光，但在 0.8 μ ~0.1 μ 之间有红外线，比太阳光大几倍。因此必须用滤光片滤除，现代的精密太阳模拟器几乎都用氙灯作电源，主要原因是光谱比较接近日光，只要分别加上不同的滤光片即可获得 AM0 或 AM1.5 等不同的太阳光谱。氙灯模拟器的缺点从光学方面来考虑是它的光斑很不均匀，需要有一套复杂的光学积分装置来使光斑均匀。从电路来考虑是它需要一套复杂而比较庞大的电源及起辉装置。总的来说，氙灯模拟器的缺点是装置复杂，价格昂贵，特别是有效辐照面积很难做得很大。

脉冲氙灯：脉冲式太阳模拟选用各种脉冲氙灯作为光源，这种光源的特点是能在短时间内发出比一般光源强若干倍的强光，而且光谱特性比稳态氙灯更接近于日光。由于亮度高通常可放在离太阳电池较远的位置进行测量，因此改善了辐照均匀性，可得到大面积的均匀光斑。

3. 3 太阳模拟器某些光学特性的检测

3. 3. 1 辐照不均匀度的检测

辐照不均匀度是对测试平面上不同点的辐照度来说，当辐照度不随时间改变时，辐照度不随时间改变时，辐照不均匀度按下式计算：

$$\text{辐照不均匀度} = \pm (\text{最大辐照度} - \text{最小辐照度}) / (\text{最大辐照度} + \text{最小辐照度}) \times 100\%$$

在测量单体电池时，辐照不均匀度应使用不超过待测电池面积 1/4 的检测电池来检测。在测量组件时，应使用不超过待测组件面积 1/10 的检测电池来检测。

3. 3. 2 辐照不稳定的检测

测试平面上同一点的辐照度随时间改变时。辐照不稳定性按下式计算

$$\text{辐照不稳定性} = \pm (\text{最大辐照度} - \text{最小辐照度}) / (\text{最大辐照度} + \text{最小辐照度})$$

3. 3. 3 光谱失配误差计算

$$\text{光谱失配误差} = \int_0 [F_{T,AM1.5}(\lambda) - F_{S,AM1.5}(\lambda)] [B(\lambda) - 1] d\lambda$$

式中： $F_{T,AM1.5}(\lambda)$ 和 $F_{S,AM1.5}(\lambda)$ 分别是被测电池（T）和标准电池（S）在AM1.5状态下的相对光谱电流，即光谱电流 $i(\lambda)$ 与短路电流 I 之比：

$$F_{T,AM1.5}(\lambda) = \frac{i_{T,AM1.5}(\lambda)}{\int i_{T,AM1.5}(\lambda) d\lambda} = \frac{i_{T,AM1.5}(\lambda)}{I_{T,AM1.5}}$$

$$F_{S,AM1.5}(\lambda) = \frac{i_{S,AM1.5}(\lambda)}{\int i_{S,AM1.5}(\lambda) d\lambda} = \frac{i_{S,AM1.5}(\lambda)}{I_{S,AM1.5}}$$

$$I_{T,AM1.5} = \int i_{T,AM1.5}(\lambda) d\lambda, \quad I_{S,AM1.5} = \int i_{S,AM1.5}(\lambda) d\lambda$$

$B(\lambda) - 1$ 定义为光谱，它表示太阳模拟器光谱辐照度 $e_{sim}(\lambda)$ 和AM1.5的光谱辐照度 $e_{AM1.5}(\lambda)$ 的相对偏差：

$$\frac{e_{sim}(\lambda) - e_{AM1.5}(\lambda)}{e_{AM1.5}} = B(\lambda) - 1$$

即
$$B(\lambda) = \frac{e_{sim}(\lambda)}{e_{AM1.5}(\lambda)}$$

由上述容易看到，在两种特殊情况下光谱失配误差消失：一种情况是太阳模拟器的光谱和标准太阳光谱完全一致，另一种情况是被测太阳能电池的光谱响应和标准太阳能电池的光谱响应完全一致。这两种特殊情况都难以严格地实现，而二种情况相比之下，后一种情况更难实现，因为待测太阳能电池是多种多样的，不可能每一片待测电池都配上和它光谱响应完全一致的标准太阳能电池。光谱响应之所难于控制，一方面出于工艺上的原因，在众多复杂因素的影响下，即使是同工艺、同结构、同材料，甚至是同一批生产出来的太阳能电池，并不能保证具有完全相同的光谱响应，另一方面来自测试的困难，光谱响应的测量要比伏安特性麻烦得多，也不易测量正确，不可能在测量伏安特性之前先把每片太阳能电池的光谱响应测量一下。因此为了改善光谱匹配，最好的办法是设计光谱分布和标准太阳光谱非常接近的精密型太阳模拟器，从而对太阳能电池的光谱响应不必再提出要求。

3.4 单体太阳能电池测试

测量太阳能电池的电性能归结为测量它的伏安特性，由于伏安特性与测试条件有关，必须在统一的规定的标准测试条件下进行测量，或将测量结果换算到标准测试条件，才能鉴定太阳能电池电性能的好坏，标准测试条件包括标准太阳光（标准光谱和标准辐照度）和标准测试温度，温度可以人工控制。标准太阳光可以人工模拟，或在自然条件下寻找。使用模拟阳光，光谱取决于电光源的种类及滤光、反光系统。辐照度可以用标准太阳能电池短路电流的标定值来校准。为了减少光谱失配误差，模拟阳光的光谱应尽量接近标准阳光光谱，或选用和被测量电池光谱响应基本相同的标准太阳能电池。

测量伏安特性的原理框图如下：

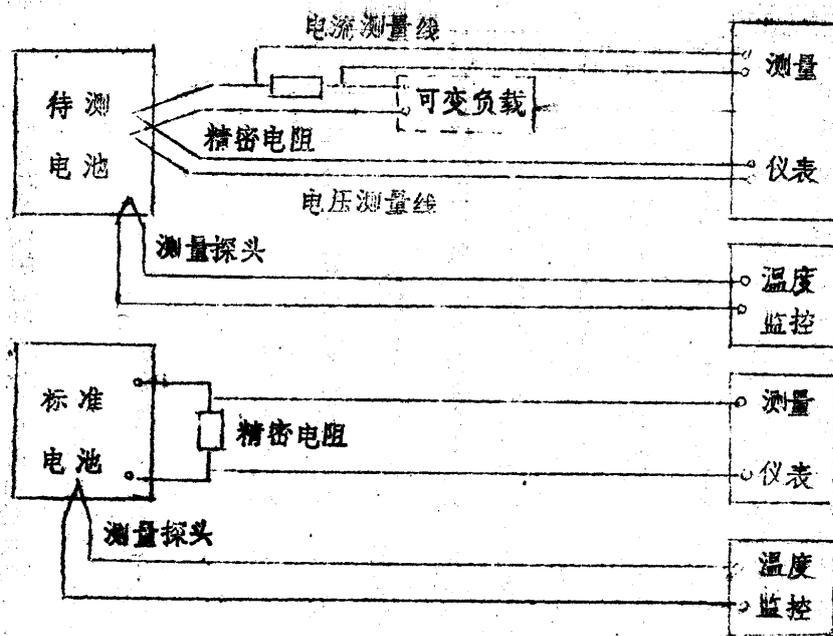


图 4.1 测量伏安特性的电路框图

注意：测量太阳能电池的电压和电流，应从被测件的端点单独引出电压线和电流线。

3.4.1 测试项目

- (1) 开路电压 V_{oc}
- (2) 短路电流 I_{sc}
- (3) 最佳工作电压 V_m
- (4) 最佳工作电流 I_m
- (5) 最大输出功率 P_m
- (6) 光电转换效率 η
- (7) 填充因子 FF
- (8) 伏安特性曲线或伏安特性
- (9) 短路电流温度系数 α ，简称电流温度系数
- (10) 开路电压温度系数 β ，简称电压温度系数
- (11) 内部串联电阻 R_s
- (12) 内部并联电阻 R_{sb}

3.4.2 电性能测试的一般规定

3.4.2.1 标准测试条件

标准规定地面标准阳光光谱采用总辐射的 AM1.5 标准阳光光谱。

地面阳光的总辐照度规定为 1000 w/m^2 。标准测试温度规定为 25°C

对定标测试，标准测试温度的允许差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。对非定标准测试。标准测试温度允许差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

如受客观条件所限，只能在非标准条件下进行测试，，则必须将测量结果换算到标准测试条件。

3.4.3 测量仪器与装置

(1) 标准太阳电池

标准太阳电池用于校准测试光源的辐射照度。

对 AM1.5 工作标准太阳电池作定标测试时，用 AM1.5 二级标准太阳电池校准辐射度。在非定标测试中，一般用 AM1.5 工作标准辐照度，要求时用 AM1.5 级标准太阳电池。

(2) 电压表（包括一切测量电压的装置）电压表的精度应不低于 0.5 级。

电流表内阻应小到能保证在测量短路电流时，被电池两端的电压不超过开路电压的 3%。当要求更精确时，在开路电压的 3%以内可利用电压和电流的线性关系来推算完全短路电流。

推荐用数学毫伏表测量取样电阻两端电压降的方法来测量电流。

(4) 取样电阻

取样电阻的精确度应不低于 $\pm 0.2\%$ 。必须采用四端精密电阻
电池短路电流和取样电阻值的乘积应不超过电池开路电压的 3%。

(5) 负载电阻

负载电阻应能从零平滑地调节到 $10\text{K}\Omega$ 以上。必须有足够的功率容量，以保证在通电测量时不会因发热而影响测量精度。当可变电阻不能满足上述条件时，应采用等效的电子可变负载。

(6) 函数记录仪

函数记录仪有于记录太阳电池的伏安特性曲线。函数记录仪的精密应不低于 0.5 级。对函数记录仪内阻的要求和对电压表内阻的要求相同。

(7) 温度计

温度计或测温系统的仪器误差应不超过 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 测量系统的时间响应不超过 1 秒。测量探头的体积和形状应保证它能尽量靠近太阳电池的 pn 结安装。

(8) 室内测试光源

辐照度、辐照和均匀度、稳定度、准直性及光谱分布均应符合一定的要求。

3.4.4 基本测试方法

所规定的测试项目中，开路电压和短路电流可以用电直接测量，其它参数从伏安特性求出。

太阳能电池伏安特性应在标准地面阳光、太阳模拟器或其它等效的模拟阳光下测量。

太阳能电池的伏安特性应在标准条件下测试，如受客观条件所限，只能在非标准条件下测试，则测试结果应换算到标准测试条件。

在测量过程中，单体太阳能电池的测试温度必须恒定在标准测试温度。可以用遮光法来控制太阳能电池组件、组合板或方阵的测试温度模拟阳光的辐射度只能用标准太阳能电池来校准，不允许用其它辐射测量仪表。

用于校准辐照度的标准太阳能电池应和待测太阳能电池具有基本相同的光谱响应。（注：系指同材料、同结构、同工艺的太阳能电池）。

3.4.5 从非标准测试条件换算到标准测试条件

电流和电压换算公式：

当测试温度、辐照度和标准测试条件不一致时，可用以下换算公式校正到标准测试条件：

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \left[\frac{I_{SR}}{I_{MR}} - 1 \right] + a(T_2 - T_1)$$
$$V_2 = V_1 - R_s(I_2 - I_1) - KI_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)$$

式中：

I_1 、 V_1 ：待校正的特性曲线的座标点。

I_2 、 V_2 ：校正后的特性曲线的对应座标点。

I_{SC} ：所测试电池的短路电流。

I_{MR} ：标准电池在实测条件下的短路电流。

T_1 ：测试温度。

T_2 ：标准测试温度。

R_s ：所测电池的内部串联电阻。

K ：曲线校正因子，一致可取 $K1.25 \times 10^{-3} \Omega/^\circ\text{C}$

α ：所测电池在标准辐照度下，以及在所需的温度范围内的短路电流温度系数。

β ：和上述短路电流温度系数相对应的开路电压温度系数。

注：以上各参数的单位必须统一。

3.4.6 室外阳光下测试

1) 测试场地及周围环境

测试场地周围的地面空旷，不遮光。反光及散光的任何物体。测试场地周围地面上应

无高反射的物体，如冰雪、白灰和亮沙子等。

2) 气候及阳光条件

天气及晴朗，太阳周围无云。

阳光总辐照度不低于标准总辐射度的 80%。天空散射光所占比例不大于总射的 25%。在测试周期内，辐照的产稳定度应不大于±1%。

3) 安装要求被测电池、标准电池应安装在同一平面上，并尽量靠近，测试平面的法线和入射光线的夹角应不大于 5°

3.4.7 太阳能电池内部串联电阻的测量

1) 本方法在太阳模拟器或其它模拟阳光下测量太阳能电池内部串联电阻，所用的装置和测量伏安特性的装置相同。但要求测试平面上的辐照度大致能在 600 w/m² 到 1200 w/m² 范围内调节。

2) 用二种不同的辐照度，分别测量二条伏—安特曲线，画在同一坐标上，如图 4.2。二种辐照度大致取为 900 w/m² 和 1100 w/m²，不需知道正确的数值。辐照度改变时要求温度变化不超过 2°C。

3) 图中，在二条曲线的最大功率点附近各选择一点 P 和 Q，使满足

$$I_{SC1} - I_P = I_{SC2} - I_Q$$

4) 按下式算出 R_{S1}

$$R_{S1} = \frac{V_Q - V_P}{I_{SC1} - I_{SC2}}$$

5) 保持温度不变，把辐照度调节到 700 w/m² 左右，再描绘一条伏——安特曲线 3。

6) 重复 6.3 和 6.4 从曲线 2 和 3 算出 R_{S3}，从曲线 1 和 3 算出 R_{S2}。

7) 被测太阳能电池的内部串联电阻。

$$R_S = \frac{R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}}{3}$$

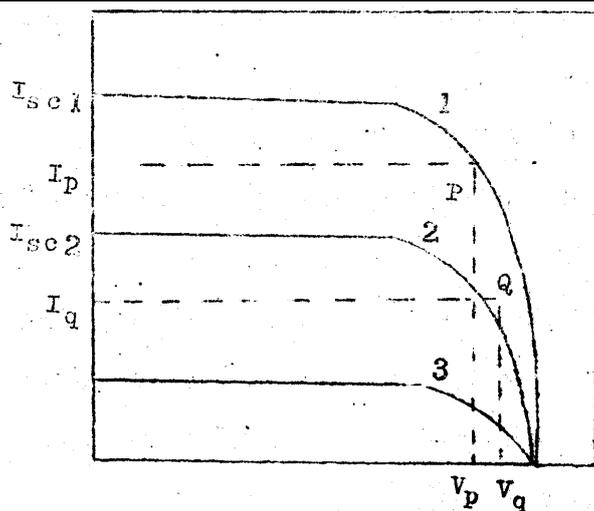


图 4.2 伏安特性曲线

3.4.8 太阳能电池电流和电压温度系数的测量

太阳能电池的短路电流温度系数 α 和开路电压温度系数 β 随辐照情况而改变，并与温度有关，因此必须在规定的辐照条件下进行测量。而测量结果只在所测的温度范围内适用，温度范围根据需要来确定。

- 1) 测试光源用太阳模拟器或其它模拟阳光，推荐使用脉冲式太阳模拟器。
- 2) 温度传感器附着在被测的太阳能电池上，尽量靠近 pn 结。
- 3) 被测器件安装在能控制温度的测试架上，接触面应有良好的热传导，温度恒定在标准测试温度。
- 4) 工作标准电池和被测电池并排放置在测试平面的有效辐照区内。
- 5) 工作标准电池校准辐照度。
- 6) 把温度调节到所需温度范围的最低点，测量开路电压和短路
- 7) 把温度升高 10°C ，稳定后再测量开路电压和短路电流。
- 8) 重复 7.7，直到所需温度范围的最高点。
- 9) 用统计方法处理数据，画出短路电流——温度以及开路电压——温度二条曲线。
- 10) 在所需温度范围的中点，求出上述二条曲线的斜率，即 α 和 β 。
- 11) 太阳能电池组件、组合板和方阵的温度系数可根据单体电池的温度系数，以及单体电池串、并联个数算出。

$$\alpha = n_p \cdot \alpha_c$$

$$\beta = n_s \cdot \beta_c$$

式中：

α_c 和 β_c 是单体电池的电流和电压温度系数。

α 和 β 是组件、组合板或方阵的电流和电压温度系数。

n_p ：单体电池的并联个数。

n_s ：单体电池串联个数。

- 12) 当温度低于环境温度时，为了防止被测器件的表面生成冷凝水珠，可以用干燥的

氮气保护，必要时在高真空中测试。

3.5 非晶硅太阳能电池电性能测试须知

非晶硅太阳能电池电性能测试方法从原则到具体程序都和单晶硅、多晶硅太阳能电池电性能测试相同，但必须注意以下几点区别，否则可能导致严重的测量误差。

3.5.1 校准辐照度

应选用恰当的、专用于非晶硅太阳能电池测试的非晶硅标准太阳能电池来校准辐照度。由于非晶硅太阳能电池，将会得到毫无意义的测试结果。当然，按照光谱失配的理论，如果所选的测试光源十分理想，那么，即使用单晶硅标准太阳能电池校准辐照度也能获得正确的结果。

3.5.2 光源

用于非晶硅太阳能电池电性能测试的光源应尽可能选用在 $0.3\sim 0.8\mu$ 波长范围内，光谱特性非常接近一塌糊涂 AM1.5 太阳光谱的太阳模拟器。在自制太阳模拟器的情况下，应当给出从 $0.3\sim 0.58\mu$ 波长范围，内光谱分布的详细数据或曲线，以便计算光谱失配误差。

3.5.3 光谱响应

非晶硅太阳能电池的光谱响应特性与所加偏置光及偏置电压有关，在非标准条件下进行测试和换算时应注意有关情况。

3.6 太阳电流组件测试和环境试验方法

3.6.1 测试项目

太阳能电池组件参数测量的内容，除常用的和单体太阳能电池相同的一些参数外，还应包括绝缘电阻、绝缘强度、工作温度、反射率及热机械应力等参数。

3.6.2 组件电性能参数测量中所需的参考组件

关于太阳能电池电性能参数测量方法的总原则已在 $\xi 3$ 、 $\xi 4$ 、 $\xi 5$ 等节中作了说明，这些原则性的方法当然也适用于组件参数测量。这里需要补充的首先是，在组件参数测量中和能采用参考组件来校准辐照度要比直接用标准太阳能电池来校准辐照度更值得推荐，在室内测试和室外测试二种情况下，对参考组件的形状、尺寸、大小的要求不一致。在室内测试的情况下，要求参考组件的结构、材料、形状、尺寸等都尽可能和待测组件相同。而室外阳光下测量时，上述要求可稍微放宽，即可以采用尺寸较小，形状不完全相同的参考组件。

3.6.3 太阳能电池组件测试方法

3.6.3.1 组件的额定工作温度 (NOCT)

额定工作温度 NOCT 和 Nominal Operating Cell Temperature 的编写，其定义是太阳电阻组件在辐照度为 800 w/m^2 、环境温度 20°C 、风速为 1m/S 的环境条件下，太阳能电池的工作温度。某种组件的额定工作温度和它的实际工作温度 t_r 以及环境温度 t_e 之间有如下的经验公式：

$$t_1 = t_e + \frac{(NOCT - 20)}{80} E$$

式中 E 为测量时的实际辐照度。

由于太阳能电池组件的实际工作温度常难以直接测定。因此采用上式公式来进行估算是有意义的。测定了环境温度及辐照度便可根据它的 NOCT 数据来估算实际工作温度。

各种组件的 NOCT 应当由专门机构来测定。某种组件的 NOCT 取决于它的封装情况，以下一组典型的 NOCT 数据可作为参考标准。

组件封装状况	NOCT (°C)
用玻璃做基板无气隙封装	41
用玻璃做基板的有气隙封装	60
采用带有散热片的铝质基板	40
采用不带散热的铝质基板	43
采用塑料基板	47

3.6.3.2 电阻的测量

绝缘电阻测量是测量组件输出端和金属基板或框架之间的绝缘电阻。在某些环境试验项目进行前后都需测量绝缘电阻。在测量前先作安全检查，对于已经安装使用的方阵首先应检查对地电位、静电效应，以及金属基板、框架、支架等接地是否良好等，建议最好用容量足够大的开关设备把待测方阵的输出端短路后再进行测量，可以用普通的兆欧表来测量绝缘电阻，但应选用电压等级大致和待测方阵的开路电压相当的兆欧表。测量绝缘电阻时，大气相对湿度应不大于 75%。

3.7 地面用硅太阳能电池组件环境试验概况

地面用太阳能电池组件常年累月运行于室外环境，必须能反复经受各种恶劣的气候条件及其它多变的环境条件，并保证要在相当长的额定寿命（通常要求 15 年以上）内其电性能不发生严重的衰退，为此在出厂前因按规定抽样进行各项环境模拟试验，以下简略介绍环境试验的具体项目及技术要求。在环境试验项目进行前后（注意：这里是指每一个项目进行前后）均需观察和检查组件外表有无异常现象，最大输出功率的下降是否大于 5%。凡是外观发生异常或最大输出功率下降大于 5%者均为不合格。这是各项试验的共同要求，以下不再逐一说明。

3.7.1 温度交变

从高温到低温反复交替变化称为温度交变。交变的温度范围规定为 $-40 \pm 3 \sim +35 \pm 2^\circ\text{C}$ 。凡用钢化玻璃为盖板的组件应交变 200 次，用优质玻璃作盖板的组件应交变 50 次。在进行每项试验前后均应测量电性能参数，并观察试验后外表有列异常，以下从略。

3.7.2 高温贮存 地面用太阳能电池组件应放在 $85 \pm 2^\circ\text{C}$ 的高温环境下贮存 16 小时。

3.7.3 低温贮存

地面用太阳能电池组件应放在 $-40 \pm 3^\circ\text{C}$ 的低温环境下贮存 16 小时。

3.7.4 恒定湿热贮存

地面用太阳组件应放应相对湿度为 $90 \sim 95\%$ ，温度为 $40 \pm 2^\circ\text{C}$ 的湿热环境下存放 4 天。试验结束电性能测试及外观检查绝缘电阻，小于 $1\text{M}\Omega$ 者为不合格。

3. 7. 5 振动、冲击

振动及冲击试验目的是考核其耐受运输的能力。因此应在良好的包装条件下进行试验。试验条件规定如下：

振动频率：10~55HZ

振 幅：0.35mm

振动时间：法向 20 分钟，切向 20 分钟

冲击波形：半正弦、梯形、后峰锯齿、持续 11ms

冲来的峰值加速度：150m/s²

冲击次数：法向、切向各 3 次。

3. 7. 6 盐雾试验

在近海环境中使用的太阳电池组件应进行此项试验，即在温度 35±2℃•5%氯化钠水溶液的雾气中贮存 96 小时后，检查外观、最大输出功率及绝缘电阻。

3. 7. 7 冰雹试验

模拟冰雹试验所用的钢球重 227±2g，下落高度视组件盖板材料而定，钢化玻璃：高度 100cm，优质玻璃：50cm。向太阳电池组件中心下落 1 次。

3. 7. 8 地面太阳光辐照试验

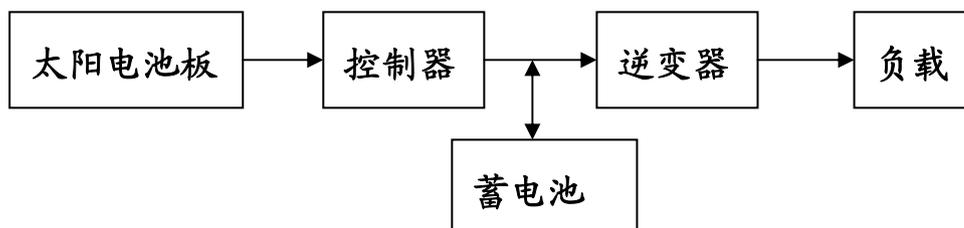
此项试验应在模拟地面太阳光辐照试验箱中进行。模拟太阳光应垂直照射组件，辐照度为 1.12KW±10%，并具有地面阳光光谱分布。每 24 小时为一周期，光照 20 小时，温度 55℃，停照 4 小时，温度为 25℃。每小时喷水 5 分钟，持续进行 18 个月。最大输出功率下降不得超过 10%。

3. 7. 9 扭弯试验

在 15~35℃ 的室温环境下，将太阳电池组件的三个角固定。另一角安装在扭弯测试仪上，使组件的一个短边扭转 1.2°，试验完毕检查外观及电性能。

第四章 光伏阵列

独立光伏系统的构成主要包括：光伏组件（阵列）、蓄电池、逆变器、控制器。见图 8.4。下面我们分别加以讨论。



图：户用系统方框图

4.1 光伏组件（阵列）

一个光伏阵列包含两个或两个以上的光伏组件，具体需要多少个组件及如何连接组件与所需电压（电流）及各个组件的参数有关。

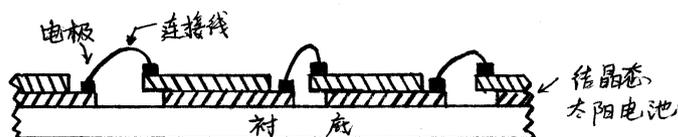
光伏组件是由太阳能电池片群密封而成，是阵列的最小可换单元。目前大多数太阳能电池片是单晶或多晶硅电池。这些电池正面用退水玻璃背面用软的东西封装。它就是光伏系统中把辐射能转换成电能的部件。

按照太阳能电池的用途，目的、规模、太阳能电池的种类等有各种形状的太阳能电池组件，下面就几种典型的例子进行介绍。

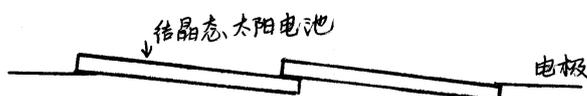
（一）用于电子产品的组件

为驱动计算器手表，收音机、电视、充电器等电子产品，一般需 1.5V 至数十伏的电压。而单个太阳电池产生的电压小于 1V，所以要驱动这些电子产品，必须使多个太阳电池元件串联连接才能达到要求电压。

如图 8.5 (a)、(b) 示出了民用晶体太阳组件的结构，是把太阳电池元件排列好，串联连接做成组件。可见，为驱动电子装置，需要一定的高压，而该组装方法存在问题是成本高，接线点太多；从可靠性的观点来看接线点太多是不利的。



(a)



(b)

图 8.5 民用晶体硅太阳能电池组件的结构

另一种是非晶硅太阳能电池。因为非晶硅是靠气体反应形成的，很容易形成薄膜，在一块衬底上便于使多个单元电池串联连接而获得；较高的电压输出。

(二) 用于电力的组件

电力用的太阳能电池一般均安装在调用外，所以除太阳能电池本身以外，还必须采用能经受雨、风、砂尘和温度变化甚至冰雹袭击等的框架、支撑板和密封树脂等进行完好的保护，现正研究各种电力用的太阳能电池组件的结构。

如图 8.6 中 (a) 所示的是衬片式结构，是在太阳能电池的背后放一块衬片作为组件的支撑板，其上用透明树脂将整个太阳能电池封住。支撑板采用纤维钢化塑料 (FRP) 等。

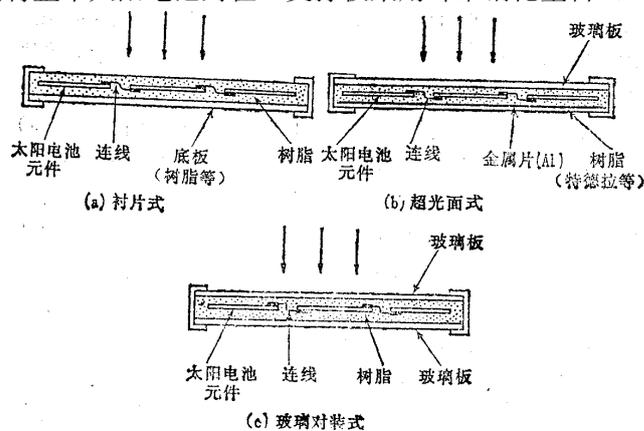


图 8.6 各种结构晶硅太阳能电池电力用组件的结构

目前最常用的是图 8.6 (b) 所示的超光面式结构，在太阳能电池的受光面放一块透明基板作组件的支撑板，其下用填充材料和背面被覆盖材料将太阳能电池密封。上面的透明板用玻璃，最好采用透明度和耐冲击强度均好的钢化白玻璃。填充材料主要采用在紫外光照射时透过率衰减较小的聚乙烯醇缩丁醛 (PVB) 和耐湿性良好的乙烯乙酸乙烯 (EVA)。反面涂层多采用金属铝同聚氟乙烯 (PVF) 夹心状结构，使其具有耐湿性和高绝缘性。

此外，对可靠性要求特别高的应用，开发了一种新的封装方式，如图 8.6 (c)，即在两块玻璃板之间用树脂把太阳能电池封入。

随着非晶硅太阳能电池的发展，也在研究采用同晶体硅太阳能电池一样的超光面封装方式，如图 8.7 (a) 所示，把集成型太阳能电池衬底玻璃直接用作受光面的保护板，各单元电池的连接也不用导线，所以能使组件的组装工艺变得特别简单。此外，图 8.7 (b) 所示的组件类型也在研究之中。今后如更大面积太阳能电池的研制取得进展的话，一般估计图 8.7 (c) 所示的单块衬底型组件是更适合的，这样可以进一步使组件成本降低。

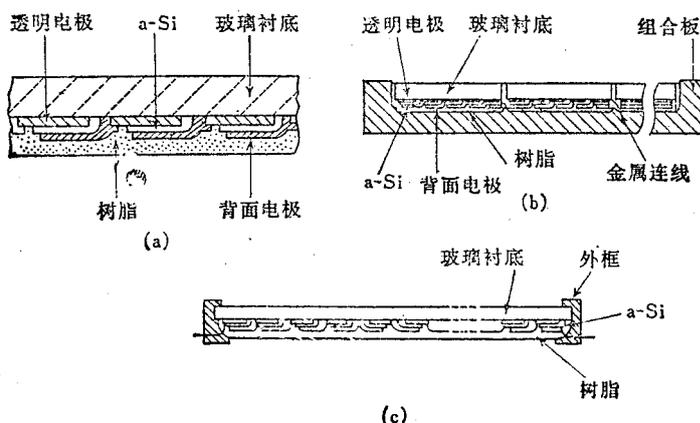
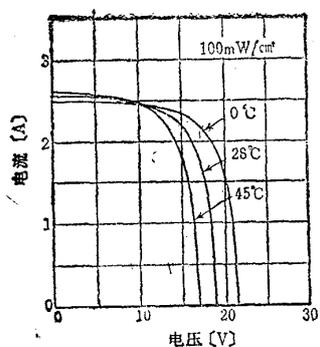
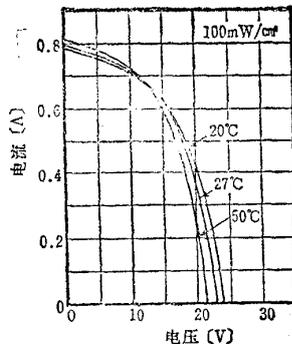


图 8.7 采用非晶硅太阳电池的各种电力用组件的结构

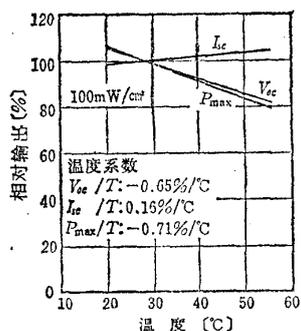
图 8.8、图 8.9 分别给出一单晶硅太阳电池组件和非晶硅太阳电池组件与温度的关系和与光强的关系。与单个电池的温度系数不同，这是因为组件中包括了接线部分的因素。



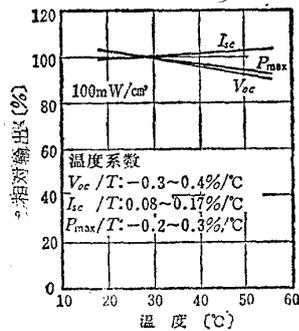
(a) 单晶硅太阳电池组件的 I-V 特性与温度关系的实例



(b) 非晶硅太阳电池组件的 I-V 特性与温度关系的实例



(c) 单晶硅太阳电池组件的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大输出功率 P_{max} 与温度关系的实例

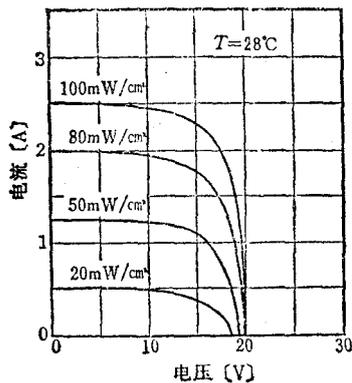


(d) 非晶硅太阳电池组件的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大输出功率 P_{max} 与温度关系的实例

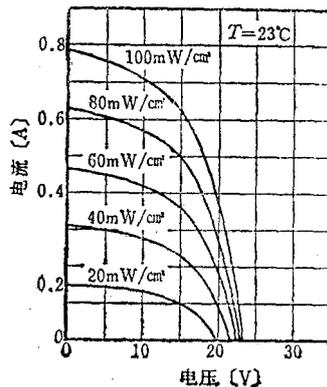
图 8.8 太阳电池组件输出特性与温度关系的实例

(单晶硅电池组件的大小: 30.2cm*121.7cm)

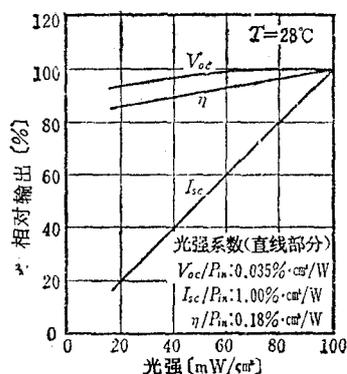
(非单晶硅电池组件的大小: 37.8cm*71.1cm)



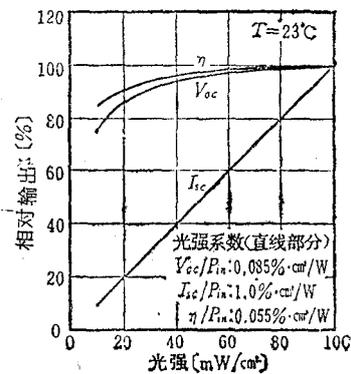
(a) 单晶硅太阳能电池组件的 I-V 特性与光强关系的实例



(b) 非晶硅太阳能电池组件的 I-V 特性与光强关系的实例



(c) 单晶硅太阳能电池组件的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、转换效率 η 与光强关系的实例

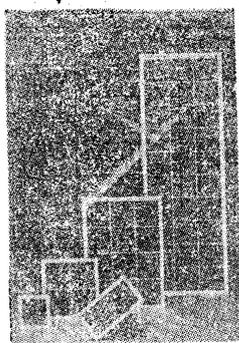


(d) 非晶硅太阳能电池组件的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、转换效率与光强关系的实例

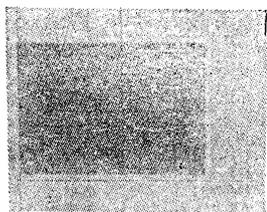
图 8.9 太阳能电池组件输出特性与光强关系的实例
(组件大小同图 8.8)

由图 8.9 可知，非晶硅太阳能电池组件与单晶硅太阳组件相比，其输出对温度的关系较小，转换效率随着光强的减小，在直线范围内比单晶硅的小。

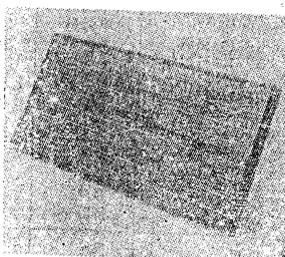
图 8.10 给出了电力太阳能电池组件的一些图片。



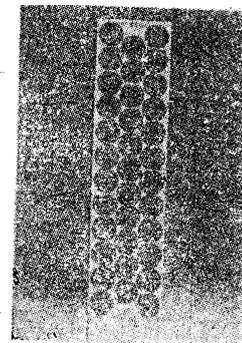
(a) a-Si 太阳能电池组件



(b) 大面积 a-Si 太阳电池



(d) 多晶 Si 太阳电池 (SOLAREX 太阳公司提供) 组件



(c) 单晶 Si 太阳电池 (ARCO 太阳公司提供) 组件

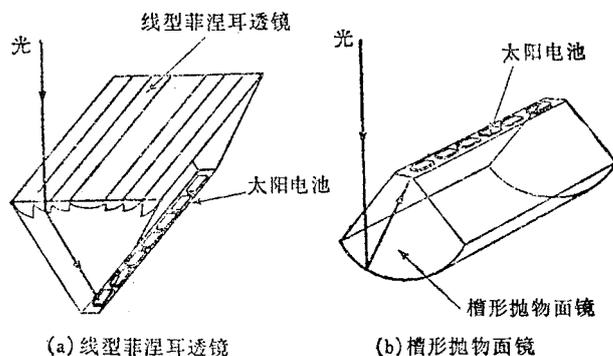
图 8.10 电力用太阳能电池组件

(三) 聚光式组件

聚光式太阳电池发电系统是在聚焦的太阳光下工作的，有关这方面的研究工作最近在美国取得了较大的进展。它分为透镜式和反光镜式两种。

(1) 透镜式

聚光所必须的大面积凸透镜采用菲涅耳透镜，它是把分割的凸透镜曲面连接在一起。菲涅耳透镜的形状有圆型和线型之分。如图 8.11 (a) 示出了线型菲涅耳透镜的实例，太阳光聚焦



于配置为点状或线状的太阳电池上。

图 8.11. 两种聚光方式

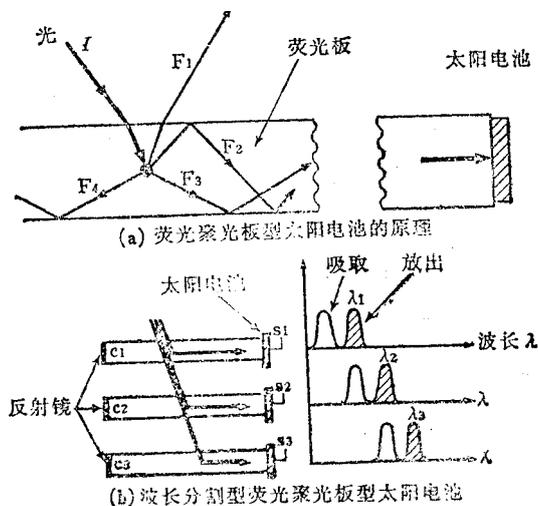
太阳电池除了采用单晶硅太阳电池以外，常采用转换效率较高的砷化镓太阳电池。在圆型菲涅耳透镜、聚光比为 500~1000 倍的点聚焦情况下，单晶硅太阳电池的转换效率达 15—17%而砷化镓太阳电池的达到 18—20%。

(2) 反光镜式

反光镜式又有两种形式，一种是采用抛物面镜，太阳电池则放在其焦点上，另一种是底面放置太阳电池，侧面配置反光镜，如图 8.11 (b) 所示的槽形抛物面镜的形式较为常用。

此外还有其它方式，如图 8.12 (a) 所示为荧光聚光板型太阳电池，是把所吸收的太阳光通过荧光板变为荧光，荧光在荧光板内传播，最后被聚集于放置着太阳电池的端部。现在这种荧光聚光板型太阳电池已能做到面积为 1m²的效率为 1%；面积为 1600cm²的，效率为 2.5%。另外在该方式中，正在研究如图 8.12 (b) 所示的波长为分割型的荧光聚光板型太阳电池，其关键问题是要降低荧光板的价格，提高发光效率，以及提高可靠性等。

图 8.12 荧光聚光板型太阳电池

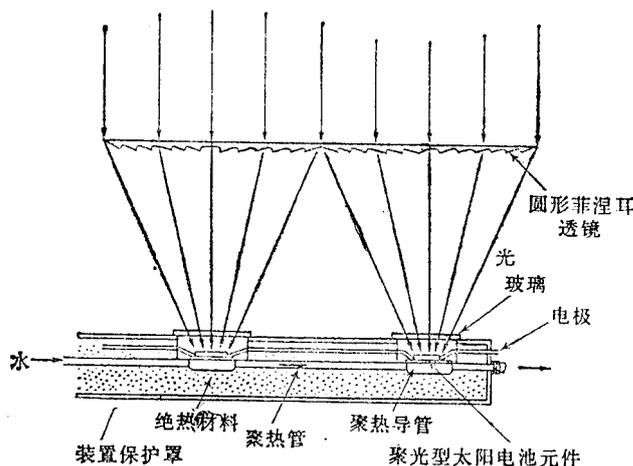


(四)混合型组件

光热混合型组件是为更有效地利用太阳能，让太阳光发电又发热的器件。这种混合型组件有聚光型光热混合型组件和聚热器型光热混合型组件。

聚光型光热混合型组件如图 8.13 所示，聚光型太阳电池背面通过导热媒介物进行聚热。新能源综合开发机构（NEDO）委托研究做系统能得到 5KW 的电输出，25KW 的热输出。

图 8.13 聚光型光热混合型组件



聚热器型光热混合型组件是将太阳电池连接到聚热板上而发电的。图 8.14 所示为在真空玻璃管型聚热板上形成非晶硅太阳电池的混合型组件。

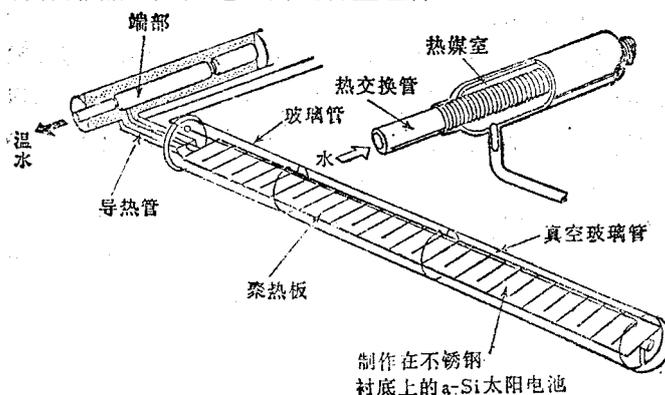


图 8.14 采用非晶硅太阳电池的聚热型光热混合型组件

非晶硅太阳电池因为在可见光范围吸收系数很大，而在红外线范围反射系数大，所以也起着良好的选择吸收膜的作用，如图 8.15 所示。

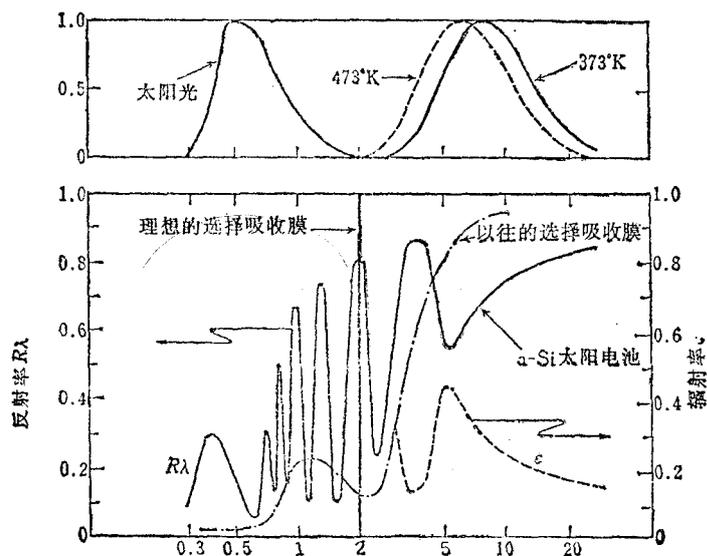


图 8.15 非晶硅太阳能电池作为选择吸收膜的特性

非晶硅太阳能电池被密封真空玻璃管内，所以不要包封，太阳能的总转换效率达 58% 其中电能转换 5%，热能转换 53%。这对降低成本很有好处。

目前，上海交通大学，就用物理系，太阳能研究所采用结晶硅太阳能电池电力用组件的封装方式，整个组件效率达 15%，达到全国先进水平。

4.2 有四个因素决定了光伏组件的输出功率

负载电阻、太阳辐照度，电池温度和光伏电池的效率。

对于给定的组件的输出可由其电流电压 (I—V) 曲线来估算。如图 8.16 所示，在某一温度 (T) 下太阳的照度也为一定的情况下，通过测定得了的数据绘出了些图，从图 8.15 中可知有开路电压 (V_{oc})，短路电流 (I_{sc})，最大功率点 m 处的电流 (I_{mp}) 和电压 (V_{mp}) 可得组件的功率 $W_m = I_{mp} \cdot V_{mp}$ 。

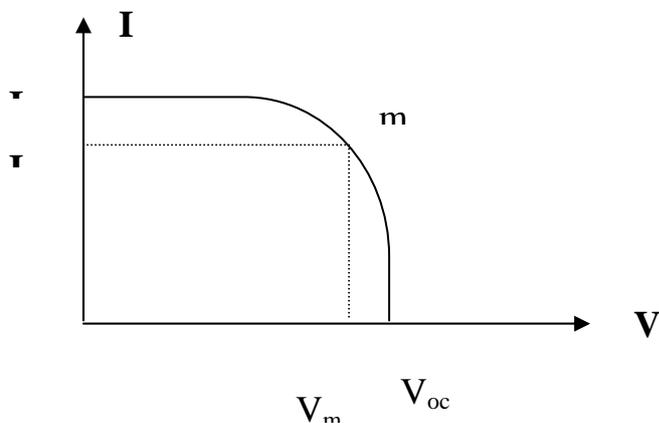


图 8.16 光伏组件的 I-V 特性图

对于一个给定的电池面积，电流与太阳辐照度成正比且几乎与温度无关，而电压（功率）随温度升高而下降。一般来说，晶体硅电池的电压降为 0.5%/°C。由此可以看到组件的温度对其功率的输出影响较大，**所以阵列要安装在通风的地方**，以保持凉爽；不能在一个屋顶或同一个支撑结构上安装过多的组件。

光伏阵列的任何部分不能被遮荫，它不像太阳能集热器，如果遮住了光伏组件必须有相同的电流。如果有几个电池被遮荫，则它们便不会产生电流且会成为反向偏压，这就意味着被遮电池消耗功率发热，久而久之，形成故障。但是有些偶然的遮挡是不可避免的，所以需要**用旁路二极管来起保护作用**。如果所有的组件是并联的，就不需要旁路二极管，即如果要求阵列输出电压为 12V，而每个组件的输出恰为 12V，则不需要对每个组件加旁路二极管，如果要求 24V 阵列（或者更高），那么必须有 2 个（或者更多的）组件串联，这时就需要加上旁路二极管，如图 8.17 所示，

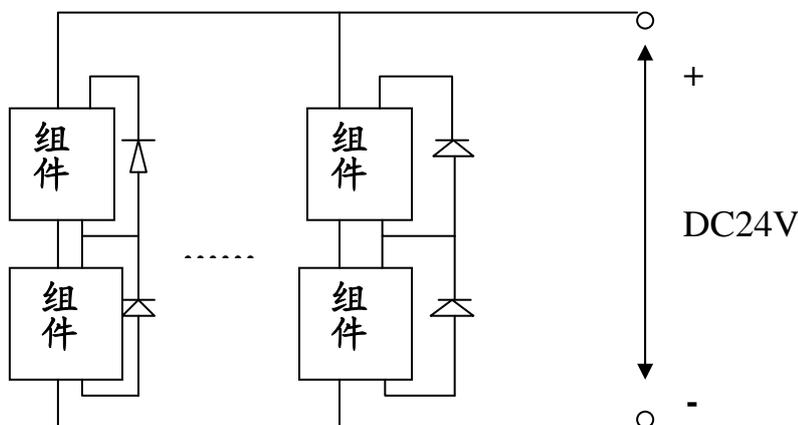


图 8.17 带旁路二极管的串联电池

阻塞二极管

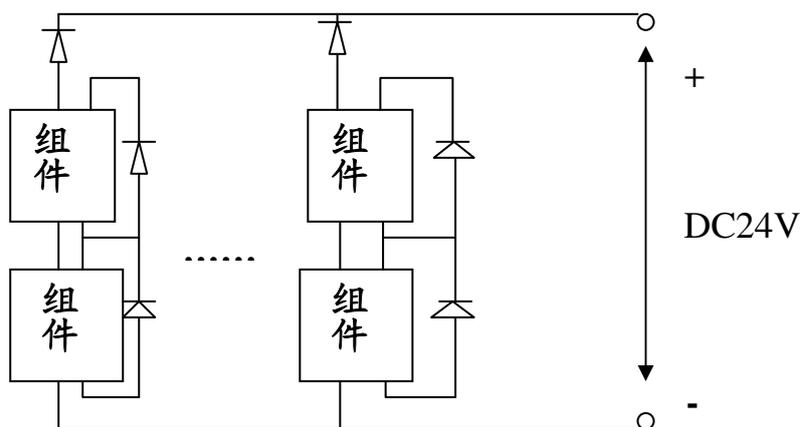


图 8.18 对于 24V 阵列阻塞二极管的接法

阻塞二极管是用来控制光伏系统中电流的：

任何一个独立光伏系统都必须有防止从蓄电池流向阵列的反向电流的方法或有保护或失效的单元的方法。如果控制器没有这项功能的话，就要用到阻塞二极管，如图 8.18 阻塞二极管既可在每一并联支路，又可在阵列与控制器之间的干路上，但是当多条支路并联接成一个大系统，则应在每条支路上用阻塞二极管（如图 8.18）以防止由于支路故障或遮蔽引起的电流由强电流支路流向弱电流支路的现象。在小系统中，在干路上用一个阻塞二极管就够了，不要两种都用，因为每个二极管会降压 $0.4\sim 0.7V$ 是一个 12V 系统的 6%，这也是不小的一个比例。