

太阳能光伏技术完全解说

1. 太阳能概况

太阳能是各种可再生能源中最重要、最基本能源，生物质能、风能、海洋能、水能等都来自太阳能，广义地说，太阳能包含以上各种可再生能源。太阳能作为可再生能源的一种，则是指太阳能的直接转化和利用。通过转换装置把太阳辐射能转换成热能利用的属于太阳能热利用技术，再利用热能进行发电的称为太阳能热发电，也属于这一技术领域；通过转换装置把太阳辐射能转换成电能利用的属于太阳能光伏发电技术，光电转换装置通常是利用半导体器件的光伏效应原理进行光电转换的，因此又称太阳能光伏技术。

二十世纪 50 年代，太阳能利用领域出现了两项重大技术突破：一是 1954 年美国贝尔实验室研制出 6% 的实用型单晶硅电池，二是 1955 年以色列 Tabor 提出选择性吸收表面概念和理论并研制成功选择性太阳吸收涂层。这两项技术突破为太阳能利用进入现代发展时期奠定了技术基础。

70 年代以来，鉴于常规能源供给的有限性和环保压力的增加，世界上许多国家掀起了开发利用太阳能和可再生能源的热潮。1973 年，美国制定了政府级的阳光发电计划，1980 年又正式将光伏发电列入公共电力规划，累计投入达 8 亿多美元。1992 年，美国政府颁布了新的光伏发电计划，制定了宏伟的发展目标。日本在 70 年代制定了“阳光计划”，1993 年将“月光计划”（节能计划）、“环境计划”、“阳光计划”合并成“新阳光计划”。德国等欧共体国家及一些发展中国家也纷纷制定了相应的发展计划。90 年代以来联合国召开了一系列有各国领导人参加的高峰会议，讨论和制定世界太阳能战略规划、国际太阳能公约，设立国际太阳能基金等，推动全球太阳能和可再生能源的开发利用。开发利用太阳能和可再生能源成为国际社会的一大主题和共同行动，成为各国制定可持续发展战略的重要内容。

自“六五”以来我国政府一直把研究开发太阳能和可再生能源技术列入国家科技攻关计划，大大推动了我国太阳能和可再生能源技术和产业的发展。

二十多年来，太阳能利用技术在研究开发、商业化生产、市场开拓方面都获得了长足发展，成为世界快速、稳定发展的新兴产业之一。

2. 光伏效应

光生伏特效应简称为光伏效应，指光照使不均匀半导体或半导体与金属组合的不同部位之间产生电位差的现象。

产生这种电位差的机理有好几种，主要的一种是由于阻挡层的存在。以下以 P-N 结为例说明。

热平衡态下的 P-N 结

P-N 结的形成：

同质结可用一块半导体经掺杂形成 P 区和 N 区。由于杂质的激活能量 ΔE 很小，在室温下杂质差不多都电离成受主离子 N_A^- 和施主离子 N_D^+ 。在 PN 区交界面处因存在载流子的浓度差，故彼此要向对方扩散。设想在结形成的一瞬间，在 N 区的电子为多子，在 P 区的电子为少子，使电子由 N 区流入 P 区，电子与空穴相遇又要发生复合，这样在原来是 N 区的结面附近电子变得很少，剩下未经中和的施主离子 N_D^+ 形成正的空间电荷。同样，空穴由 P 区扩散到 N 区后，由不能运动的受主离子 N_A^- 形成负的空间电荷。在 P 区与 N 区界面两侧产生不能移动的离子区（也称耗尽区、空间电荷区、阻挡层），于是出现空间电偶层，形成内电场（称内建电场）此电场对两区多子的扩散有抵制作用，而对少子的漂移有帮助作用，直到扩散流等于漂移流时达到平衡，在界面两侧建立起稳定的内建电场。

热平衡下 P-N 结模型及能带图

P-N 结能带与接触电势差：

在热平衡条件下，结区有统一的 E_F ；在远离结区的部位， E_C 、 E_F 、 E_V 之间的关系与结形成前状态相同。

从能带图看，N 型、P 型半导体单独存在时， E_{FN} 与 E_{FP} 有一定差值。当 N 型与 P 型两者紧密接触时，电子要从费米能级高的一方向费米能级低的一方流动，空穴流动的方向相反。同时产生内建电场，内建电场方向为从 N 区指向 P 区。在内建电场作用下， E_{FN} 将连同整个 N 区能带一起下移， E_{FP} 将连同整个 P

区能带一起上移，直至将费米能级拉平为 $E_{FN}=E_{FP}$ ，载流子停止流动为止。在结区这时导带与价带则发生相应的弯曲，形成势垒。势垒高度等于 N 型、P 型半导体单独存在时费米能级之差：

$$qUD=E_{FN}-E_{FP}$$

得

$$UD=(E_{FN}-E_{FP})/q$$

q：电子电量

UD：接触电势差或内建电势

对于在耗尽区以外的状态：

$$UD=(KT/q) \ln(N_A N_D / n_i^2)$$

N_A 、 N_D 、 n_i ：受主、施主、本征载流子浓度。

可见 UD 与掺杂浓度有关。在一定温度下，P-N 结两边掺杂浓度越高，UD 越大。

禁带宽的材料， n_i 较小，故 UD 也大。

光照下的 P-N 结

P-N 结光电效应：

当 P-N 结受光照时，样品对光子的本征吸收和非本征吸收都将产生光生载流子。但能引起光伏效应的只能是本征吸收所激发的少数载流子。因 P 区产生的光生空穴，N 区产生的光生电子属多子，都被势垒阻挡而不能过结。只有 P 区的光生电子和 N 区的光生空穴和结区的电子空穴对（少子）扩散到结电场附近时能在内建电场作用下漂移过结。光生电子被拉向 N 区，光生空穴被拉向 P 区，即电子空穴对被内建电场分离。这导致在 N 区边界附近有光生电子积累，在 P 区边界附近有光生空穴积累。它们产生一个与热平衡 P-N 结的内建电场方向相反的光生电场，其方向由 P 区指向 N 区。此电场使势垒降低，其减小量即光生电势差，P 端正，N 端负。于是有结电流由 P 区流向 N 区，其方向与光电流相反。

实际上，并非所产生的全部光生载流子都对光生电流有贡献。设 N 区中空穴在寿命 τ_p 的时间内扩散距离为 L_p ，P 区中电子在寿命 τ_n 的时间内扩散距离为 L_n 。 $L_n+L_p=L$ 远大于 P-N 结本身的宽度。故可以认为在结附近平均扩散距离 L 内所产生的光生载流子都对光电流有贡献。而产生的位置距离结区超过 L 的电子空穴对，在扩散过程中将全部复合掉，对 P-N 结光电效应无贡献。

光照下的 P-N 结电流方程:

与热平衡时比较, 有光照时, P-N 结内将产生一个附加电流 (光电流) I_p , 其方向与 P-N 结反向饱和电流 I_0 相同, 一般 $I_p \geq I_0$ 。此时

$$I = I_0 e^{qU/KT} - (I_0 + I_p)$$

令 $I_p = SE$, 则

$$I = I_0 e^{qU/KT} - (I_0 + SE)$$

开路电压 U_{oc} :

光照下的 P-N 结外电路开路时 P 端对 N 端的电压, 即上述电流方程中 $I=0$ 时的 U 值:

$$0 = I_0 e^{qU_{oc}/KT} - (I_0 + SE)$$

$$U_{oc} = (KT/q) \ln(SE + I_0) / I_0 \approx (KT/q) \ln(SE / I_0)$$

短路电流 I_{sc} :

光照下的 P-N 结, 外电路短路时, 从 P 端流出, 经过外电路, 从 N 端流入的电流称为短路电流 I_{sc} 。即上述电流方程中 $U=0$ 时的 I 值, 得 $I_{sc} = SE$ 。

U_{oc} 与 I_{sc} 是光照下 P-N 结的两个重要参数, 在一定温度下, U_{oc} 与光照度 E 成对数关系, 但最大值不超过接触电势差 U_D 。弱光照下, I_{sc} 与 E 有线性关系。

a) 无光照时热平衡态, NP 型半导体有统一的费米能级, 势垒高度为 $qU_D = E_{FN} - E_{FP}$ 。

b) 稳定光照下 P-N 结外电路开路, 由于光生载流子积累而出现光生电压 U_{oc} 不再有统一费米能级, 势垒高度为 $q(U_D - U_{oc})$ 。

c) 稳定光照下 P-N 结外电路短路, P-N 结两端无光生电压, 势垒高度为 qU_D , 光生电子空穴对被内建电场分离后流入外电路形成短路电流。

d) 有光照有负载, 一部分光电流在负载上建立起电压 U_f , 另一部分光电流被 P-N 结因正向偏压引起的正向电流抵消, 势垒高度为 $q(U_D - U_f)$ 。

3. 太阳能电池

电池行业是 21 世纪的朝阳行业, 发展前景十分广阔。在电池行业中, 最没有污染、市场空间最大的应该是太阳能电池, 太阳能电池的研究与开发越来越受到世界各国的广泛重视。

太阳的光辉普照大地, 它是明亮的使者, 太阳的光除了照亮世界, 使植物通过光

合作用把太阳光转变为各种养分，供人们食用，产生纤维质供人们做衣服，生长木材给我们 建筑房屋以外，太阳的光还可以通过太阳能电池转变为电。太阳能电池是一种近年发展起来的新型的电池。太阳能电池是利用光电转换原理使太阳的辐射光通过半导体物质转变为电能的一种器件，这种光电转换过程通常叫做“光生伏打效应”，因此太阳能电池又称为“光伏电池”，用于太阳能电池的半导体材料是一种介于导体和绝缘体之间的特殊物质，和任何物质的原子一样，半导体的原子也是由带正电的原子核和带负电的电子组成，半导体硅原子的外层有4个电子，按固定轨道围绕原子核转动。当受到外来能量的作用时，这些电子就会脱离轨道而成为自由电子，并在原来的位置上留下一个“空穴”，在纯净的硅晶体中，自由电子和空穴的数目是相等的。如果在硅晶体中掺入硼、镓等元素，由于这些元素能够俘获电子，它就成了空穴型半导体，通常用符号P表示；如果掺入能够释放电子的磷、砷等元素，它就成了电子型半导体，以符号N代表。若把这两种半导体结合，交界面便形成一个P-N结。太阳能电池的奥妙就在这个“结”上，P-N结就像一堵墙，阻碍着电子和空穴的移动。当太阳能电池受到阳光照射时，电子接受光能，向N型区移动，使N型区带负电，同时空穴向P型区移动，使P型区带正电。这样，在P-N结两端便产生了电动势，也就是通常所说的电压。这种现象就是上面所说的“光生伏打效应”。如果这时分别在P型层和N型层焊上金属导线，接通负载，则外电路便有电流通过，如此形成的一个个电池元件，把它们串联、并联起来，就能产生一定的电压和电流，输出功率。制造太阳电池的半导体材料已知的有十几种，因此太阳电池的种类也很多。目前，技术最成熟，并具有商业价值的太阳电池要算硅太阳电池。

1953年美国贝尔研究所首先应用这个原理试制成功硅太阳电池，获得6%光电转换效率的成果。太阳能电池的出现，好比一道曙光，尤其是航天领域的科学家，对它更是注目。这是由于当时宇宙空间技术的发展，人造地球卫星上天，卫星和宇宙飞船上的电子仪器和设备，需要足够的持续不断的电能，而且要求重量轻，寿命长，使用方便，能承受各种冲击、振动的影响。太阳能电池完全满足这些要求，1958年，美国的“先锋一号”人造卫星就是用了太阳能电池作为电源，成为世界上第一个用太阳能供电的卫星，空间电源的需求使太阳电池作为尖端技术，身价百倍。现在，各式各样的卫星和空间飞行器上都装上了布满太阳能电池

的“翅膀”，使它们能够在太空中长久遨游。我国 1958 年开始进行太阳能电池的研制工作，并于 1971 年将研制的太阳能电池用在了发射的第二颗卫星上。以太阳能电池作为电源可以使卫星安全工作达 20 年之久，而化学电池只能连续工作几天。

空间应用范围有限，当时太阳电池造价昂贵，发展受到限。70 年代初，世界石油危机促进了新能源的开发，开始将太阳电池转向地面应用，技术不断进步，光电转换效率提高，成本大幅度下降。时至今日，光电转换已展示出广阔的应用前景。

太阳能电池近年也被人们用于生产、生活的许多领域。从 1974 年世界上第一架太阳能电池飞机在美国首次试飞成功以来，激起人们对太阳能飞机研究的热潮，太阳能飞机从此飞速地发展起来，只用了六七年时间太阳能飞机从飞行几分钟，航程几公里发展到飞越英吉利海峡。现在，最先进的太阳能飞机，飞行高度可达 2 万多米，航程超过 4000 公里。另外，太阳能汽车也发展很快。

在建造太阳能电池发电站上，许多国家也取得了较大进展。1985 年，美国阿尔康公司研制的太阳能电池发电站，用 108 个太阳板，256 个光电池模块，年发电能力 300 万度。德国 1990 年建造的小型太阳能电站，光电转换率可达 30% 多，适于为家庭和团体供电。1992 年美国加州公用局又开始研制一种“革命性的太阳能发电装置”，预计可供加州 1 / 3 的用电量。用太阳能电池发电确实是一种诱人的方式，据专家测算，如果能把撒哈拉沙漠太阳辐射能的 1% 收集起来，足够全世界的所有能源消耗。

在生产和生活中，太阳能电池已在一些国家得到了广泛应用，在远离输电线路的地方，使用太阳能电池给电器供电是节约能源降低成本的好办法。芬兰制成了一种用太阳能电池供电的彩色电视机，太阳能电池板就装在住家的房顶上，还配有蓄电池，保证电视机的连续供电，既节省了电能又安全可靠。日本则侧重把太阳能电池应用于汽车的自动换气装置、空调设备等民用工业。我国的一些电视差转台也已用太阳能电池为电源，投资省，使用方便，很受欢迎。

当前，太阳能电池的开发应用已逐步走向商业化、产业化；小功率小面积的太阳能电池在一些国家已大批量生产，并得到广泛应用；同时人们正在开发光电转

换率高、成本低的太阳能电池；可以预见，太阳能电池很有可能成为替代煤和石油的重要能源之一，在人们的生产、生活中占有越来越重要的位置。

4. 多晶硅及其他光电转换材料

光伏效应

现代工业的发展，一方面加大对能源的需求，引发能源危机；另一方面在常规能源的使用中释放出大量的二氧化碳气体，导致全球性的“温室效应”。为此各国力图摆脱对常规能源的依赖，加速发展可再生能源。作为最理想的可再生能源，太阳能具有“取之不尽，用之不竭”的特点，而利用太阳能发电具有环保等优点，而且不必考虑其安全性问题。所以在发达国家得到了高度重视，欧洲联盟国家计划在 2010 年太阳能光电转换的电力占有总电力的 1.5%，美国启动了“百万屋顶”计划。在能源短缺，环境保护问题日益严重的我国，低成本高效率地利用太阳能尤为重要。

太阳能电池就是利用光伏效应将太阳能直接转换为电能的一种装置。常规太阳能电池简单装置如图 1 所示。当 N 型和 P 型两种不同型号的半导体材料接触后，由于扩散和漂移作用，在界面处形成由 P 型指向 N 型的内建电场。当光照在太阳能电池的表面后，能量大于禁带宽度的光子便激发出电子和空穴对，这些非平衡的少数载流子在内电场的作用下分离开，在电池的上下两极累积，这样电池便可以给外界负载提供电流。

从本世纪 70 年代中期开始了地面用太阳能电池商品化以来，晶体硅就作为基本的电池材料占据着统治地位，而且可以确信这种状况在今后 20 年中不会发生根本的转变。以晶体硅材料制备的太阳能电池主要包括：单晶硅太阳能电池，铸造多晶硅太阳能电池，非晶硅太阳能电池和薄膜晶体硅电池。单晶硅电池具有电池转换效率高，稳定性好，但是成本较高；非晶硅太阳能电池则具有生产效率高，成本低廉，但是转换效率较低，而且效率衰减得比较厉害；铸造多晶硅太阳能电池则具有稳定得转换的效率，而且性能价格比最高；薄膜晶体硅太阳能电池则现在还只能处在研发阶段。目前，铸造多晶硅太阳能电池已经取代直拉单晶硅成为最主要的光伏材料。但是铸造多晶硅太阳能电池的转换效率略低于直拉单晶硅太阳能电池，材料中的各种缺陷，如晶界、位错、微缺陷，和材料中的杂质碳和氧，以及工艺过程中玷污的过渡族金属被认为是电池转换效率较低的关键原因，因此关于

铸造多晶硅中缺陷和杂质规律的研究，以及工艺中采用合适的吸杂，钝化工艺是进一步提高铸造多晶硅电池的关键。另外，寻找适合铸造多晶硅表面织构化的湿化学腐蚀方法也是目前低成本制备高效率电池的重要工艺。

从固体物理学上讲，硅材料并不是最理想的光伏材料，这主要是因为硅是间接能带半导体材料，其光吸收系数较低，所以研究其他光伏材料成为一种趋势。其中，碲化镉(CdTe)和铜铟硒(CuInSe₂)被认识是两种非常有前途的光伏材料，而且目前已经取得一定的进展，但是距离大规模生产，并与晶体硅太阳能电池抗衡需要大量的工作去做。

5. 晶体硅太阳能电池及材料

引言

1839年，法国 Becquerel 第一次在化学电池中观察到光伏效应。1876年，在固态硒(Se)的系统也观察到了光伏效应，随后开发出 Se / CuO 光电池。有关硅光电的报道出现于 1941 年。贝尔实验室 Chapin 等人

1954 年开发出效率为 6% 的单晶硅光电池，现代硅太阳能电池时代从此开始。硅太阳能电池于 1958 年首先在航天器上得到应用。在随后 10 多年里，硅太阳能电池在空间应用不断扩大，工艺不断改进，电他设计逐步定型。这是硅太阳能电池发展的第一个时期。第二个时期开始于 70 年代初，在这个时期背表面场、细栅金属化、浅结表面扩散和表面织构化开始引入到电池的制造工艺中，太阳电池转换效率有了较大提高。与此同时，硅太阳能电池开始在地面应用，而且不断扩大，到 70 年代末地面用太阳电池产量已经超过空间电池产量，并促使成本不断降低。80 年代初，硅太阳能电池进入快速发展的第三个时期。这个时期的主要特征是把表面钝化技术、降低接触复合效应、后处理提高载流子寿命、改进陷光效应引入到电他的制造工艺中。以各种高效电池为代表，电池效率大幅度提高，商业化生产成本进一步降低，应用不断扩大。

在太阳电他的整个发展历程中，先后出现过各种不同结构的电池，如肖特基(Ms) 电池，MIS 电池，MINP 电他；异质结电池（如 ITO (n) / Si (p) ， a-Si / c-Si, Ge / Si）等，其中同质 p-n 结电池结构自始至终占主导地位，其它结构对太阳电他的发展也有重要影响。

以材料区分,有晶硅电池,非晶硅薄膜电池,铜钢硒(CIS)电池,碲化镉(CdTe)电池,砷化镓电他等,而以晶硅电池为主导,由于硅是地球上储量第二大元素,作为半导体材料,人们对它研究得最多、技术最成熟,而且晶硅性能稳定、无毒,因此成为太阳电池研究开发、生产和应用中的主体材料。

1 晶硅电他的技术发展

1.1 地面应用推动各种新型电池的出现和发展

晶硅电池在70年代初引入地面应用。在石油危机和降低成本的推动下,太阳电池开始了一个蓬勃发展时期,这个时期不但出现了许多新型电池,而且引入许多新技术。例如:

(1)背表面电场(BSF)电池——在电他的背面接触区引入同型重掺杂区,由于改进了接触区附近的收集性能而增加电他的短路电流;背场的作用可以降低饱和电流,从而改善开路电压,提高电池效率。

(2)紫光电他——这种电池最早(1972)是为通信卫星开发的。因其浅结(0.1—0.2 μm)密栅(30/cm)、减反射(Ta₂O₅—短波透过好)而获得高效率。在一段时间里,浅结被认为是高效的关键技术之一而被采用。

(3)表面织构化电池——也称绒面电池,最早(1974)也是为通讯卫星开发的。其AM0时电池效率 $\eta \geq 15\%$,AMI时 $\eta > 18\%$ 。这种技术后来被高效电他和工业化电池普遍采用。

(4)异质结太阳电池——即不同半导体材料在一起形成的太阳电池J₁SnO/Si, In₂O/Si, (In₂O₃+SnO₂/Si)电池等。由于SnO₂、In₂O₃、(In₂O₃+SnO₂)等带隙宽,透光性好,制作电池工艺简单,曾引起许多研究者的兴趣。目前因效率不高等问题研究者已不多,但SnO₂、In₂O₃、(In₂O₃+SnO₂)是许多薄膜电他的重要构成部分,作收集电流和窗口材料用。

(5)MIS电池——是肖特基(MS)电他的改型,即在金属和半导体之间加入1.5—3.0nm绝缘层,使MS电池中多子支配暗电流的情况得到抑制,而变成少子隧穿决定暗电流,与pn结类似。

其中i层起到减少表面复合的作用。经过改进的MIS电池正面有20—40 μm 的SiO₂膜,在膜上真空蒸发金属栅线,整个表面再沉积SiN薄膜。SiN薄膜的作用是:①保护电池,增加耐候性;②作为减反射层(ARC);降低薄膜复合速度:

①在 p-型半导体一侧产生一个 n 型导电反型层。对效率产生决定性影响的是在介电层中使用了银。该电池优点是工艺简单，但反型层的薄层电阻太高。

(6) MINP 电池——可以把这种电池看作是 MIS 电池和 p-n 结的结合，其中氧化层对表面和晶界复合起抑制作用。这种电池对后来的高效电池起到过渡作用。

(7) 聚光电池——聚光电池的特点是电池面积小，从而可以降低成本，同时在高光强下可以提高电池开路电压，从而提高转换效率，因此聚光电池一直受到重视。比较典型的聚光电池是斯坦福大学的点接触聚电池，其结构与非聚光点接触电池结构相同，不同处是采用 $200 \Omega \text{ cm}$ 高阻 n 型材料并使电池厚度降低到 $100 - 160 \mu\text{m}$ ，使体内复合进一步降低。这种电池在 1 个太阳下转换效率达到 26.5%。

1.2 晶硅太阳电池向高效化和薄膜化方向发展

晶硅电池在过去 20 年里有了很大发展，许多新技术的采用和引入使太阳电池效率有了很大提高。在早期的硅电池研究中，人们探索各种各样的电池结构和技术来改进电池性能，如背表面场，浅结，绒面，氧化膜钝化，Ti/Pd 金属化电极和减反射膜等。后来的高效电池是在这些早期实验和理论基础上的发展起来的。

1.2.1 单晶硅高效电池

单晶硅高效电池的典型代表是斯坦福大学的背面点接触电池 (PCC)，新南威尔士大学 (UNSW) 的钝化发射区电池 (PESC, PERC, PERL 以及德国 Fraunhofer 太阳能研究所的局域化背表面场 (LBSF) 电池等。

我国在“八五”和“九五”期间也进行了高效电池研究，并取得了可喜结果。近年来硅电池的一个重要进展来自于表面钝化技术的提高。从钝化发射区太阳电池 (PESC) 的薄氧化层 ($<10\text{nm}$) 发展到 PCC / PERC / PERL。电池的厚氧化层 (110nm)。热氧化钝化表面技术已使表面态密度降到 10^{11} cm^{-2} 以下，表面复合速度降到 $100 \text{ cm} / \text{s}$ 以下。此外，表面 V 型槽和倒金字塔技术，双层减反射膜技术的提高和陷光理论的完善也进一步减小了电池表面的反射和对红外光的吸收。低成本高效硅电池也得到了飞速发展。

(1) 新南威尔士大学高效电池

(A) 钝化发射区电池 (PESC)：PESC 电池 1985 年问世，1986 年 V 型槽技术又

被应用到该电池上，效率突破 20%。V 型槽对电他的贡献是：减少电池表面反射；垂直光线在 V 型槽表面折射后以 41° 角进入硅片，使光生载流子更接近发射结，提高了收集效率，对低寿命衬底尤为重要；V 型槽可使发射极横向电阻降低 3 倍。由于 PESC 电他的最佳发射极方块电阻在 150 Ω / \square 以上，降低发射极电阻可提高电池填充因子。

在发射结磷扩散后，10nm 厚的 Al 层沉积在电他背面，再热生长 10nm 表面钝化氧化层，并使背面 Al 和硅形成合金，正面氧化层可大大降低表面复合速度，背面 Al 合金可吸除体内杂质和缺陷，因此开路电压得到提高。早期 PESC 电池采用浅结，然而后来的研究证明，浅结只是对没有表面钝化的电他有效，对有良好表面钝化的电池是不必要的，而氧化层钝化的性能和铝吸除的作用能在较高温度下增强，因此最佳 PEsC 电他的发射结深增加到 1 μm 左右。值得注意的是，目前所有效率超过 20% 的电池都采用深结而不是浅结。浅结电池已成为历史。

PEsC 电池的金属化由剥离方法形成 Ti-pd 接触，然后电镀 Ag 构成。这种金属化有相当大的厚 / 宽比和很小的接触面积，因此这种电池可以做到大于 83% 的填充因子和 20.8% (AM1.5) 的效率。

(B) 钝化发射区和背表面电池 (PERC)：铝背面吸杂是 PEsC 电池的一个关键技术。然而由于背表面的高复合和低反射，它成了限制 PESC 电池技术进一步提高的主要因素。PERC 和 PERL 电池成功地解决了这个问题。它用背面点接触来代替 PEsC 电他的整个背面铝合金接触，并用 TCA (氯乙烷) 生长的 110nm 厚的氧化层来钝化电他的正表面和背表面。TCA 氧化产生极低的界面态密度，同时还能排除金属杂质和减少表面层错，从而能保持衬底原有的少子寿命。由于衬底的高少子寿命和背面金属接触点处的高复合，背面接触点设计成 2mm 的大间距和 200 μm 的接触孔径。接触点间距需大于少子扩散长度以减小复合。这种电池达到了大约 700mV 的开路电压和 22.3% 的效率。然而，由于接触点间距太大，串联电阻高，因此填充因子较低。

(C) 钝化发射区和背面局部扩散电池 (PERL)：在背面接触点下增加一个浓硼扩散层，以减小金属接触电阻。由于硼扩散层减小了有效表面复合，接触点间距可以减小到 250 μm 、接触孔径减小到 10 μm 而不增加背表面的复合，从而大大减小了电他的串联电阻。PERL 电池达到了 702mV 的开路电压和 23.5% 的效率。PERC

和 PER1。电池的另一个特点是其极好的陷光效应。由于硅是间接带隙半导体，对红外的吸收系数很低，一部分红外光可以穿透电池而不被吸收。理想情况下入射光可以在衬底材料内往返穿过 $4n^2$ 次， n 为硅的折射率。PER1 电池的背面，由铝在 SiO_2 上形成一个很好反射面，入射光在背表面上反射回正表面，由于正表面的倒金字塔结构，这些反射光的一大部分又被反射回衬底，如此往返多次。Sandia 国家实验室的 P. Basore 博士发明了一种红外分析的方法来测量陷光性能，测得 PERL 电池背面的反射率大于 95%，陷光系数大于往返 25 次。因此 PERL 电池的红外响应极高，也特别适应于对单色红外光的吸收。在 $1.02\mu\text{m}$ 波长的单色光下，PER1 电池的转换效率达到 45.1%。这种电池 AM0 下效率也达到了 20.8%。

(D) 埋栅电池：UNSW 开发的激光刻槽埋栅电池，在发射结扩散后，用激光在前面刻出 $20\mu\text{m}$ 宽、 $40\mu\text{m}$ 深的沟槽，将槽清洗后进行浓磷扩散。然后在槽内镀出金属电极。电极位于电池内部，减少了栅线的遮蔽面积。电池背面与 PESC 相同，由于刻槽会引进损伤，其性能略低于 PESC 电池。电池效率达到 19.6%。

(2) 斯坦福大学的背面点接触电池 (PCC)

点接触电池的结构与 PER1 电池一样，用 TCA 生长氧化层钝化电池正反面。为了减少金属条的遮光效应，金属电极设计在电池的背面。电池正面采用由光刻制成的金字塔（绒面）结构。位于背面的发射区被设计成点状， $50\mu\text{m}$ 间距， $10\mu\text{m}$ 扩散区， $5\mu\text{m}$ 接触孔径，基区也作成同样的形状，这样可减小背面复合。衬底采用 n 型低阻材料（取其表面及体内复合均低的优势），衬底减薄到约 $100\mu\text{m}$ ，以进一步减小体内复合。这种电池的转换效率在 AM1.5 下为 22.3%。

(3) 德国 Fraunhofer 太阳能研究所的深结局部背场电池 (LBSF)

LBSF 的结构与 PERL 电池类似，也采用 TCA 氧化层钝化和倒金字塔正面结构。由于背面硼扩散一般造成高表面复合，局部铝扩散被用来制作电池的表面接触， $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 电池效率达到 23.3% ($V_{oc}=700\text{mV}$, $I_{sc} \sim 41.3\text{mA}$, $FF = 0.806$)。

(4) 日本 SHARP 的 C-Si / $\mu\text{c-Si}$ 异质结高效电池

SHARP 公司能源转换实验室的高效电池，前面采用绒面织构化，在 SiO_2 钝化层上沉积 SiN 为 A 只乙后面用 RF-PECVD 掺硼的 $\mu\text{c-Si}$ 薄膜作为背场，用 SiN 薄膜作为后表面的钝化层，Al 层通过 SiN 上的孔与 μcSi 薄膜接触。 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 电他

在 AM1.5 条件下效率达到 21.4% ($V_{oc}=669\text{mV}$, $I_{sc}=40.5\text{mA}$, $FF=0.79$)。

(5) 我国单晶硅高效电池

天津电源研究所在国家科委“八五”计划支持下开展高效电池研究，其电池结构类似 UNSw 的 V 型槽 PEsC 电池，电池效率达到 20.4%。北京市太阳能研究所“九五”期间在北京市政府支持下开展了高效电池研究，电池前面有倒金字塔织构化结构，2cmX2cm 电池效率达到了 19.8%，大面 (5cmX5cm) 激光刻槽埋栅电池效率达到了 18.6%。

1.3 多晶硅高效电池

多晶硅太阳电他的出现主要是为了降低成本，其优点是能直接制备出适于规模化生产的大尺寸方型硅锭，设备比较简单，制造过程简单、省电、节约硅材料，对材质要求也较低。晶界及杂质影响可通过电他工艺改善；由于材质和晶界影响，电池效率较低。电池工艺主要采用吸杂、钝化、背场等技术。

近年来吸杂工艺再度受到重视，包括三氯氧磷吸杂及铝吸杂工艺。吸杂工艺也在微电子器件工艺中得到应用，可见其对纯度达到一定水平的单晶硅硅片也有作用，但其所用的条件未必适用于太阳电他，因而要研究适合太阳电池专用的吸杂工艺。研究证明，在多晶硅太阳电池上，不同材料的吸杂作用是不同的，特别是对碳含量高的材料就显不出磷吸杂的作用。有学者提出了磷吸杂模型，即吸杂的速率受控于两个步骤：①金属杂质的释放 / 扩散决定了吸杂温度的下限；②分凝模型控制了吸杂的最佳温度。另有学者提出，在磷扩散时硅的自间隙电流的产生是吸杂机制的基本因素。

常规铝吸杂工艺是在电池的背面蒸镀铝膜后经过烧结形成，也可同时形成电他的背场。近几年在吸杂上的工作证明，它对高效单晶硅太阳电池及多晶硅太阳电池都会产生一定的作用。

钝化是提高多晶硅质量的有效方法。一种方法是采用氢钝化，钝化硅体内的悬挂键等缺陷。在晶体生长中受应力等影响造成缺陷越多的硅材料，氢钝化的效果越好。氢钝化可采用离子注入或等离子体处理。在多晶硅太阳电池表面采用 pECVD 法镀上一层氮化硅减反射膜，由于硅烷分解时产生氢离子，对多晶硅可产生氢钝化的效果。

在高效太阳电池上常采用表面氧钝化的技术来提高太阳电他的效率，近年来在

光伏级的晶体硅材料上使用也有明显的效果，尤其采用热氧化法效果更明显。使用 PECVD 法在更低的温度下进行表面氧化，近年来也被使用，具有一定的效果。

多晶硅太阳电池的表面积由于存在多种晶向，不如(100)晶向的单晶硅那样能经由腐蚀得到理想的绒面结构，因而对其表面进行各种处理以达减反射的作用也为近期研究目标，其中采用多刀砂轮进行表面刻槽，对 10cmX10cm 面积硅片的工序时间可降到 30 秒，具有了一定的实用潜力。

多孔硅作为多晶硅太阳电池的减反射膜具有实用意义，其减反射的作用已能与双重减反射膜相比，所得多晶硅电池的效率也能达到 13.4%。我国北京有色金属研究总院及中科院感光化学研究所共同研制的在丝网印刷的多晶硅太阳能电池上使用多孔硅也已达达到接近实用的结果。

由于多晶硅材料制作成本低于单晶硅 cZ 材料，因此多晶硅组件比单晶硅组件具有更大的降低成本的潜力，因而提高多晶硅电池效率的研究工作也受到普遍重视。近 10 年来多晶硅高效电池的发展很快，其中比较有代表性的工作是 Geogia Tech. 电池，UNSW 电池，Kysera 电池等。

(1) Geogia Tech. 电池

Geogia 工业大学光伏中心使用电阻率 $0.65 \Omega \text{ cm}$ 、厚度 $280 \mu\text{m}$ 的 HEM (热交换法) 多晶硅片制作电池，n+发射区的形成和磷吸杂结合，采用快速热过程制备铝背场，用 lift-off 法制备 Ti / Pd / Ag 前电极，并加双层减反射膜。1cm² 电池的效率 AM1.5 下达到 18.6%。

(2) UNSW 电池

UNSW 光伏中心的高效多晶硅电池工艺基本上与 PER1. 电池类似，只是前表面织构化不是倒金字塔，而是用光刻和腐蚀工艺制备的蜂窝结构。多晶硅片由意大利的 Eurosolare 提供，1cm² 电池的效率 AM1.5 下，达到 19.8%，这是目前水平最高的多晶硅电池的研究结果。该工艺打破了多晶硅电池不适合采用高温过程的传统观念。

(3) Kysera 电池

日本 kyocera 公司在多晶硅高效电池上采用体钝化和表面钝化技术，PECVD SiN 膜既作为减反射膜，又作为体钝化措施，表面织构化采用反应性粒子刻边技术。背场则采用丝网印刷铝浆烧结形成。电池前面栅线也采用丝网印刷技术。15cmX15cm 大面

积多晶硅电池效率达 17.1%。目前日本正计划实现这种电池的产业化。

(4) 我国多晶硅电他

北京有色金属研究总院在多晶硅电池方面作了大量研究工作，目前 10cmX10cm 电池效率达到 11.8%。北京市太阳能研究所在“九五”期间开展了多晶硅电池研究，1cm² 电池效率达到 14.5%。我国中试生产的 10cmX10cm 多晶硅太阳电他的效率为 10—11%，最高效率为 12%。

1.4 多晶硅薄膜电池

自 70 年代以来，为了大幅度降低太阳电池的成本，光伏界一直在研究开发薄膜电池，并先后开发出非晶硅薄膜电他，硫化镉 (CdTe) 电他，铜钢硒 (CIS) 电他等。特别是非晶硅电池，80 年代初一问世，很快实现了商业化生产。1987 年非晶硅电他的市场份额超过 40%。但非晶硅电池由于效率低、不稳定 (光衰减)，市场份额逐年降低，1998 年市场份额降为 13%。cdTe 电池性能稳定，但由于资源有限和 Cd 毒性大，近 10 年来市场份额一直维持在：13%左右；c1S 电他的实验室效率不断攀升：最近达到 18. %，但由于中试产品的重复性和一致性没有根本解决，产业化进程一再推后，至今仍停留在实验室和中试阶段；与此同时，晶体硅电池效率不断提高，技术不断改进，加上晶硅稳定，无毒，材料资源丰富，人们开始考虑开发多晶硅薄膜电池。多晶硅薄膜电池既具有晶硅电他的高效、稳定、无毒和资源丰富的优势，又具有薄膜电池工艺简单、节省材料、大幅度降低成本的优点，因此多晶硅薄膜电池的研究开发成为近几年的热点。另一方面，采用薄片硅技术，避开控制单晶硅或浇铸多晶硅、切片的昂贵工艺和材料浪费的缺点，达到降低成本的目的。严格说，后者不属于薄膜电他技术，只能算作薄片化硅电池技术。

(1) CVD 多晶硅薄膜电池

各种 cvD (PECVD, RTCVD, cat — CVD, Hot — wire CVD 等) 技术被用来生长多晶硅薄膜，在实验室内有些技术获得了重要的结果。例如日本 kaneka 公司采用 PECVD 技术在 550℃ 以下和玻璃衬底上制备出具有 pin 结构的多晶硅薄膜电池，电池总厚度约 2 μm，效率达到 10%；德国 Fraunhofer 太阳能研究所使用 SiO₂ 和 siN 包覆陶瓷或 sic 包履石墨为衬底，用快速热化学气相沉积 (RTCVD) 技术沉积多晶硅薄膜，硅膜经过区熔再结晶 (ZMR) 后制备太阳电池，两种衬底的电

池效率分别达到 9.3% 和 11%。

北京市太阳能研究所自 1996 年开始开展多晶硅薄膜电池的研究工作。该所采用 RTCVD 技术在重掺杂非活性硅衬底上制备多晶硅薄膜和电池，1cm² 电池效率在 AM1.5 条件下达到 13.6%，目前正在向非硅质衬底转移。

(2) 多层多晶硅薄膜电池

uNSW1994 年提出一种多层多晶硅薄膜电池的概念和技术，1994 年与 Pacific Power 公司合作成立 kcifiC s0lar 公司开发这种电池。最近报道，该公司已经生产出 30cmX40cm 的中试电池组件。薄膜采用 CVD 工艺沉积，衬底为玻璃，通过激光刻槽和化学镀实现接触、互联和集成。据称，电池组件的主要成本是封装玻璃，商业化后的发电成本可与煤电相比。

2 太阳电池用晶硅材料

2.1 现用太阳电池硅材料

目前全世界光伏工业晶体硅太阳电池所用的晶锭的投炉料，都采用半导体工业的次品硅及其单晶硅的头尾料，其总量约占半导体工业生产硅料的 1 / 10，约为 1000~1200 吨 / 年。这种硅料的纯度大部分仍在 6N 到 7N，价格依其品位约在 10—20 美元 / kg。目前半导体工业用的投炉多晶硅料是采用三氯氢硅精馏法(西门子法)生产的，采用改进的西门子法并扩大规模进行生产是未来降低成本的有效措施之一。

由于经费制约，我国太阳级硅的研究工作限于较简易的化学与物理提纯。化学提纯是将纯度较高的冶金级硅(99%)加工成细颗粒后，使用盐酸、王水、氢氟酸等进行酸洗萃取，可将含铁量降到 200ppm 量级，然后再进行二次定向凝固(早期使用二次直拉)，将含铁量降到 0.3ppm 量级，但其纯度及成本均未能达到要求。我国具有纯度高的石英砂资源，并生产大量冶金级硅供应出口，采用冶金硅精炼的方法生产太阳级硅将来具有潜力。

2.1.1 单晶硅材料

单晶硅材料制造要经过如下过程：石英砂—冶金级硅—提纯和精炼—沉积多晶硅锭—单晶硅—硅片切割。

硅主要以 SiO_2 形式存在于石英和砂子中。它的制备主要是在电弧炉中用碳还原石英砂而成。该过程能量消耗很高，约为 $14\text{kWh}/\text{kg}$ ，因此硅的生产通常在水电过剩的地方（挪威，加拿大等地）进行。这样被还原出来的硅的纯度约 98%—99%，称为冶金级硅（MG—Si）。大部分冶金级硅用于制铁和制铝工业。目前全世界冶金级硅的产量约为 50 万吨/年。半导体工业用硅占硅总量的很小一部分，而且必须进行高度提纯。电子级硅的杂质含量约 10⁻¹⁰% 以下。

典型的半导体级硅的制备过程：粉碎的冶金级硅在硫化床反应器中与 HCl 气体混合并反应生成三氯氢硅和氢气， $\text{Si} + 3\text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$ 。由于 SiHCl_3 在 30℃ 以下是液体，因此很容易与氢气分离。接着，通过精馏使 SiHCl_3 与其它氯化物分离，经过精馏的 SiHCl_3 ，其杂质水平可低于 10⁻¹⁰% 的电子级硅要求。提纯后的 SiHCl_3 通过 CVD 原理制备出多晶硅锭。

基于同样原理可开发出另一种提纯方法，即在硫化床反应器中，用 Si 烷在很小的 Si 球表面上原位沉积出 Si。此法沉积出的 Si 粉末颗粒只有十分之几毫米，可用作 CZ 直拉单晶的投炉料或直接制造 Si 带。

拉制单晶有 CZ 法（柑祸拉制）和区熔法两种。CZ 法因使用石英柑祸而不可避免地引入一定量的氧，对大多数半导体器件来说影响不大，但对高效太阳电池，氧沉淀物是复合中心，从而降低材料少子寿命。区熔法可以获得高纯无缺陷单晶。常规采用内圆切割（ID）法将硅锭切成硅片，该过程有 50% 的硅材料损耗，成本昂贵。现在已经开发出多线切割法，可以切出很薄（~100Pm）的硅片，切割损失小（~30%），硅片表面切割损伤轻，有利于提高电池效率，切割成本低。

2. 1. 2 多晶硅材料

由于硅材料占太阳电池成本中的绝大部分，降低硅材料的成本是光伏应用的关键。浇铸多晶硅技术是降低成本的重要途径之一，该技术省去了昂贵的单晶拉制过程，也能用较低纯度的硅作投炉料，材料及电能消耗方面都较省。

（1）铸锭工艺

铸锭工艺主要有定向凝固法和浇铸法两种。定向凝固法是将硅料放在柑塌中加以熔融，然后将柑塌从热场中逐渐下降或从增塌底部通上冷源以造成一定的温度梯度，使固液界面从柑塌底部向上移动而形成晶锭。定向凝固法中有一种称为热交换法（HEM），在柑祸底部通入气体冷源来形成温度梯度。浇铸法是将熔化后

的硅液从增埚中倒入另一模具中凝固以形成晶锭，铸出硅锭呈方形，切成的硅片一般尺寸为 10cmX10cm，平均晶粒尺寸从毫米到厘米。

铸锭法中需要解决的主要问题是：（1）盛硅容器的材质。因为硅熔体冷凝时会牢固地粘附在柑埚的内壁，若两者的膨胀系数不同，硅固化时体积增加 9%，会使硅锭产生裂纹或破碎。此外，熔化硅几乎能与所有材料起化学反应，因而柑埚对硅料的污染必须控制在太阳级硅所允许的限度以内。（2）晶体结构。用调整热场等方法控制晶体结构，以生长出大小适当（数毫米）的具有单向性的晶粒，并尽量减少晶体中的缺陷，这样才有可能制成效率较高的电池。

近年来，铸锭工艺主要朝大锭的方向发展。技术先进的公司生产的铸锭多在 55cmX55cm（锭重 150kJ 左右，目前 65cmX65cm（锭重 230kJ 的方形硅锭也已被铸出，铸锭时间在 3—43h 范围，切片前硅材料的实收率可达到 83.8%。大型铸锭炉多采用中频加热，以适应大形硅锭及工业化规模。与此同时，硅锭质量也得到明显的改进，经过工艺优化和柑埚材质改进，使缺陷及杂质、氧、碳含量减少。在晶体生长中固液界面的形状会影响晶粒结构的均匀性与材料的电性能，一般而言，水平形状的固液界面较好。由于硅锭整体质量的提高，使硅锭的可利用率得到明显提高。

由于铸锭中采用低成本的柑埚及脱模涂料，对硅锭的材质仍会造成影响。近年来电磁法（EMC）被用来进行铸锭试验，方法是投炉硅料从上部连续加到熔融硅处，而熔融硅与无底的冷柑埚通过电磁力保持接触，同时固化的硅被连续地向下拉。冷增埚用水冷的铜埚来形成。目前该工艺已铸出截面为 220mmX220mm 的长硅锭，铸锭的材质纯度比常规硅锭高。生产性的铸锭炉已铸造出 500kg 的硅锭，锭的截面为 350mmX350mm，2.2m 长，固化率为 1mm/min。固化及冷却时所产生的热应力是影响硅锭质量的主要参数，应不断优化和改进。该法能否正式进入工业化生产仍在实验评估中。

我国在 80 年代初就开始了多晶硅材料和太阳电池研究，进行铸锭材料研究的有北京有色金属研究总院、上海有色金属研究所、复旦大学；其中上海有色所采用的是浇铸法，北京有色院及复旦大学采用的是定向凝固法，并铸出了 15kg 重、220mmX220mmX140mm 的硅锭。国家“九五”计划安排了 100kg 级硅锭的引进消化任务。

(2) 多晶硅结构及材料性能

采用计算机图象仪可对硅片缺陷及少子寿命等参数进行面扫描，这对观察多晶硅材料性能、结构及进行系统分析具有很大帮助。针对特有的铸锭工艺来分析氧、碳含量及其对电性能的影响是提高硅片质量的重要手段。在扫描电镜上加 EB1C（电子束感应电流法）功能部件对样品进行扫描对了解晶体硅电池因缺陷、晶界、杂质的局部影响十分有效。

(3) 硅片加工技术

常规的硅片切割采用内圆切片机，其刀损为 0.3—0.35mm，使晶体硅切割损失较大，且大硅片不易切得很薄。近几年，多线切割机的使用对晶体硅片的成本下降具有明显作用。多线切割机采用钢丝带动碳化硅磨料来进行切割硅片，切损只有 0.22mm，硅片可切薄到 0.2mm，且切割的损伤小，可减少腐蚀的深度。一般可减少 V4 硅材料的损失。目前先进的大公司基本上都采用该设备。一台设备可切割 2—4MW / 年的硅片。近期研究出可将 85% 的碳化硅磨料及油液经过离心机分离后重复使用工艺，可进一步降低材料消耗。

2.2 带状多晶硅制造技术

为了减少切片损失，在过去几十年里开发过很多种制造片状硅或带硅的技术。在 80 年代国际上曾出现过很多种生长硅带的方法，但大部分都处于实验室阶段，其原因是：（1）在高温过程中通过设备引入了过多杂质，达不到要求的纯度；（2）在再结晶过程中要求的高冷却速率会使晶体中产生过多的缺陷。在生长速度与硅带质量之间寻找平衡，其降低成本的技术难度比晶锭硅高。下边介绍几种比较成熟的带硅技术。

(1) 限边喂膜（Edge defined film growth）带硅技术

该技术的工艺过程如下：采用适当的石墨模具从熔硅中直接拉出正八角硅筒，正八角的边长比 10cm 略长，总管径约 30cm，管壁厚度（硅片厚）与石墨模具毛细形状、拉制温度和速度有关，约 200—400 μ m，管长约 5m。采用激光切割法将硅管切成 10cm \times 10cm 方形硅片。电池工艺中采用针头注入法制备电池栅线，其它工艺与常规电池工艺相同。电效率 13%—15%。该技术目前属于 ASE 公司所有，商品化生产规模是 4MW / 年，正计划扩产。

(2) 枝蔓状带硅技术

在生长硅带时两条枝蔓晶直接从柑蜗熔硅中长出，由于表面张力的作用，两条枝晶的中间会同时长出一层如蹼状的薄片，所以称为蹼状晶。切去两边的枝晶，用中间的片状晶制作太阳电池。蹼状晶在各种硅带中质量最好，但其生长速度相对较慢。

我国在 70 年代初就拉制出无位错的蹼状晶。在 80 年代中期北京有色金属研究院在国家自然科学基金支持下开展了用碳网作支持物，从横向拉制硅带的工作，并研制出了设备（研究工作在 80 年代末中止）。我国西北工业大学进行了滴硅旋转法——即用电磁法熔化硅、然后将硅液滴到旋转模具上以形成硅片的探索性研究，并达到了一定的水平。

（3）Delaware 大学多晶片状硅制造技术

该技术基于液相外延工艺，衬底为廉价陶瓷。陶瓷衬底可以重复使用。在电池制作中采用了 Al 和 POC13，吸杂和低温 PECVD-Si₃N₄，钝化技术，后者提供了体钝化和发射区钝化。1cm² 电池效率达到 15.6%。Delaware 大学和 Austropower 公司合作通过了中试产业化技术。

（4）小硅球太阳电池

硅球的平均直径为 1.2mm，约有 2 万个小球镶在 100cm² 的铝箔上以形成太阳电池，每个小球具有 p/n 结，这么多的小球在铝箔上形成并联的结构，100cm² 面积的电池效率可达到 10%。原则上可使用冶金级的小硅球，一方面小硅球本身也容易进行提纯。该方法在技术上具有一定的特色，但要降低成本在技术上仍有许多困难。该方法在 90 年代初发展起来，但近几年其研究与发展陷于停顿状态。我国复旦大学也曾对这种太阳电池工艺进行了探索性实验，掌握了基本技术的要点。

2.3 太阳级硅

美国、德国、日本的许多家公司在 80 年代末停止了太阳级硅的研究，主要是因为技术进展缓慢，同时有大量低成本半导体工业次品硅可供利用。另一方面，太阳级硅生产的经济规模约为 1000 吨 / 年，成本可降到 20 美元 / kg，而目前光伏工业每年的需求量只有 400 — 500 吨。当光伏工业的用量达到一定的水平，而半导体工业为其提供不了低价的次品硅料时，太阳级硅才能进行正式生产。

一种目前制造太阳级硅的主要方法是使用精炼的冶金级硅，采用电子束加热真空抽除法去除磷杂质，然后凝固，再采用等离子体氧化法去除硼及碳，再凝固。采用水蒸气混合的冠等离子体可将硼含量降到 0.1ppm 的水平，经过再凝固硅中的金属杂质含量可降到 ppb 的水平。用此太阳级硅制成的常规工艺电他的最高效率可达到 14% ，高效工艺制的电他的最高效率可达到 16% 。此太阳级硅已进入每年生产 60 吨的中试阶段。

由于经费制约，我国太阳级硅的研究工作限于较简易的化学与物理提纯。化学提纯是将纯度较高的冶金级硅 (99%) 加工成细颗粒后，使用盐酸、王水、氢氟酸等进行酸洗萃取，此步可将含铁量降到 200ppm 量级，然后再进行二次定向凝固（早期使用二次直拉），可将含铁量降到 0.3ppm 量级，但其纯度及成本均未能达到要求。我国具有纯度高的石英砂资源，并有大量冶金级硅出口，采用冶金硅精炼的方法生产太阳级硅具有很大潜力。

3 晶硅电池的商业化生产和市场发展

3.1 商业化电池技术

(1) 常规商业化电池：商业化晶硅电池主要结构是 p 型结。绒面、背场和减反射涂层被普遍采用，细栅金属化技术在不断改进，单晶硅商业化电池效率在 $13\% - 16\%$ 之间。多晶硅电池工艺与单晶硅基本相同，但没有绒面技术。商业化多晶硅电池效率在 $11\% - 14\%$ 之间。

(2) 刻槽埋栅电他：BP 公司利用 UNSW 技术生产的刻槽埋栅电池已经实现商业化，规模为 $2\text{MW}/\text{年}$ ，电池效率 $15\% - 17\%$ 之间，成本与常规电池基本相同。

(3) AsE 多晶硅片电池效率在 $11\% - 13\%$ 之间。

3.2 晶硅电池的产业和市场发展

国际光伏工业在过去 15 年的平均年增长率为 20% 。90 年代后期，世界市场出现了供不应求的局面，发展更加迅速。1997 年世界太阳电他光伏组件生产达 122MW ，比 1996 年增长了 38% ，是 4 年前的 2 倍，是 7 年前 3 倍，比集成电路工业发展更快，超出光伏专家最乐观的估计。1998 年光伏组件生产达到 157.4MW ，比 1998 年增长 29% 。光伏发电累计总装机容量达到 800MW 。

在产业化方面，各国一直在通过改进工艺、扩大规模和开拓市场等措施降低成

本，并取得了巨大进展。以美国为代表，政府（能源部）在 1990 年启动了 PVMat（光伏制造技术）的产业化计划，通过国家可再生能源实验室（NREI / 实施，并成立了国家 PV 中心，联合产业界、大学和研究机构共同进行攻关，以求大幅度降低成本。这一计划的实施已经产生了非常明显的效果，使商品化电池效率提高到 12—15%。生产规模从过去的 1—5MW / 年发展到 5—20MW / 年，并正在向 50MW 扩大，如英国 BP Solar 公司计划 2000 年达到 50MW / 年的生产能力。生产工艺不断简化，自动化程度不断提高。三年来，世界的光伏组件的生产成本降低了 32% 以上，第一次降到 3 美元 / wp 以下，国际市场光伏组件售价在 4 美元 / Wp 左右。这种趋势还在继续发展，预测 1999 年生产成本可降到 1.79 美元 / Wp，在 1994 年的水平上降低 60%。美国 PV 系统电价成本目标：2004 年光伏系统安装成本 3 美元 / Wp（11 美分 / kwh），2010 年 1.5 美元 / wp（6 美分 / kwh 以下）。

欧洲和日本也有类似的计划。竞争促使各发达国家的产业化技术几乎以大致相同的水平和速度向前发展：

在太阳能光伏发电领域，印度是发展中国家的排头兵。截止 1997 年 3 月 / p 度总的 pv 系统容量达到 30MW。目前印度有 6 个太阳电池制造厂，12 个组件生产厂，1998 年生产 10MW 组件，1998—2002 年印度计划安装 150MW。2002 年生产将达到 50MW / 年。

1998 年 7 月在 Vienna 召开了第二届国际太阳能光伏会议，在这个迄今规模最大的世界光伏会议上，一向观点保守和沉默寡言的欧盟科技局局长 Wolfgang Palz 博士在会上谈到他对目前 PV 技术商业化发展态势的观点：光伏技术的发展已经很明显地结束了它的前期开拓阶段，并开始了它的蓬勃发展阶段。1998 年 7 月正当世界金融危机最疯狂的时候，世界 PV 市场比 1997 年同期增长了 50%。世界各大公司纷纷实施和制定扩产计划，1998 年初 PVIR 统计，正在实施和扩产的新增能力为“3.5MW / 年，比 1997 年高出 2 倍。可以说，太阳能光伏发电技术和产业正在腾飞，预测今后 10 年光伏组件的生产将以 30% 左右甚至更高的递增速度发展，2000 年将达到 300MW / 年，2010 年达到 4.6GW / 年（保有量 20GW）。快速发展的屋顶计划、各种减免税政策和补贴政策以及逐渐成熟的绿色电力价格为 PV 市场的发展提供了坚实

的发展基础。市场发展将逐步由边远地区和农村的补充能源向全社会的替代能源过渡。预测到下个世纪中叶，太阳能光伏发电将达到世界总发电量 15—20%，成为人类的基础能源之一。第二届世界太阳能光伏会议主席 Jurgen Schmidt 在大会上说到：“作为全球一种能源，光伏发电在下世纪前半期将超过核电，是 2030 年还是 2050 年的最后几年超过，只是个时间问题。”

我国太阳能光伏发电技术产业化及市场发展经过近 20 年的努力，已经奠定良好的基础。目前有 4 个单晶硅电池及组件生产厂和 2 个非晶硅电池生产厂。但在总体水平上我国同国外相比还有很大差距，主要表现在以下几个方面：

(1) 生产规模小。目前 4 个单晶硅电池生产厂基本上保持在 1986—1990 年引进时的规模 and 水平。各厂家在引进时标称生产能力为 1MW/年，但在不同的工艺环节上都存在着“瓶颈”，实际生产能力都在 0.5MW/年左右，所以我国太阳能电池总的实际生产能力约 2MW/年，1998 年我国太阳能电池的产量为 2MW，约占世界产量的 1.3%。生产的规模化程度比国外 5—20MW 生产规模低一个数量级。目前各厂都在努力扩大生产能力，可望在 1—2 年内将各厂的实际生产能力扩大到 1MW/年，总能力达到 4MW/年。多晶硅电池有利于进一步降低成本，目前我国还是空白。国家已将多晶硅电池的产业化作为“九五”计划的重点进行了安排，可望在 2000 年形成规模化生产。

(2) 技术水平较低。我国太阳能电池的效率较低，平均在 11—13%；组件封装水平低，工程现场证明，部分产品大约 3—5 年就出现发黄、起泡、焊线脱落、效率下降等问题，近几年产品质量有提高，但同国外仍有一定差距。

(3) 专用原材料国产化程度不高。专用材料如银浆、封装玻璃、EVA 等尚未完全实现国产化。国家曾将提高商业化电池效率和材料国产化列入“八五”计划，并取得一定成果，但性能有待进一步改进，各厂家部分材料仍然采用进口品。

(4) 成本高。目前我国电池组件成本约 35 元/Wp (4.2 美元/Wp)，平均售价 44 元/Wp (5.3 美元/Wp)，成本和售价都高于国外产品。

我国地域广大、人口众多，7000 万人生活在无电地区，光伏发电的潜在市场非常巨大。但由于光伏发电成本高，目前尚不能与常规发电相比。尽管如此，我国的光伏市场仍在逐年地发展和扩大，1998 年的安装容量约 2.5MW。到 1998 年底，

光伏发电系统总保有量约 12MW。

在光伏市场发展方面，国外各大公司和世界银行对于开拓中国的光伏市场都表现出极大的兴趣和热心，并开始付诸行动。这对我国光伏事业的发展无疑起着极大的推动和催化作用。例如，世界银行通过 GEF（全球环境基金）项目向中国软贷款用于风能和光伏发电的市场开拓，其中包括 10MW 的户用光伏发电系统。该项目在国家经贸委组织下正在执行中。荷兰政府向我国新疆维吾尔自治区赠送近 10 万套户用光伏电源系统，价值 1500 万美元。日本、美国、欧洲的一些公司也都有过类似的赠送和示范项目。面对这样一个将被开发的巨大市场，我国的光伏发电产业必须加快发展步伐。

4. 二十一世纪晶硅电他的发展趋势和展望

90 年代以来，在可持续发展战略的推动下，可再生能源技术进入了快速发展的阶段。据专家预测，下世纪中叶太阳能和其它可再生能源能够提供世界能耗的 50%。

4. 1 光伏建筑将成为光伏应用的最大市场

太阳能光伏系统和建筑的完美结合体现了可持续发展的理想范例，国际社会十分重视。国际能源组织（IEA）于 1991 和 1997 相继两次启动建筑光伏集成计划，获得很大成功，建筑光伏集成有许多优点：①具有高技术、无污染和自供电的特点，能够强化建筑物的美感和建筑质量；②光伏部件是建筑物总构成的一部分，除了发电功能外，还是建筑物耐候的外部蒙皮，具有多功能和可持续发展的特征；③分布型的太阳辐射和分布型的建筑物互相匹配；④建筑物的外壳能为光伏系统提供足够的面积；⑤不需要额外的昂贵占地面积，省去了光伏系统的支撑结构，省去了输电费用；⑥PV 阵列可以代替常规建筑材料，从而节省安装和材料费用，例如昂贵的外墙包覆装修成本有可能等于光伏组件的成本，如果安装光伏系统被集成到建筑施工过程，安装成本又可大大降低；⑦在用电地点发电，避免传输和分电损失（5—10%），降低了电力传输和电力分配的投资和维修成本，建筑光伏集成系统既适用于居民住宅，也适用商业、工业和公共建筑，高速公路音障等，既可集成到屋顶，也可集成到外墙上；既可集成到新设计的建筑上，也可集成到现有的建筑上。光伏建筑集成近年来发展很快，许多国家相继制定了本国的光伏屋顶计划。建筑自身能耗占世界总能耗的 1/3，是未来太阳能光伏发电的最大

市场。光伏系统和建筑结合将根本改变太阳能光伏发电在世界能源中的从属地位，前景光明。

4. 2 PV 产业向百兆瓦级规模和更高技术水平发展

目前 PV 组件的生产规模在 5—20Mw / 年，下世纪将向百兆瓦级甚至更大规模发展。同时自动化程度、技术水平也将大大提高，电池效率将由现在的水平（单晶硅 13%—15%，多晶硅 11%—13%）向更高水平（单晶硅 18%—20%，多晶硅 16%—18%）发展，同时薄膜电池在不断研究开发，这些都为大幅度降低光伏发电成本提供了技术基础。

4. 3 下世纪前半期光伏发电将超过核电

专家预计，下世纪前半期的 30—50 年代，光伏发电将超过核电。1997 年世界发电总装机容量约 2000GW，其中核电约 400GW，约占 20%，世界核电目前是收缩或维持，而我国届时核能将发展到约 100GW，这就意味着世界光伏发电届时将达到 500GW 左右。1998 年世界光伏发电累计总装机容量 800MW，以 2040 年计算，这要求光伏发电年增长率达 16.5%，这是一个很实际的发展速度，前提是光伏系统安装成本至少能和核能相比。

4. 4 PV 发电成本下降趋势

美国能源部 1996 年关于 PV 联网系统市场价格下降趋势预测表明，每年它将以 9% 速率降低。1996 年 pv 系统的平均安装成本约 7 美元 / W_p，预计 2005 年安装成本将降到 3 美元 / W_p，PV 发电成本 11 美元 / kWh；2010 年 PV 发电成本降到 6 美分 / kWh，系统安装成本约 1.7 美元 / W_p。

降低成本可通过扩大规模、提高自动化程度和技术水平、提高电池效率等途径实现。可行性研究指出，500MW / 年的规模，采用现有已经实现商业化生产的晶硅技术，可使 PV 组件成本降低到：欧元左右（其中多晶硅电池组件成本 0.91 欧元 / W_p），如果加上技术改进和提高电池效率等措施，组件平均成本可降低到 1 美元 / W_p。在这个组件成本水平上，加上系统其它部件成本降低，发电成本 6 美分 / kWh 是能实现的。考虑到薄膜电池，未来降低成本的潜力更大，因此在下世纪前 10—30 年把 PV 系统安装成本降低到与核电可比或更低是完全可能的。 返回 11

6. 非晶硅太阳电池

引言

1976年卡尔松和路昂斯基报告了无定形硅(简称a-Si)薄膜太阳电池的诞生。当时、面积样品的光电转换效率为2.4%。时隔20多年,a-Si太阳电池现在已发展成为最实用廉价的太阳电池品种之一。非晶硅科技已转化为一个大规模的产业,世界上总组件生产能力每年在50MW以上,组件及相关产品销售额在10亿美元以上。应用范围小到手表、计算器电源大到10Mw级的独立电站。涉及诸多品种的电子消费品、照明和家用电源、农牧业抽水、广播通讯台站电源及中小型联网电站等。a-Si太阳电池成了光伏能源中的一支生力军,对整个洁净可再生能源发展起了巨大的推动作用。非晶硅太阳电池的诞生、发展过程是生动、复杂和曲折的,全面总结其中的经验教训对于进一步推动薄膜非晶硅太阳电池领域的科技进步和相关高新技术产业的发展有着重要意义。况且,由于从非晶硅材料及其太阳电池研究到有关新兴产业的发展是科学技术转化为生产力的典型事例,其中的规律性对其它新兴科技领域和相关产业的发展也会有有益的启示。本文将追述非晶硅太阳电池的诞生、发展过程,简要评述其中的关键点,指出进一步发展的方向。

1. 非晶硅太阳电池的诞生

1.1 社会需求催生a-Si太阳电池

太阳电池在70年代中期诞生,这是科学家力图使自己从事的科研工作适应社会需求的一个范例。他们在报告中提出了发明非晶硅太阳电池的两大目标:与昂贵的晶体硅太阳电池竞争;利用非晶硅太阳电池发电,与常规能源竞争。70年代曾发生过有名的能源危机,这种背景促使科学家把对a-Si材料的一般性研究转向廉价太阳电池应用技术创新,这种创新实际上又是非晶半导体向晶体半导体的第三次挑战。太阳电池本来是晶体硅的应用领域,挑战者称,太阳电池虽然是高品位的光电子器件,但不一定要用昂贵的晶体半导体材料制造,廉价的非晶硅薄膜材料也可以胜任。

1.2 非晶硅太阳电池的理论与技术基础的确立

无定形材料第一次在光电子器件领域崭露头角是在1950年。当时人们在寻找适用于电视摄像管和复印设备用的光电导材料时找到了无定形硒(a-Se)和无定

形三硫化锑 ($a\text{-SbS}_3$)。当时还不存在非晶材料的概念及有关的领域,而晶体半导体的理论基础——能带理论,早在 30 年代就已成熟,晶体管已经发明,晶体半导体光电特性和器件开发正是热点。而 $a\text{-Se}$ 和 $a\text{-SbS}_3$ 这类材料居然在没有基础理论的情况下发展成为产值在 10 亿美元的大产业,非晶材料的这第一次挑战十分成功,还启动了对非晶材料的科学技术研究。1957 年斯皮尔成功地测量了 $a\text{-Se}$ 材料的漂移迁移率;1958 年美国的安德松第一次在论文中提出,无定形体系中存在电子局域化效应;1960 年,前苏联人约飞与热格尔在题为“非晶态、无定形态及液态电子半导体”的文章中,提出了对非晶半导体理论有重要意义的论点,即决定固体的基本电子特性是属于金属还是半导体、绝缘体的主要因素是构成凝聚态的原子短程结构,即最近邻的原子配位情况。从 1960 年起,人们开始致力于制备 $a\text{-Si}$ 和 $a\text{-Ge}$ 薄膜材料。早先采用的方法主要是溅射法。同时有人系统地研究了这些薄膜的光学特性。1965 年斯特林等人第一次采用辉光放电 (GD) 或等离子体增强化学气相沉积 (简为 PECVD) 制备了氢化无定形硅 ($a\text{-Si:H}$) 薄膜。这种方法采用射频 (直流) 电磁场激励低压硅烷等气体,辉光放电化学分解,在衬底上形成 $a\text{-Si}$ 薄膜。开始采用的是电感耦合方式,后来演变为电容耦合方式,这就是后来的太阳电池用 $a\text{-Si}$ 材料的主要制备方法。

1960 年发生了非晶半导体在器件应用领域向晶体半导体的第二次挑战。这就是当年美国人欧夫辛斯基发现硫系无定形半导体材料具有电子开关存储作用。这个发现在应用上虽然不算成功,但在学术上却具有突破性的价值。诺贝尔奖获得者莫特称,这比晶体管的发明还重要。它把科学家的兴趣从传统的晶体半导体材料引向了非晶半导体材料,掀起了研究非晶半导体材料的热潮。我国也正是在 60 年代末期开始从事该领域的研究的。从 1966 年到 1969 年有关科学家深入开展了基础理论研究,解决了非晶半导体的能带理论,提出了电子能态分布的 Mott - CFO 模型和迁移边的思想。

电子能带理论是半导体材料和器件的理论基础。它可以指导半导体器件的设计和工艺,分析材料和器件的性能。尽管目前非晶硅能带理论还不很完善,也存在争议,但毕竟为非晶半导体器件提供了理论上的依据。

1.3 半导体能带结构简介

固体能带理论是把量子力学原理用于固态多体系统推算出来的。即,在特定的

晶格和相应的电势场分布下求解薛定谔方程，获得体系中电子态按能量的分布。在晶体情况下，晶格结构具有空间的周期性，相应的电势场也呈周期性分布。在晶格绝热近似和单电子近似条件下，可以求得相当准确的电子能态分布，即电子能带结构。晶体能带的基本特征是，存在导带与价带以及隔开这两者的禁带，或者称为带隙。导带底和价带顶有单一的能量值，在导带底以上的导带态为扩展态，这些态上的电子是迁移率很高的自由电子。价带顶以下的能态为空穴的扩展态，这里的自由空穴迁移率也很高。理想半导体禁带中是没有电子能态的。但在半导体中难免有缺陷和杂质，分别具有各自的能态，表面和界面处晶格不连续带来表面态和界面态，这些异常的能态常常落在禁带中，称为隙态。其上占据的电子是局域化的，起载流子复合产生中心的作用。晶体的隙态密度很小，通常在 $10^{15} / \text{cm}^3$ 左右，且呈离散分布。另一方面固体中电子按照能量的统计分布遵循费米分布函数规律。被电子占据的几率为 $1/2$ 的能级称为费米能级。费米能级也称为平衡体系的化学势。通常情况下，半导体的费米能级位于禁带。费米能级距导带底较近，则电子为多数载流子，材料为 n 型。费米能级距价带顶近的，空穴为多数载流子，材料为 p 型。费米能级位置可以通过适当掺杂加以调节。就是说，半导体电导的数量和类型都可以用掺杂的方法调节。

由于非晶硅材料是亚稳固体，其晶格的近程配位与相应晶体的相当。但它是长程无序，原子间的键长与键角存在随机的微小变化，它的实际结构为硅原子组成的网络结构；网络内的硅悬挂键密度比较高。这些是非晶硅结构的两个基本特点。这样复杂的体系的电子能带结构与晶体能带既有相似之处，也存在巨大的差别。其相似之处在于，价电子能态也可分为导带、价带和禁带，但导带与价带都带有伸向禁带的带尾态。带尾态与键长、键角的随机变化有关，导带底价带顶被模糊的迁移边取代，扩展态与局域态在迁移边是连续变化的，高密度的悬挂键在隙带中引进高密度的局域态。通常隙态密度高于 $10^{17} / \text{cm}^3$ ，过剩载流子通过隙态复合，所以通常非晶材料的光电导很低，掺杂对费米能级的位置的调节作用也很小，这种 a-Si 材料没有有用的电子特性。氢化非晶硅材料中大部分的悬挂键被氢补偿，形成硅氢键，可以使隙态密度降至 $10^{16} / \text{cm}^3$ 以下，这样的材料才表现出良好的器件级电子特长。

1. 4. a-Si 太阳能电池的基本结构

对 a-Si 薄膜掺杂以控制其导电类型和电导数量的工作, 1975 年第一次由莱康柏和斯皮尔实现, 同时也就实现了 a-Si-pn 结的制作。事实上, 由于 a-Si 多缺陷的特点, a-Si pn 结是不稳定的, 而且光照时光电导不明显, 几乎没有有效的电荷收集。所以, a-Si 太阳能电池基本结构不是 pn 结而是 pin 结。掺硼形成 p 区, 掺磷形成 n 区, i 为非杂质或轻掺杂的本征层 (因为非掺杂 a. s 是弱 n 型)。重掺杂的 p、n 区在电池内部形成内建势, 以收集电荷。同时两者可与导电电极形成欧姆接触, 为外部提供电功率。i 区是光敏区, 光电导 / 暗电导比在 10^5 - 10^6 , 此区中光生电子空穴是光伏电力的源泉。非晶体硅结构的长程无序破坏了晶体硅光电子跃迁的选择定则, 使之从间接带隙材料变成了直接带隙材料, 对光子的吸收系数很高, 对敏感光谱域的吸收系数在 10^{14}cm^{-1} 以上, 通常 $0.5\mu\text{m}$ 左右厚度 a-Si 就可以将敏感谱域的光吸收殆尽。所以, p/i/n 结构的 a-Si 电他的厚度取 $0.5\mu\text{m}$ 左右, 而作为死光吸收区的 p、n 层的厚度在 10nm 量级。

1. 5 小结

总之, 非晶硅太阳能电池既是应用需求的产物, 又是非晶半导体技术探索和基础理论研究的结果。科技创新与社会需求相结合产生巨大的价值。当今每一项科技创新都包含技术探索和基础理论研究两方面, 不可偏废其中之一。当然, 不同课题或一个课题的不同发展阶段, 侧重点会有不同。科学技术发展史上, 有些领域先形成的基础理论, 等待技术成熟后才结出硕果, 也有些领域先产生应用技术, 技术发展推动基础理论研究, 产生理论成果, 理论的确立又指导应用技术走向成熟。

2. 非晶硅太阳能电池的初期发展

2. 1. 初期的技术进步和繁荣

半导体巨型电子器件——太阳能电池可用廉价的非晶硅材料和工艺制作, 这就激发了科研人员、研究单位纷纷投入到这个领域的研究中, 也引起了企业界的重视和许多国家政府的关注, 从而推动了非晶硅太阳能电池的大发展。非晶硅太阳能电池很快走出了实验室, 走进了中试线和较大规模的生产线。从技术上看, 非晶硅太阳能电池这一阶段的进步主要表现在: (1) 从简单的 $\text{ITO} / \text{p-i-n (a-Si)} / \text{Al}$ 发展成为 $\text{SnO}_2(\text{F}) / \text{p-a-SiC} / \text{i-a-Si} / \text{n-a-Si} / \text{Al}$ 这样比较复杂实用的

结构。SnO₂ 透明导电膜比 ITO 更稳定，成本更低，易于实现织构，从而增加太阳能电池对光的吸收。采用 aSiC:H 作为 p 型的窗口层，带隙更宽，减少了 P 层的光吸收损失，更好地利用入射的太阳光能。（2）对 a-Si 层和两个电极薄层分别实现了激光划线分割，实现了集成化组件的生产。（3）出现了单室成批生产和多室的流水生产非晶硅薄膜的两种方式。在生产上还出现了以透明导电玻璃为衬底的组件生产和以柔性材料（如不锈钢）为衬底的两种电池组件的生产方式。世界上出现了许多以 a-Si 太阳能电池为主要产品的企业或企业分支。例如，美国的 CHRONAR、SOLAREX、ECD 等，日本有三洋、富士、夏普等。CHRONAR 公司是 a-Si 太阳能电池产业开发的急先锋，不仅自己有生产线，还向其它国家输出了 6 条 MW 级生产线。美、日各公司还用自已的产品分别安装了室外发电的试验电站，最大的有 100kW 容量。在 80 年代中期，世界上太阳能电池的总销售量中非晶硅占有 40%，出现非晶硅、多晶硅和单晶硅三足鼎立之势。

2. 2. aSI 太阳能电池的优势

技术向生产力如此高速的转化，说明非晶硅太阳能电池具有独特的优势。这些优势主要表现在以下方面：

（1）材料和制造工艺成本低。这是因为衬底材料，如玻璃、不锈钢、塑料等，价格低廉。硅薄膜厚度不到 1 μ m，昂贵的纯硅材料用量很少。制作工艺为低温工艺（100—300 $^{\circ}$ C），生产的耗电量小，能量回收时间短）（2）易于形成大规模生产能力。这是因为核心工艺适合制作特大面积无结构缺陷的 a—Si 合金薄膜；只需改变气相成分或者气体流量便可实现…n 结以及相应的迭层结构；生产可全流程自动化。（3）品种多，用途广。薄膜的 aSi 太阳能电池易于实现集成化，器件功率、输出电压、输出电流都可自由设计制造，可以较方便地制作出适合不同需求的多品种产品。由于光吸收系数高，暗电导很低，适合制作室内用的微低功耗电源，如手表电池、计算器电池等。由于 aSi 膜的硅网结构力学性能结实，适合在柔性的衬底上制作轻型的太阳能电池。灵活多样的制造方法，可以制造建筑集成的电池，适合户用屋顶电站的安装。

2. 3 发展势头受挫

非晶硅太阳能电池尽管有如上诸多的优点，但缺点也是很明显的。主要是初始光

电转换效率较低，稳定性较差。初期的太阳能电池产品初始效率为 5%–6%，标准太阳光强照射一年后，稳定化效率为 3%–4%，在弱光下应用当然不成问题，但在室外强光下，作为功率发电使用时，稳定性成了比较严重的问题。功率发电的试验电站性能衰退严重，寿命较短，严重影响消费者的信心，造成市场开拓的困难，有些生产线倒闭，比如 CHRONAR 公司。

2. 4 封装的不稳定问题

第一阶段 a-Si 太阳能电池产品性能衰退问题实际上有两个方面，即封装问题和构成电池的 aSi 材料不稳定性问题。封装问题主要是：封装材料老化和封装存在缺陷，环境中的有害气氛对电他的电极材料和电极接触造成损害，使电池性能大幅度下降甚至于失效。解决这一问题主要靠改进封装技术，在采取了玻璃层压封装（这是指对玻璃衬底的电池）和多保护层的热压封装（对不锈钢衬底电池），基本上解决了封装问题。目前太阳能电池使用寿命已达到 10 年以上。

2. 5. a-Si 材料和太阳能电池的光致衰退机制

a-Si 薄膜在强光（通常是一个标准太阳的光强， $100\text{mW} / \text{cm}^2$ ）下照射数小时，光电导逐渐下降，光照后暗电导可下降几个数量级并保持相对稳定；光照的样品在 160°C 下退火，电导可恢复原值，这就是有名的斯太不拉一路昂斯基效应，简称 SWF。暗电导的阿兰纽斯特特性测量表明，光照时电导激活能增加，这意味着费米能级从带边移向带隙中央，说明了光照在带隙中部产生了亚稳的能态或者说产生了亚稳缺陷中心。这种亚稳缺陷可用退火消除。根据半导体载流子产生复合理论，禁带中央的亚稳中心的复合几率最大，具有减少光生载流子寿命的作用；同时它又作为载流子的陷阱，引起突间电荷量的增加，降低 i 层内的电场强度，使光生载流子的自由漂移距离缩短，减少载流子收集效率。这就使太阳电他的性能下降。

研究光致亚稳态的机理，寻找克服光致衰退的办法，不仅对完善发展非晶硅材料的基础理论是重要的，而且对改善太阳电他的性能也很紧迫。从对太阳能电池产品的使用来说，还要解决加速光衰、标定产品稳定性能的问题。

世界上凡从事 a-Si 研究和开发应用的实验室，都在研究光致衰退的问题，开展了各种实验观察，提出了种种的理论模型。但是，至今还没有一个令人信服的统一的模型可以解释各种主要的实验事实。比较一致的看法是，光致衰退与 a-Si

材料中氢运动有关。比较重要的模型有：（1）光生载流子无辐射复合引起弱的 Si-Si 键的断裂，产生悬挂键，附近的氢通过扩散补偿其中的一个悬键，同时增加一个亚稳的悬键。（2）悬键的荷电对 T 了和 T 茅与光生载流子相互作用，变成两个乃态，乃态是一个单电子占据的悬键态，它的出现使费米能级向下面的带隙中央移动（通常非掺杂的 i 层呈弱的 n 型，费米能级在带隙中距导带边稍近）。这个模型假定，悬键为双电子占据时，相关能为负值。负相关能最可能存在于氢富集的微空洞的表面。（3）布朗兹最近提出的新模型认为，光生电子相互碰撞产生两个可动的氢原子，氢原子的扩散形成两个不可动的 Si-H 键复合体，亚稳悬键出现在氢被激发的位置处，此模型可定量地说明光生缺陷的产生机理，并可解释一些主要的实验现象。以上例举的较为可信的模型都说明，光致衰退效应与 a-Si 材料中的氢的移动有关 a-Si 材料是在较低的温度下，通过硅烷类气体等离子体增强化学分解，在衬底上淀积获得的。它的硅网络结构不可避免地存在硅的悬键。这些悬键如果没有氢补偿，隙态密度将非常高，不可能用来制作电子器件。广泛采用的 PECVD 法沉积的 a-Si 膜含有 10-15% 的氢含量，一方面使硅悬键得到了较好的补偿；另一方面，这样高的氢含量远远超过硅悬键的密度。可以肯定地说，氢在 a-Si 材料中占有激活能不同的多种位置，其中一种是补偿悬键的位置，其它则处于激活能更低的位置。理想的 a-Si 材料应该既没有微空洞等缺陷，也没有 SiH₂、(SiH₂)_n、SiH₃ 等的键合体。材料密度应该尽量地接近理想的晶体硅的密度，硅悬挂键得到适量氢的完全补偿，使得隙态密度低，结构保持最高的稳定性。寻找理想廉价的工艺技术来实现这种理想的结构，应能从根本上消除光致衰退，这是一项非常困难的任务。

2.6 a-Si 太阳能电池效率低的原因

非晶硅太阳能电池属于半导体结型太阳能电池，可以依据结型太阳能电池的模型对其理想的光伏性能作出估算。有 1.7eV 带隙的非晶硅太阳能电池的理论效率在 25% 左右。实际上，第一阶段制作的小面积电池初始效率约为理论效率的一半，其它品种的太阳能电池实际达到的光伏性能与理论值相比，差距都小于非晶硅的差距。a-Si 太阳能电池效率低的主要原因如下：

- 1) a-Si 材料的带隙较宽，实际可利用的主要光谱域是 0.35-0.7 μm 波长，相

对地较窄。

2) a-Si 太阳能电池开路电压与预期值相差较大, 其原因是: (1) 迁移边存在高密度的尾态, 掺杂杂质离化形成的电子或空穴仅有一定比例的部分成为自由载流子, 电导激活能即费米能级与带边的差不可能很小; (2) 材料多缺陷, 载流子扩散长度很短, 电荷收集主要靠内建电场驱动下的漂移运动, 靠扩散收集的分量可以忽略, 这与晶体硅电池正好相反, 为了维持足够强的内建电场, pin 结的能带弯曲量必须保持较大才能保证有足够的电场维持最低限度的电荷收集, 能带弯曲量与电池输出电压对应的电子能量之和为 p-n 两种材料费米能级之差。既然剩余能带弯曲量较大, 输出电压必然较低。而晶体硅电池电荷收集主要靠载流子扩散, 剩余能带弯曲量可以较小, 加之 p、n 两种材料的激活能较低, 所以开路电压与其带隙宽度相对接近。

3) a-Si 材料缺陷态密度较高, 载流子复合几率较大, 二极管理想因子通常大于 2, 与 $n=1$ 的理想情况相差较大。

4) a-Si 太阳能电池的 p 区和 n 区的电阻率较高, TCO / p-a-si (或 n-a-si) 接触电阻较高, 甚至存在界面壁垒, 这就带来附加的能量损失。

以上这些问题必须由新的措施来解决, 这就构成了非晶硅太阳能电池下一阶段发展的主要任务。

3. 非晶硅太阳能电池技术的发展

3.1 非晶硅太阳能电池技术完善与提高

由于发展势头遭到挫折, 80 年代末至 90 年代初, 非晶硅太阳能电池的发展经历了一个调整、完善和提高的时期。人们一方面加强了探索和研究, 一方面准备在更高技术水平上作更大规模的产业化开发, 中心任务是提高太阳能电池的稳定化效率。为此探索了许多新器件结构、新材料、新工艺和新技术, 其核心就是完美结技术和叠层电池技术。在成功探索的基础上, 90 年代中期出现了更大规模产业化的高潮, 先后建立了多条数兆瓦至十兆瓦高水平电池组件生产线, 组件面积为平方米量级, 生产流程实现全自动。采用新的封装技术, 产品组件寿命在 10 年以上。组件生产以完美结技术和叠层电池技术为基础, 产品组件效率达到 6%–8%; 中试组件 (面积 900cm² 左右) 效率达 9%–11%; 小面积电池最高效率达 14.6%。

3.2 完美结技术

完美结技术是下列技术的组合：（1）采用带织构的 $\text{SiO}_2 / \text{SnO}_2 / \text{ZnO}$ 复合透明导电膜代替 ITO 或 SnO_2 单层透明导电电极。复合膜电极具有阻挡离子污染、增大入射光吸收和抗等离子还原反应的效果。（2）在 TCO / p 界面插入污掺杂层以克服界面壁垒。（3）p 层材料采用宽带隙高电导的微晶薄膜，如 $\mu\text{c-sic}$ ，可以减少 P 层的光吸收损失；减少电池的串联电阻。（4）为减少 p / i 界面缺陷，减少二极管质量因子，在 p/i 界面插入 C 含量缓变层。此层的最佳制备方法是交替淀积与氢处理法。（5）低缺陷低氢含量的 i 层。用精确控制掺杂浓度的梯度掺杂法，使离子杂质形成的空间电荷与光照产生的亚稳空间电荷中和，保持稳定均匀的内建电场。这是从器件结构上消除光致衰退效应的又一种方案。（6）i / n 界面缓变以减少界面缺陷。（7）采用 $\text{K} - \text{Ks}$ 可以减少电池的串联电阻，同时减少长波长光的损失。（8）采用 ZnO / Al 复合背电极增强对长波长光的反射，增加在电池中的光程，从而增加太阳电池的光的吸收利用。

值得一提的是，我国在“八五”攻关中采用此类技术，实现大面积组件电池 6.55% 的稳定效率，小面积电池单结开路电压高达 1.12V。

3.3 叠层电池技术

减薄 a-Si 太阳电池的 i 层厚度可以增强内建电场，减少光生载流子通过带隙缺陷中心和 / 或光生亚稳中心复合的几率，又可以增加载流子移动速率，同时增加电池的量子收集效率和稳定性。但是，如果 i 层太薄又会影响入射光的充分吸收，导致电池效率下降。为了扬长避短，人们想到了多薄层电池相叠的结构。起先是两个 pin 结的叠层 $\text{p-a-Si} / \text{a-Si}$ 叠层电池，其稳定化效率有所提高。我国用此结构做出组件电池（ 400cm^2 ）稳定化效率达 7.35%。

一种材料的太阳电池可以利用波长比 $1.24 / E_g (\mu\text{m})$ 更短的谱域的光能。如果把具有不同带隙 (E_g) 材料的薄膜电池叠加，则可利用更宽谱域的光能，由此可提高太阳电池的效率。异质叠层太阳电池中，利用宽带隙材料作顶电池，将短波长光能转变为电能；利用窄带隙材料作底电池，将长波长光能转变为电能。由于更加充分地利用了阳光的谱域，异质叠层太阳电池应有更高的光电转换效率，同时具有抑制光致衰退的效果。

形成异质叠层太阳电池的材料的带隙必须有恰当的匹配才可能获得最佳的效果。目前流行的非晶硅锗为基础的非晶叠层太阳电池较好的匹配带隙分别为 1。

8eV、1.6eV、1.4eV。除了匹配带隙的要求外，组成叠层太阳电池的各子电池中光电流应基本相等；子电池之间的 p/n 结应为高透光高电导的隧道结。

3.4 新材料探索

探索的宽带隙材料主要有，非晶硅碳、非晶硅氧；微晶硅、微晶硅碳等，这些材料主要用于窗口层。顶电池的 i 层主要是宽带隙非晶硅和非晶硅碳。最受重视的窄带隙材料是非晶硅锗。改变硅锗合金中锗含量，材料的带隙在 1.1eV 到 1.7eV 范围可调。硅与锗的原子大小不一，成键键能不同，非晶硅锗膜通常比非晶硅缺陷更多。膜中硅与锗原子并不是均匀混合分布的，氢化时，氢择优与硅键合，克服这些困难的关键是，采用氢稀释沉积法和掺氟。这些材料的光电子特性可以做得很好，但氢含量通常偏高，材料的光致衰退依然存在，叠层结构在一定程度上抑制了它对电池性能的影响。

3.5 新技术探索

为了提高非晶硅太阳电池的初始效率和光照条件下的稳定性，人们探索了许多新的材料制备工艺。比较重要的新工艺有：化学退火法、脉冲氙灯光照法、氢稀释法、交替淀积与氢处理法、掺氟、本征层掺痕量硼法等。此外，为了提高 a-Si 薄膜材料的掺硼效率，用三甲基硼代替二乙硼烷作掺杂源气。为了获得 a-Si 膜的高淀积速率，采用二乙硅烷代替甲硅烷作源气。

所谓化学退火，就是在一层一层生长 a-Si 薄膜的间隔，用原子氢或激活的 Ar、He 原子来处理薄膜，使表面结构弛豫，从而减少缺陷和过多的氢，在保证低缺陷态密度的同时，降低光致衰退效应。这里，化学处理粒子是用附加的设备产生的。

氢稀释法则采用大量（数十倍）氢稀释硅烷作源气淀积 a-Si 合金薄膜。实际上，一边生长薄膜一边对薄膜表面作氢处理。原理一样，方法更简单，效果基本相当。

交替淀积与氢处理则是，重复进行交替的薄膜淀积与氢等离子体处理，这是上述两种方法的结合。脉冲氙灯光照法是在一层一层生长 a-Si 薄膜的间隔，周期地用脉冲氙灯光照处理薄膜表面，其稳定性有显著提高。在制备 a-Si 的源气中加入适量的四氟化硅就可实现 a-Si 掺氟。掺氟使硅网络结构更稳定。本征 a-Si 呈弱 n 型，掺入痕量硼可将费米能级移向带隙中央，既可提高光灵敏度又可减少光致衰退。

3. 6 新制备技术探索

射频等离子体增强 CVD 是当今普遍采用的制备 a-Si 合金薄膜的方法。它的主要优点是：可以用较低的衬底温度（200C 左右），重复制备大面积均匀的薄膜，制得的氢化 a-Si 合金薄膜无结构缺陷、台阶覆盖良好、隙态密度低、光电子特性符合大面积太阳电池的要求。此法的主要缺点也是致命的缺点是，制备的 a-Si 膜含氢量高，通常有 10%-15% 氢含量，光致衰退比较严重。因此，人们一方面运用这一方法实现了规模化生产，另一方面又不断努力探索新的制备技术。

与 RF-PECVD 最相近的技术有，超高真空 PECVD 技术，甚高频（VHF）PECVD 技术和微波（包括 ECR）PECVD 技术。激发等离子体的电磁波光子能量不同，则气体分解粒子的能量不同，粒子生存寿命不同，薄膜的生成及对膜表面的处理机制不同，生成膜的结构、电子特性及稳定性就会有区别。VHF 和微波 PECVD 在微晶硅的制备上有一定的优势。

其它主要新技术还有，离子束淀积 a-Si 薄膜技术，HOMO-CVD 技术和热丝 CVD 技术等。离子束淀积 a-Si 合金薄膜时，包括硅烷在内的反应气体先在离化室离化分解，然后形成离子束，淀积到衬底上，形成结构较稳定的 a-Si 合金薄膜。HOMO-CVD 技术通过加热气体，使之热分解，分解粒子再淀积在衬底上。成膜的初级粒子寿命较长，膜的电子性能良好，氢含量低，稳定性较好。这两种技术成膜质量虽好，但难以形成产业化技术。热丝 CVD 技术也是较有希望的优质薄膜硅的高速制备技术。

4 非晶硅太阳能电池的未来发展

4. 1 现有 a-Si 太阳能电池产业的市场开发

非晶硅太阳能电池无论在学术上还是在产业上都已取得巨大的成功，全世界的生产能力超过 50MW，最大生产线年产为 100MW 组件。这种大规模高档次生产线满负荷正常运转的生产成本已低至 1.5 美元 / 峰瓦左右。据预测，若太阳能电池成本低于每峰瓦：美元，寿命 20 年以上，发电系统成本低于每峰瓦 2 美元，则光伏发电电力将可与常规电力竞争。与其它品种太阳能电池相比，非晶硅太阳能电池更接近这一目标。非晶硅太阳能电池目前虽不能与常规电力竞争，但在许多特定的条件下，它不仅可以作为功率发电使用，而且具有比较明显的优势。如依托于建筑物的屋顶电站，它不占地面，免除占地的开支，发电成本较低；作为联网电站，不

需要储能设备，太阳电池在发电成本中占主要部分，太阳电池低成本就会带来电力低成本。

目前世界上非晶硅太阳电池总销售量不到其生产能力的一半，应用上除了少数较大规模的试验电站外仍然以小型电源和室内弱光电源为主。尽管晶体硅太阳电池生产成本是 aSi 电池的两倍，但功率发电市场、仍以晶体硅电池为主。这说明光伏发电市场尚未真正成熟。另一方面，非晶硅太阳电池必须跨过一个“门槛”才能进入大光伏市场。一旦跨过“门槛”，市场需求将带动产业规模扩大，而规模越大生产成本越低。要突破“门槛”，一方面须加强市场开拓力度，加强营销措施；另一方面政府应给予用户以适当补贴鼓励，刺激市场的扩大。许多发达国家正在推行的诸如“百万屋顶计划”这类光伏应用项目，就是这种努力的具体体现。

4.2 技术进一步发展的方向

非晶硅太阳电池一方面面临高性能的晶体硅电池降低成本努力的挑战：一方面又面临廉价的其它薄膜太阳电池日益成熟的产业化技术的挑战。如欲获得更大的发展，以便在未来的光伏能源中占据突出的位置，除了应努力开拓市场，将现有技术档次的产品推向大规模功率发电应用外，还应进一步发扬它对晶体硅电池在成本价格上的优势和对其它薄膜太阳电池技术更成熟的优势，在克服自身弱点上下功夫。进一步提高组件产品的稳定效率，延长产品使用寿命，比较具体的努力方向如下：

(1) 加强 a-Si 基础材料亚稳特性及其克服办法的研究，达到基本上消除薄膜硅太阳电池性能的光致衰退。

(2) 加强晶化薄膜硅材料制备技术探索和研究，使未来的薄膜硅太阳电池产品既具备 a-Si 薄膜太阳电池低成本的优势，又具备晶体硅太阳电池长寿、高效和高稳定的优势。

(3) 加强带有 a-Si 合金薄膜成分或者具有 a-Si 廉价特色的混合叠层电池的研究，把 aSi 太阳电池的优点与其它太阳电池的优点嫁接起来。

(4) 选择最佳的新技术途径，不失时机地进行产业化技术开发，在更高的技术水平上实现更大规模的太阳电池产业化和市场商品化。

7. 非晶硅 (a-硅) 太阳能技术

光伏太阳能发电板将太阳能转换成电力。晶体硅技术是光伏工业使用的原始材料技术。传统的晶体硅太阳能发电板首先被广泛应用于太空卫星上。这种太阳能发电板是用逐步反复，批量生产之工序从单晶硅或多晶硅的小晶片制造而成。虽然这种技术的开发已取得很大的进展，但是晶体光伏发电组件的成本还是因为材料的成本以及生产这种发电组件所需的烦琐工艺而持续居高不下。晶体硅太阳能发电组件体积庞大，容易破碎而且生产耗能更多。

生产太阳能发电板的另一种薄膜技术使用到金属镉，这种技术损害环境而且在生产过程中及售后服务上都需极多的管理维护。这些薄膜技术以及晶体硅技术都使用逐步反复的批量生产工艺，而不是象我们的非晶硅技术所用的连续性卷到卷的生产工艺。

通过使用我们的独一无二的薄膜型，蒸汽镀膜非晶硅 (a-硅) 合金材料，我们已开发出独有的技术来降低太阳能发电板的成本。由于非晶硅比晶体硅更有效地吸收光线，非晶硅太阳能发电板的厚度比其它产品小 100 倍，因而将材料成本显著降低。通过使用柔韧的不锈钢基片以及聚合物密封材料，并运用我们的技术所产生出来的光伏发电产品具有十分轻便，柔韧及耐久的性能。我们的产品在运输过程中不会破碎而且可轻易地运送到偏远的地区，因而可以节省运输费用，在安装时可做到丝毫无损。

众多的具有不同的光吸收性能的非晶硅发电板连续地一个镀在另一个上，使之能够更为有效地捕获太阳极为广阔的光谱。这样既增加了这些多元发电板装置的能量转换效率也改变了其稳定性能。本公司独有的多结方法使得我们的非晶硅技术具有创世界记录的高效率。

我们保持着经美国能源部国家可再生能源实验室测试认可大面积及小面积非晶硅太阳能发电板能量转换效率的当今世界记录。

为了进一步降低光伏发电组件的制造成本，我们更率先开发了独有的连续卷到卷太阳能发电板镀膜技术。并拥有这个领域最主要的专利。这种技术是用一个高产且自动化的机器在一卷半里长 14 英寸宽的柔韧的不锈钢上先后镀在九层的非晶硅薄膜而制成一卷连续的，由三层太阳能发电板重叠在一起的结构产品。这卷太阳能发电板被进一步加工成各种各样的光伏产品。这种经由我们开

创的领先方法在本行业中是独一无二，并且有重要的制造成本优越性。我们相信，随着技术及大规模生产方面的不断改进，我们的光伏发电组件的成本将会显著地比传统的晶体硅以及其它的玻璃结构的薄膜太阳能发电组件更为低廉。价格将可与石油媲美。

我们拥有年产量为五百万瓦的生产能力，通过增设位于美国密执根州奥本山的新的产品设施，我们的年产量已提高到三千万瓦。该厂为全自动化作业，在非晶硅镀膜流程中，可同时对六卷，各为 1.5 英里长的不锈钢基材进行镀膜。返回 11

8. 多晶薄膜与薄膜太阳电池

引言

近几年来，光伏市场发展极其迅速，1997 年光伏组件的销售量达 122Vw，比上年增加 38%。世界主要几大公司宣称，近期光伏组件产量将会增加到 263.5MW，其中薄膜太阳电池将达到 91.5MW，占太阳电池总量的 34.7%。快速发展的光伏市场导致许多太阳电池生产厂家力求扩大生产能力，开辟大容量的太阳电池生产线。但目前太阳电池用硅材料大部分来源于半导体硅材料的等外品和单晶硅的头尾料，不能满足光伏工业发展的需要。同时硅材料正是构成晶体硅太阳电池组件成本中很难降低的部分，因此为了适应太阳电池高效率、低成本、大规模生产化发展的要求，最有效的办法是不采用由硅原料、硅锭、硅片到太阳电池的工艺路线，而采用直接由原材料到太阳电他的工艺路线，即发展薄膜太阳电他的技术。

20 世纪 70 年代开始，发展了许多制作薄膜太阳电他的新材料、CuInSe₂、CdTe 薄膜，晶体硅薄膜和有机半导体薄膜等；近 20 年来大量的研究人员在该领域中的工作取得了可喜的成绩。薄膜太阳电池以其低成本、高转换效率、适合规模化生产等优点，引起生产厂家的兴趣，薄膜太阳电他的产量得到迅速增长。如果以 10 年为一个周期进行分析，世界薄膜太阳电池市场年增长率为 22.5%。BP solar 的光伏专家和企业界人士组成的一个研究组研究证明：如果一家具有 60MW 生产能力的薄膜电池生产厂家，使用硒钢铜薄膜太阳电池、非晶硅太阳电池、硫化铜薄膜太阳电池中的任意一种就能获得生产成本低于 1 欧元 / 瓦的无框架光伏组件，如果采用晶体硅技术实现上述同样的目标，就需要建成一家年产量达 500Mw 太阳电他的生产厂。因此，整个光伏市场将会逐渐被薄膜太阳电池取而代之。从

技术成熟程度看，薄膜太阳能电池生产仍有一定风险，但从薄膜技术不断完善和市场迅猛发展看，薄膜光伏太阳能电池具有十分广阔和诱人的前景。

1. CdS 薄膜与 Cu₂S/CdS 太阳电池

Cu₂S / CdS 是一种廉价太阳电池，它具有成本低、制备工艺十分简单的优点。因此，在 70-80 年代曾引起国内外广大光伏科研者的广泛兴趣，以空前热情进行研究。在烧结体 Cu₂JCdS 太阳电池研究的基础上，70 年代开展了在多种衬底上使用直接和间接加热源的方法沉积多晶 CdS 薄膜。薄膜制备方法主要有喷涂法、蒸发法等。

1.1 CdS 薄膜结构特性

CdS 是非常重要的：II-VI 族化合物半导体材料。CdS 薄膜具有纤锌矿结构，是直接带隙材料，带隙较宽，为 2.42eV。实验证明，由于 CdS 层吸收的光谱损失不仅与 CdS 薄膜的厚度有关，还与薄膜形成的方式有关。

1.2 CdS 薄膜光学性质

CdS 薄膜广泛应用于太阳电池窗口层，并作为 n 型层，与 p 型材料形成 p-n 结，从而构成太阳电池。因此它对太阳电池的特性有很大影响，特别是对电池转换效率有很大影响。

一般认为，窗口层对光激发载流子是死层，其原因是，（1）CdS 层高度掺杂，因此耗尽区只是 CdS 厚度的一小部分；（2）由于 CdS 层内缺陷密度较高，空穴扩散长度非常短，如果耗尽区没有电场，载流子收集无效。

因此减少缺陷密度，可使扩散长度增加，能在 CdS 层内收集到更多的光激发载流子。

1.3 CdS 薄膜电学特性

一般而言，本征 CdS 薄膜的串联电阻很高，不利于做窗口层，在 300℃-350℃ 之间，将 In 扩散入 CdS 中，把本征 CdS 变成 n-CdS，电导率可达 $10^2 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 左右。对 CdS 热处理也能使电导率增加 $10^8 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 的量级。

在相对低温下进行热扩散，以免使膜退化。当在空气中加热到 300℃ 时，由于氧在晶界有化学吸收，使光电导率衰减。

未掺杂的 CdS 薄膜的电阻率高，不是由于膜的不连续引起的，很可能是由于氧

气介入，氧俘获导带电子，形成化学吸附，存在晶界的多晶 CdS 薄膜更易吸收氧，在热退火过程中，消除氧的吸附作用，降低了电阻率，因此热处理不但有效地滤掉了薄膜内部的氧，而且有利于膜在优势晶向上长大。

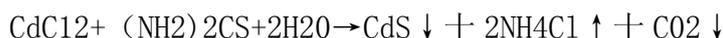
1.4 CdS 薄膜和 Cu₂S/CdS 太阳电池的制备方法

1.4.1 喷涂法

60 年代初，已有人开始采用喷涂或涂刷技术，研究 CdS 薄膜及 Cu₂S / CdS 太阳电池。为了适应工业化生产 CdS 薄膜，R. R. Chamberlin 和 J. F. Jorn 等人发展了这种方法。

用喷涂法制备 CdS 薄膜，其方法主要是将含有 S 和 Cd 的化合物水溶液，用喷涂设备喷涂到玻璃或具有 SnO₂ 导电膜的玻璃及其它材料的衬底上，经热分解沉积成 CdS 薄膜。

各国不同学者采用的工艺都基于如下热分解效应：



热分解温度 $T_s > 250^\circ\text{C}$ 。

热分解温度、喷涂溶液组分，喷速以及 SnO₂ 透明电极的电阻率，窗口效应的利用等是影响电池性能的主要因素。

为了制备太阳电池，在 CdS 膜表面喷涂转型物质，如含 Cu⁺的氯化亚铜溶液，或采用常规浸泡工艺，使之形成一定厚度的 Cu₂S 层，并经热扩散等工艺和喷涂金属层作电极，形成太阳电池。

在 Cu₂S/CdS 太阳电池中，由于两种材料的亲和力失配，相差 0.3eV，因此使扩散电位被限制在 0.8eV，降低了太阳电池的开路电压。为此，提出了采用由 CdS 和 ZnS 制备 Cd_{1-x}Zn_xS 来代替 CdS，以改善小层的电子亲和力和降低界面态数目。

由于喷涂法制备 Cu₂S/CdS (Cu₂S/Cd_{1-x}Zn_xS) 薄膜太阳电池，不采用真空设备，使工艺得到简化，并为定量掺杂、控制膜厚和薄膜电阻率及重现性带来方便。

1977 年 R. Feiglisen 研制出转换效率为 7.8% 的 Cu₂SCd_{0.9}Zn_{0.1}S 太阳电池。

1.4.2 蒸发法

采用电子束技术蒸发 CdS 原料油于装料器外壳不加热，并进行水冷，因而减少了污染，获得的膜牢固、致密、纯度高、耐腐蚀性好、剩余原料组分不变，可以

循环使用。因此该方法获得了广泛应用。

长春应化所张瑞峰等人用电子束蒸发制备 CdS 薄膜，改进了电子束蒸发设备，避免了在蒸发过程中 CdS 粒子飞溅。采用常规氯化亚铜浸泡法形成 Cu 多层，从而构成 Cu₂S/CdS 太阳电池，电池最佳转换效率为 6.2%。

真空加热蒸发制备 CdS 薄膜是常采用的方法。长春应化所王福善等人用石墨作加热器，调节源上方挡板的大小和位置，获得无溅射颗粒的 CdS 薄膜，并用氯化亚铜水溶液浸泡形成 Cu₂S 层，构成 Cu₂S/CdS 太阳电池，其最高效率为 7.8%。

长春应化所王给祥等人，改进了蒸发工艺，对 Cu₂S 层进行 HCl 腐蚀，使表面形成绒面织构，所获得的 Cu₂S/CdS 太阳电池最佳有效面积转换效率为 8.9%。

1.5 Cu₂S / CdS 太阳电池机理研究

由于 Cu₂S/CdS 薄膜太阳电池工艺不稳定，电池转换效率不高，稳定性差，易衰减，因此阻碍了这一类型太阳电池的发展。为此许多学者对这种电池开展了深入细致的机理研究。上海能源所黄芳龙用扫描电子能谱仪测量了不同效率的薄膜 Cu₂S / CdS 太阳电池的 AES 谱。认为真空蒸发形成 CdS 膜和化学浸泡法形成 Cu₂S 层构成的 Cu₂S/CdS 电池为缓变结电池，高浓度 Cu₂S 区厚 0.05 μ m-0.1 μ m，铜过渡区厚度为 1 μ m，在一定的结深和过渡区范围内，电池效率与高浓度 Cu₂S 层厚度（结深）成正比，与铜过渡区厚度成反比，并计算出电池的极限效率为 18%，实际工艺可能达到 12.5%。黄芳龙进一步研究了扩散对 Cu₂S/CdS 太阳电池效率及稳定性的影响。扩散会改变电池各元素的组成比，导致电池效率下降，特别是封装材料中 C 和 Cu₂S 层中 Cu 的扩散最甚。因此选择无机材料作为封装材料和在 Cu₂S 层中加入作为间隙原子的其它材料或选用其它材料如 CuInSe₂、CdTe 等代替 Cu₂S 层。由此 Cu₂S/CdS 这种结构的太阳电池，逐渐失去人们的兴趣。

2 . CuInSe₂ 多晶薄膜材料与 CdS / CuInSe₂ 太阳电池

2.1 CuInSe₂ 薄膜材料的结构特性

CuInSe₂ (CIS) 是一种三元 I-III-VI₂ 族化合物半导体，具有黄铜矿、闪锌矿两个同素异形的晶体结构，其高温相为闪锌矿结构（相变温度为 980 $^{\circ}$ C），属立方晶系，布拉非格子为面心立方，晶格常数为 $a = 5.86 \times 10^{-8}$ cm，密度为 5.55g / cm³ 其低温相是黄铜矿结构（相变温度为 810 $^{\circ}$ C），属正方晶系，布拉非格子

为体心四方，(d·c·t)，空间群为 I 42d=D2d12，每个晶胞中含有 4 个分子团，其晶格常数为 $a = 5.782 \times 10^{-8} \text{cm}$ ， $c = 11.621 \times 10^{-8} \text{cm}$ ，与纤锌矿结构的 CdS ($a = 4.613 \times 10^{-8} \text{cm}$ ， $c = 7.16 \times 10^{-8} \text{cm}$) 晶格失配率为 1.2%。这一点使它优于 CuInSe₂ 等其它 Cu 三元化合物。

CuInSe₂ 是直接带隙半导体材料，77K 时的带隙为 $E_g = 1.04 \text{eV}$ ，300K 时 $E_g = 1.02 \text{eV}$ ，其带隙对温度的变化不敏感。

1.04eV 的禁带宽度与地面光伏利用对材料要求的最佳带隙 (1.5eV) 较为接近，但这一点劣于 CuInSe₂ ($E_g = 1.55 \text{eV}$)。

CuInSe₂ 的电子亲和势为 4.58eV，与 CdS 的电子亲和势 (4.50eV) 相差很小 (0.08eV)，这使得它们形成的异质结没有导带尖峰，降低了光生载流子的势垒。

2.2 CuInSe₂ 材料的光学性质

CuInSe₂ 具有一个 0.95eV–1.04eV 的允许直接本征吸收限和一个 1.27eV 的禁带直接吸收限，以及由于以 w — Redfiled 效应而引起的在低吸收区 (长波段) 的附加吸收。

CuInSe₂ 材料具有高达 $\alpha = 6 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 的吸收系数，这是到目前为止所有半导体材料中的最高值。但是关于 CuInSe₂ 为什么会有这样高的吸收系数，其机理尚不完全清楚。具有这样高的吸收系数，亦即这样小的吸收长度 ($1/\alpha$)，对于太阳能电池基区光子的吸收、少数载流子的收集，因而也即对光电流的收集产生了非常有利的条件。这也就是 CdS / CuInSe₂ 太阳能电池会有 39mA/cm² 这样高的短路电流密度的原因，这样小的吸收长度，使薄膜的厚度可以很薄，而且薄膜的少数载流子扩散长度也是很容易超过 $1/\alpha$ ，甚至对结晶程度很差或者多子浓度很高的材料，其扩散长度也容易超过 $1/\alpha$ 。CuInSe₂ 的光学性质主要取决于材料的元素组份比、各组份的均匀性、结晶程度、晶格结构及晶界的影响。大量实验表明，材料的元素组份与化学计量比偏离越小，结晶程度好，元素组分均匀性好，温度越低其光学吸收特性越好。具有单一黄铜矿结构的 CuInSe₂ 薄膜，其吸收特性比含有其它成份和结构的薄膜要好。表现为吸收系数增高，并伴随着带隙变小。

富 Cu 的薄膜比富 In 的薄膜吸收特性好，原因是富 Cu 的薄膜比富 In 的薄膜的结晶程度好。沉积衬底温度高的 (770K) 富 Cu 薄膜比沉积衬底温度低的 (570K)

薄膜的吸收特性好 1 原因是前者具有单一的黄铜矿结构，而后者不具有。

室温（300K）下，单晶 CuInSe_2 的直接带隙为 0.95eV-0.97eV。多晶薄膜为 1.02eV，而且单晶的光学吸收系数比多晶薄膜的吸收系数要大。引起这一差别的原因是由于单晶材料较多晶薄膜有更完善的化学计量比，组份均匀性和结晶好。在惰性气体中进行热处理后，多晶薄膜的吸收特性向单晶的情况靠近，这说明经热处理后多晶薄膜的组份和结晶程度得到了改善。然而，有人认为这种差别是由于膜中价带边的界面态和晶粒间界的原因造成。

吸收特性随材料工作温度的下降而下降，其带隙随温度的下降而稍有升高。当温度由室温 300K 降到 100K 时， E_g 上升 0.02eV，即 100K 时，单晶 CuInSe_2 的带隙为 0.98eV，多晶 CuInSe_2 的带隙为 1.04eV。

不论单晶或多晶在低吸收区出现一个尾巴，即出现了附加吸收区，该区中使得 $\alpha \sim (h\nu - E_g)^{1/2}$ 不再为直线，不再遵从允许直接跃迁的 $\alpha \sim (h\nu - E_g)^{1/2}$ 这一关系。

对于单晶，这一现象由于伴随着声子吸收的跃迁产生，这种跃迁遵守 $\alpha = A' \frac{(h\nu - E_{gi} + E_p)^2}{[\exp(E_p / kT) - 1]}$ ，其中 A' 为常数， E_p 为声子能量， E_{gi} 为间接带隙。

对于多晶薄膜，上述两种 $\alpha \sim h\nu$ 关系都不成立，这种附加吸收可能是由于 Dow-Redfield 效应引起的。

2.3 CuInSe_2 材料的电学性质

CuInSe_2 材料的电学性质（电阻率、导电类型、载流子浓度、迁移率）主要取决于材料的元素组份比，以及由于偏离化学计量比而引起的固有缺陷（如空位、填隙原子、替位原子），此外还与非本征掺杂和晶界有关。

2.3.1 导电类型

对材料的元素组份比接近化学计量比的情况，按照缺陷导电理论，一般有如下结果：当 Se 不足时，Se 空位呈现施主；当 Se 过量时，呈现受主；当 Cu 不足时，Cu 空位呈现受主；当 Cu 过量时，呈现施主。当 In 不足时，In 空位呈现受主。当 In 过量时，呈现施主。

在薄膜的成份偏离化学计量比较大的情况下，情况变得非常复杂。因为这时薄膜的组份不再是具有单一黄铜矿结构的 CuInSe_2 ，而包含其它的相（ Cu_2S_2 、

Cu_{2-x}Se、In₂Se₃、InSe……)。在这种情况下，薄膜的导电性主要由 Cu / In 比决定，一般随着 Cu / In 比的增加，其电阻率下降，p 型导电性增强。导电类型与 Se 浓度的关系不大，但是 p 型导电性随着 Se 浓度的增加而增加。

2.3.2 薄膜导电性对元素组份比的依赖

实验证明，CuInSe₂ 薄膜的导电性与薄膜的成份有如下关系：

1) 当 Cu / In > 1 时，不论 Se / (Cu + In) 之比大于还是小于 1，薄膜的导电类型都为 p 型，而且具有低的电阻率，载流子浓度为 10¹⁶-10²⁰cm³ 但是当 Se / (Cu + In) > 1 时，发现有 Cu_{2-x}Se 存在。

2) 当 Cu / In < 1，若 Se / (Cu + In) > 1 时，则薄膜为 p 型，具有中等的电阻率，或薄膜为 n 型，具有高的电阻率。若 Se / (Cu + In) < 1，则薄膜为 p 型，具有高的电阻率，或薄膜为 n 型，具有低的电阻率。其中当 Cu / In < 1 且 Se / (Cu + In) < 1 时的高阻 p 型薄膜已在实验中获得了高效电池 (10%)。

2.4. CuInSe₂ 薄膜生长工艺

CuInSe₂ 薄膜的生长方法主要有：真空蒸发法、Cu-In 合金膜的硒化处理法（包括电沉积法和化学热还原法）、封闭空间的气相输运法 (CsCVT)、喷涂热解法、射频溅射法等。

2.4.1 单源真空蒸发法

首先用元素合成法制备 CuInSe₂ 源材料。制法是，按化学计量比称取高纯的(5N) Cu、In、Se₂ 粉末。一般 Se 稍过量 (0.02at%) 以获得 p 型材料，将源料放入一端封闭的石英管中，然后抽真空，当真空度到 1.33×10⁻³pa 以上时，将石英管封闭，制成一个安瓶，放入烧结炉中，缓慢加热到 500℃ 进行合成。源料要求具有单一黄铜矿结构，且为 p 型。

CuInSe₂ 源材料的合成，也可先合成 CuSe 和 In₂Se₃，然后再将适量 CuSe 和 In₂Se₃ 进行合成以获得 CuInSe₃。

将合成的多晶 CuInSe₂ 源材料经仔细研磨后，用电子束或电阻加热器进行蒸发，以获得薄膜。

直接用满足化学计量比的 CuInSe₂ 材料作蒸发源，所得薄膜一般为 n 型，如果在源中加入适量 Se (20wt%) 则可获得 p 型薄膜，衬底温度一般控制在 200° C~

300° C 之间，以 250° C 为佳。此法的优点是，设备简单，缺点是不易控制组份和结构。

2. 4. 2 双源真空蒸发法

一个源中放入用元素合成法制得的 CuInSe_2 粉末作为主要蒸发源，另一个源中放入元素 Se，以控制薄膜的导电类型及载流子浓度。分别控制两源的蒸发速率，即可获得理想的薄膜，衬底温度一般在 200°C-350°C 之间。此法较单源法易于控制薄膜的成份和结构。

2. 4. 3 三源真空蒸发法

将高纯的 Cu、In、Se 分别放入三个独立的源中，并用相应的传感器系统，监视各自的蒸发速率，然后反馈到各自的蒸发源控制器中，控制各自的蒸发速率，从而获得理想的薄膜。

衬底温度一般在 350°C-450°C 之间。此法优点是，易于控制组份和结构，且较前 2 种方法，不用合成 CuInSe_2 源料，缺点是，设备复杂，此法是当前应用最广、研究最多的方法。

2. 4. 4 封闭空间气相输运法 (CsCVT)

用元素合成法制备近似满足化学计量比的 p 型 CuInSe_2 多晶晶块作为输运源料，用碘或碘化氢气体作为输运剂，以铝片、石墨片、w / Al2O2 或 MO / 玻璃作衬底，在封闭系统中进行蒸发。 CuInSe_2 与碘的可逆反应为：

，即固体的 CuInSe_2 在高温下与碘蒸气发生反应，生成蒸气压高的 CuI 、 InI 及 Se_2 气体。上述反应是可逆的。当温度高时反应由左向右进行，当温度低时，反应由右向左进行。

所以如果在源和衬底间保持一个温度梯度，使得在源上反应是从左到右，而在衬底上反应由右向左，则便可将 CuInSe_2 源输运到衬底上，形成 CuInSe_2 薄膜。

HI 也可用作输运剂，因为在高温下，HI 分解为碘蒸气和氢气。

输运系统主要参数为，衬底温度为 500°C-600°C，源温为 500°C-600°C，衬底与源温差为 20°C-30°C 之间，间距为 1mm，碘蒸发压为 2.67Pa-4.00Pa。该法的优点是，设备较简单，源利用率高，成膜质量好。缺点是，膜中有碘杂质存在。

2. 4. 5 化学热还原法沉积 Cu-In 合金膜再进行硒化处理

利用铜、钢的盐和氧化物在高温氢气气氛中还原沉积 Cu-In 合金膜，然后在 H₂ 气氛中进行硒化处理，便可得 CuInSe₂ 薄膜。

可用于热还原的 Cu、In 化合物必须满足如下条件：其还原温度必须低于蒸发温度，其次可以配成溶液。

实验证明，铜、钢的硝酸盐和氧化物是可行的，将 Cu (NO₃)₂ 和 In (NO₃)₃ 溶于甲醇中，控制各自的浓度，使混合溶液具有合适的 Cu / In 含量比，然后将这种混合溶液均匀涂于 MO / 玻璃或 w / Al₂O₃ 衬底上，经干燥后放入炉中，在氢气中进行还原，一般衬底温度先保持在 250℃-300℃ 之间，硝酸盐分解为氧化物，氧化铜还原为铜，然后再提高温度到 550℃，氧化钢还原这 In，从而获得 Cu-In 合金膜。控制溶液中的 Cu / In 比和还原温度，即可得到合适的 Cu / In 合金膜。

这种方法对于 Cu、In 化合物的用量是很少的，一般在一平方厘米的衬底上沉积 1μm 厚的各种金属膜，分别需要 1.4×10⁻⁵mol 的铜化合物和 6.36×10⁻⁶mol 的钢化合物。将用上述方法沉淀的 Cu-In 合金膜在 H₂ + H₂s 气氛中进行热处理，便可得到 CuInSe₂ 膜。

一般用 90%H₂+10%H₂s 众进行处理，流量为 10ml-30ml / min，时间为 30min-100min，硒化温度在 400℃ 左右，在硒化过程中，因为 In₂Se₃ 在 400℃ 下便会蒸发，故沉淀富钢的 Cu-In 合金膜是必要的。此法的优点是，原料的利用率高，工艺简单，便于降低成本。

2. 4. 6 电镀法沉积 Cu-In 合金膜再进行硒化处理

用铜、钢的盐溶液作为电镀液，用 Cu 或 In 或 Cu-In 合金作为阳极，导电衬底为阴极，在适当的浓度、温度、电流密度、pH 值和搅拌条件下即可电镀。衬底一般用 MO / 玻璃。薄膜的均匀性一般受阳极、衬底（阴极）和镀槽的几何形状的影响。为了获得均匀的膜，要求上述装置具有对称性。薄膜与衬底的结合性与衬底表面的光洁度有关。

2. 4. 7 电沉积叠层结构再硒处理

按上述方法在衬底上先沉积一层 Cu，然后再沉积一层 In，形成叠层结构，即 In / Cu / MO / 玻璃结构，然后硒处理。也可以沉积各种各样的多层结构，如 In / Cu / In / Cu...MO / 玻璃。

也可以在衬底上分别层积 Cu、In、Se 层结构，最后在硒气氛中或非硒气氛中热处理而得 CuInSe₂ 薄膜。

2. 4. 8 喷涂热解法和溅射法

可参考有关文献，这里不作详细介绍。

2. 5. CdS / CuInSe₂ 薄膜太阳能电池

由于 CuInSe₂ 薄膜材料具备十分优异的光伏特性，20 年来，出现了多种以 CuInSe₂ 薄膜材料为基础的同质结和异质结太阳能电池。主要有 n-CuInSe₂ / p-CuInSe₂、(InCd)₂S / CuInSe₂、CdS / CuInSe₂、ITO / CuInSe₂、GaAs / CuInSe₂、ZnO / CuInSe₂ 等。在这些光伏器件中，最为人们重视的是 CdS / CuInSe₂ 电池，所以这里主要以 CdS / CuInSe₂ 电池为例，对其结构和光伏性能作一些描述。

2. 5. 1 In-CdS / p-CuInSe₂ 太阳电池

一般由低阻的 n 型 CdS 和高阻 p 型 CuInSe，组成，这种结构的电池一般有较高的短路电流 I_{sc}，中等的开路电压 V_{oc} 和较低的填充因子 FF。

为了进一步提高该种结构电池的性能，首先必须降低电池的串联电阻，因此要降低 CdS 层的电阻，或者大幅度降低 CuInSe₂ 层的电阻，而保持 CdS 层高阻。然而，大幅度降低 CuInSe₂ 的电阻，同时又要保证具有单一物相的材料是很困难的，而在 CuInSe₂ 上生长低阻的 CdS 也是困难的，特别是电阻率小于 1 Ω · cm 的 CdS 层几乎不可能。因此该种结构电池的性能未能得到大的突破。

2. 5. 2 pin 型 CdS / CuInSe₂ 太阳电池

为了获得性能较好的 CdS / CuInSe₂ 电池，需要形成低阻 (<50k Ω / □) CuInSe₂ 层，实验发现，低阻 CuInSe₂ 材料与 CdS 接触时，在界面处会产生大量铜结核。结核的产生使电池的效率大为降低。pin 型 CdS / CuInSe₂ 电池解决了这一问题。

i 层由高阻的 n 型 CdS 和高阻的 P 型 CuInSe₂ 组成，避免了 Cu 结核的形成。n 层由低阻的 n 型 CdS 形成，具有较低的体电阻，而且与上电极的接触电阻也较小。p 层由低阻的 p 型 CuInSe₂ 组成，同样具有较低的体电阻和背接触电阻，而且由于和高电阻 p 型层形成了背场，有利于 V_{oc} 的提高。

2. 5. 3 (ZnCd) S₂ / CuInSe₂ 太阳电池

为了进一步提高电他的性能参数，以 Zn_xCd_{1-x} 代替 CdS 制成 $Zn_xCd_{1-x}S / CuInSe_2$ 太阳电池。ZnS 的掺入，减少了电子亲和势差，从而提高了开路电压，同时提高了窗口材料的能隙 E_g ，改善了晶格匹配，从而提高了短路电流 I_{sc} 。

2. 6 国外 $CuInSe_2$ 薄膜太阳电池发展情况

许多大公司已开始大规模地实施制造薄膜太阳电池的计划。最近西门子公司已向美国可再生能源实验室 (NREP) 提供了由 28 个 39W 组件构成的 1kW 薄膜太阳电池方阵，其中最好的组件经美国国家可再生能源实验室确认，面积为 3665cm^2 ，输出功率达到 40.6W，转换效率为 11.1%，这一光伏方阵体现了薄膜技术优异的性能——高效率、低成本、高稳定和大面积。美国国家可再生能源实验室研究的含碲的硒铜薄膜太阳电池 (CIGS)，其转换效率达到 18.8%。从中可以看到 C1S 薄膜技术突飞猛进的发展。

2. 7 国内 $CuInSe_2$ 薄膜太阳电池发展情况

我国的 $CuInSe_2$ 薄膜太阳电池研究始于 80 年代中期。内蒙古大学、南开大学、云南师范大学、中国科学院长春应用化学研究所等单位先后开展了这项研究。1986 年长春应用化学研究所用喷涂法制备了 C1S 薄膜。薄膜具有黄铜矿结构，并制备了全喷涂 C1S / CdS 太阳电池，电池具有光伏效应。1990 年内蒙古大学采用双源法，研制了 pin CdS / $CuInSe_2$ 薄膜太阳电池，经天津电源研究所测试，面积为 $0.9\text{cm} \times 0.9\text{cm}$ ，效率为 8.5%。南开大学采用蒸发硒化法制作 $CuInSe / C$ 薄膜太阳电池，面积为 0.1cm^2 和 1cm^2 的太阳电池，其效率分别达到 7.62% 和 7.28%， $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 电他的平均效率为 6.67%。

我国该技术仍处于实验室阶段，而且处于较低的水平，投入很少，进展缓慢。因此，急需加快研究和开发力度，加大对薄膜太阳电他的投入，尽快向工业化生产过渡，将薄膜太阳电池作为 21 世纪优先发展的高科技项目。近期内，对 $CuInSe_2$ 薄膜太阳电池的研制，通过控制 Se、In、Cu 三元素配比和蒸发速率，以获得重复性好、化学计量比符合要求，具有黄铜矿结构的硒铜薄膜，用化学成膜法制备致密和均匀的 CdS 薄膜，用溅射法制备 ZnO 薄膜。期望近期内，光伏转换效率能达到 10% 左右，为 21 世纪大规模发展 $CuInSe_2$ 薄膜太阳电池奠定基础。

3. 多晶薄膜 CdTe 材料与 CdTe / CdS 太阳电池

在薄膜光伏材料中，以 CdTe 为基体的薄膜光伏器件，在光伏科技界具有极大的

吸引力。CdTe 已成为人们公认的高效、稳定、廉价的薄膜光伏器件材料。CdTe 多晶薄膜太阳能电池转换效率理论值) 在室温下为 27%，目前已制成面积为 1cm²，效率超过 15% 的 CdTe 太阳电池，面积为 706cm² 的组件，效率超过 10%。从 CdTe 多晶薄膜太阳电他目前已达到的转换效率、可靠性和价格因素等方面看，它在地面太阳光伏转换应用方面，发展的前景极为广阔。

3.1 薄膜材料的制备方法

制备 CdTe 薄膜方法主要有：(1) CsS，(2) 电镀，(3) 丝网印刷，(4) 化学气相沉积 CVD，(s) 物理气相沉积 PVD，(6) MOCVD，(7) 分子束外延 MBE，(8) ABE，(9) 喷涂，(10) 溅射，(11) 真空蒸发，(12) 电沉积等。

CSS 方法制备 CdTe 薄膜的优点是，蒸发材料损失少，结晶方向好，光伏特性优良。在沉积过程中引入少量的氧，加强了 CdTe 的 p 型特性。用 CSS 方法制备的小面积单体 CdTe 电池最高效率达到 15.8%，最好的大面积 (6728cm²) CdTe 电池，有效面积效率为 9.1%。制作大面积、廉价的 CdTe 太阳电池，电镀方法很有潜力。

3.2 结构特性

CdTe 是 II-VI 族化合物，是直接带隙材料，其带隙为 1.45eV，它的光谱响应与太阳光谱十分吻合。电子亲和势很高，为 4.28eV。具有闪锌矿结构的 CdTe，其晶格常数 $a = 1.6477 \times 10^{-8} \text{cm}$ ，不同的制备方法其结构特性有一定的差异。

3.3 光学特性

由于 CdTe 膜具有直接带隙结构，所以对波长小于吸收边的光，其光吸收系数极大，厚度为 1 μm 的薄膜，足以吸收大于 CdTe 禁带能量的辐射能量的 99%，因此降低了对材料扩散长度的要求。

在薄膜沉积过程中，沉积参数对热蒸发方法获得的 CdTe 薄膜的光吸收有影响。对于不同厚度的 CdTe 薄膜，吸收系数随吸收限和吸收限附近入射光子能量而变化。实验表明，膜越薄，吸收系数越高，带边与膜厚度无关。薄膜的吸收系数与生长温度有关，衬底温度在较低温度范围内，尤其是衬底温度小于 150 $^{\circ}\text{C}$ 时，吸收系数较小。当衬底温度大于 200 $^{\circ}\text{C}$ 时，沉积膜的吸收系数随衬底温度的变化不明显。当衬底温度从 20 $^{\circ}\text{C}$ 增加到 250 $^{\circ}\text{C}$ 时，吸收边从 1.40eV 变化到 1.48eV。

沉积速率和吸收边的关系为，沉积速率增加，薄膜吸收系数变化不大，而且所

有薄膜有相同的吸收边。

3.4 电学特性

CdTe 为 II-VI 族化合物半导体，其结构与 Si、Ge 有相似之处，即其晶体主要靠共价键结合，但又有一定的离子性，因此与同一周期的 W 族半导体相比，CdTe 的结合强度很大，即其电子摆脱共价键所需能量更高。因此，常温下，CdTe 的导电性主要由掺杂决定。薄膜组份、结构、沉积条件、热处理过程对薄膜的电阻率和导跑类型有很大影响。

用 CSS 法制备的 CdTe 薄膜，当衬底温度升高时，薄膜串联电阻降低 2 个数量级，这是由于沿 H<002>、C<111> 优势晶向的增长和晶粒尺寸的增加，引起自由载流子迁移率增加的结果。

当蒸发温度由 550° C 增加到 650° C 时，所获得的薄膜晶粒尺寸减小，使薄膜的串联电阻增加。当蒸发温度高于 650° C 时，电子输运沿 H<002>、C<111> 优势晶向和晶粒尺寸的增加占主要地位，这时由于迁移率增加，从而引起薄膜串联电阻下降。实验结果表明，薄膜的串联电阻的最大变化是由氧偏压和豚衬底间距引起的。

只有适当的氧偏压和源-衬底间距，才能使薄膜串联电阻从 $7 \times 10^8 \Omega$ ($1.4 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$) 变化到 $2 \times 10^2 \Omega$ ($0.4 \Omega \cdot \text{cm}$)。同样，增加氧偏压，减小源-衬底间距也能使电阻率降低。另一方面，反应室内氧偏压也能增加电导率，因为氧气与 Te 反应生成 TeO_2 ，而 TeO_2 由泵系统从反应室中排除，这有利于生成富 Cd 层的 CdTe。

CSS 制作 CdTe 时，氧很重要。氧使吸收体内受主密度增加，CdTe 成核位置密度增加，针孔密度减小，晶粒尺寸减小，另一方面，在 CSS 沉积 CdTe 过程中，因为在氧中沉积引起 CdTe 膜不均匀氧化，造成源流量减少。氧在 CdTe 膜上引起的表面形貌有 0.5-10 μm 的高度，这是源材料通过粒子反射引起的，这些影响使器件的效率降低。

3.5 CdTe / CdS 太阳电池

CdTe / CdS 薄膜太阳电他的理论值为，开路电压 1050mV，短路电流 30.8mA / cm^2 ，填充因子 83.7，转换效率~27%。

表：列出了比较典型的制备的 CdTe / CdS 太阳电池和组件的性能，同时列出了

相应的研究组织。所有高效 CdTe / CdS 太阳能电池都采用上覆盖器件结构。下面详细介绍几种制备方法和电池性能。

3. 5. 1 丝网印刷烧结法

丝网印刷烧法具有工艺简单，生产速度快，易于大面积制作，掺杂容易，成本低等优点。目前利用此方法制作的 CdS / CdTe 太阳能电池，面积为 4.6cm²，效率 12.8%，30cm×30cm 面积电池的效率为 8.5%。

CdS / CdTe 太阳能电池是在玻璃衬底上分别印刷烧结一层 n-CdS 和 p-CdTe 薄膜构成。首先将经过焙烧挥发去除杂质的 CdS 粉末研磨成小颗粒，烘干后再加入 12% 重量的 CdCl₂ 助溶剂，用丙二醇调制成 CdS 膏浆。用涤纶或尼龙丝网将 CdS 浆印刷在玻璃衬底上并烘干。印刷好的 CdS 膜在 N₂ 气中 680℃ 下，烧结 30min 左右即可完成 CdS 薄膜的制备。接着在 CdS 薄膜上制备 CdTe 薄膜。类似于 CdS 薄膜，将相同重量的 Cd 和 Te 粉加入 0.5% 重量的助溶剂 CdCl₂ 和适量丙二醇制成 (Cd+Te) 膏浆，然后用尼龙丝网将此膏浆印刷于 CdS 膜上。在 N₂ 气中 620℃ 下烧结 60min 后，便形成 CdTe 膜。最后是制备电极。在 CdTe 膜上，通过印刷和烧结碳形成电极。p-CdTe 是用 Cu 作掺杂剂形成的。在选用的碳膏中含有 50×10⁻⁶ 的 Cu，在 300℃ 下烧结碳电极的同时，其中的 Cu 向 CdTe 中扩散使其成为 p 型。于是 n-CdS 与其上的 p-CdTe 便形成了 p-n 结。还需要在 CdTe 膜的碳电极上印刷银膏作为上电极。

用丝网烧结制备 CdS / CdTe 异质结太阳能电池过程中，这个体系发生了十分复杂的物理和化学变化。产生了许多气态和固态的副产物，这样使得工艺条件难以控制，从而影响工艺重现性和太阳能电池性能的稳定性。

3. 5. 2 周期性电脉冲沉积法

用周期性脉冲电化学沉积技术制备 CdS / CdTe 太阳能电池有以下优点：（1）可将膜沉积到所要求的衬底材料上，所以能大大降低材料成本；（2）所用设备简单便宜；（3）对一转换效率大于 10% 的太阳能电池，同种溶液可长期使用，一般可用 8-9 个月；（4）由于沉积参数易于控制，薄膜质量的重现性很好；（5）能很好地控制 U、Te 和 S 的比例，并能获得高纯度薄膜材料。

CdS 膜的电镀液是将分析纯的 CdCl_2 和高纯水 ($18\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$) 制成含有 $0.2\text{M}\text{Cd}^{2+}$ 的溶液, 在 90°C 和 5mV 电位下电纯化 12h 之后, 加入硫化钠形成 $0.01\text{M}\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 溶液, 并加入 HCl 使 pH 值达到 2, 衬底材料为 $\text{FTO}/\text{玻璃}$, 方波脉冲电源加于溶液槽中正负电极上。阳极电位为 $+0.6\text{V}$ (SCE)。脉冲时间 2s, 阴极电位 0.955V (对 SCE), 脉冲时间 1s。沉积 2h 后, 衬底上呈现 $100\text{nm}\sim 110\text{nm}$ 原黄色 CdS 膜。CdTe 溶液是用分析纯 Cd 和高纯水制成 $2.5\text{M}\text{Cd}^{2+}$ 溶液, 并在 10mV 电位下电纯化 12h, 加入 H_2SO_4 调节 pH 值达到 2。在溶液中加入光谱纯的 Te 棒, 然后使溶液中 HTeC 浓度达到 120×10^6 , 分别加入脉冲宽度为 1s, 电势为 $+0.4\text{V}$ 和 -0.75V 于溶液电极上, 经过 90min 电沉积, $2\sim 3\mu\text{m}$ 厚的 CdTe 便在衬底上产生。

将制备好的 $\text{玻璃}/\text{FTO}/\text{CdS}/\text{CdTe}$ 很快地 (约为 1s) 转移到高纯水 (约 90°C) 中, 并缓慢地冷却到室温。然后将此样品用氮气冲干, 并在真空中 (1.33Pa) 保持 12h。接着在空气中 400°C 下退火处理 15min 后, $\text{CdS}/\text{p-CdTe}$ 异质结太阳能电池便形成了。再利用比例为 1:1 的碳酸与铬酸钾溶液腐蚀 2s, 用高纯水漂洗数次烘干即可蒸发铜和金电极。

利用此方法制备 CdS/CdTe 太阳能电池, 转换效率约为 10.8%, 开路电压 $V_{oc}\approx 753\text{mV}$, 短路电流 $I_{sc}\approx 23.6\text{mA}/\text{cm}^2$, 填充因子 $\text{FF}\approx 0.61$ 。电势-温度曲线测量表明, 理想因子 A 随温度而变。当温度从 344K 变到 202K 时, A 从 1.88 增加到 4.49。而电压因子以在约 6K 以上几乎是常数。通过电容电压特性测量可知扩散势为 1.2eV , 电离电荷密度为 $5.9\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 。从开路电压随温度变化特性测出势垒高度为 1.42V 。

3.5.3 高温喷涂法

高温喷涂法是将 CdCl_2 和硫脲溶液喷涂在加热的衬底上形成 n-CdS 膜。衬底一般用 p-CdTe 单晶材料。衬底加热到 450°C 便形成 $\text{n-CdS}/\text{p-CdTe}$ 异质结太阳能电池, 其转换效率大于 6%。热处理后能改变太阳能电池的性能, 例如在 420°C 下氢气中处理 5min 后, 它的开路电压由原来 0.55V 增加到 0.66V , 短路电流由 $1.77\text{mA}/\text{cm}^2$ 增加到 $9.08\text{mA}/\text{cm}^2$ 。

3.5.4 高效多元化合物叠层多结太阳能电池

为了提高转换效率, 将 CdTe、CdS 和 CuInSe_2 用 Zn、Hg、Mn 和 Ga 等取代 Cd、In 制成 CdHgTe 、 CdZnTe 、 CdZnS 和 CuGaSe_2 等太阳能电池。如 CdHgTe/CdS 和 SnO_2

/ CdTe 太阳电池，其效率已达 10%。这些新材料带隙不同并随成份改变而改变。最近发展起来的一种按带隙大小排列的叠层电池，其效率大为提高。

如果顶端带隙最大向下排列得到二电池的叠层电池理论效率可达 37%，三电池达 40%。

制备 CdTe/CdS 太阳电池时，常发生互扩散，Te 扩散入 CdS 层中形成 CdS_{1-x}Te_x，它具有纤锌矿结构，带隙小于 CdS，Te 扩散进窗口层降低了器件的 J_{sc}，相似 S 扩散入 CdTe 内形成具有纤锌矿结构合金 CdTe_{1-x}S_x，带隙小于 CdTe，CdTe / CdS 内表面互扩散效应，对太阳电池效率是否有利尚不明确。

3. 6 环境与安全

大规模使用 CdTe 光伏技术的一大障碍和 Cd 的毒性有关。有效地处理废弃和破损的 CdTe 组件，技术上很简单。而 Cd 是重金属，有剧毒，Cd 的化合物与 Cd 一样有毒。主要危险是其尘埃通过呼吸造成对人类和其它动物的危害。因此对破损的玻璃片上的 Cd 和 Te 应去除并回收。损坏或废弃的组件必须妥善处理或用 60% H₂SO₄ + 1.5% H₂O₂ 处理。

3. 7 国内外发展现状与趋势

CdTe 薄膜太阳电池是薄膜太阳电池中发展较快的一种光伏器件。1998 年第二届世界光伏太阳能转换会议上，日本 Matsushita Battery 报道了 CdTe 太阳电池转换效率达到 16.0%，Siemens 报道了面积为 3600cm² 电池转换效率达到 11.1% 的水平。美国国家可再生能源实验室提供了 Solar Cells Inc 的面积为 6879cm² CdTe 薄膜太阳电池的测试结果，转换效率达到 7.7%；Bp Solar 的 CdTe 薄膜太阳电池，面积为 4540cm²，效率为 7.8%，面积为 706cm² 的太阳电池，转换效率达到 10.1%；Goldan Photon 的 CdTe 太阳电池，面积为 3676cm²，转换效率为 7.7%。

在广泛深入的应用研究基础上，国际上许多国家的 CdTe 薄膜太阳电池已由实验室研究阶段开始走向规模工业化生产。1998 年美国的 CdTe 电池产量为 0.2MW，日本的 CdTe 电池产量为 2.0MW。德国 ANTEC 公司将在 Rudisleben 建成一家年产 10MW 的 CdTe 薄膜太阳电池组件生产厂，预计其生产成本将会低于 \$1.4 / w。该组件不但性能优良，而且生产工艺先进，使得该光伏组件具有完美的外型，能在

建筑物上使用，既拓宽了应用面，又可取代某些建筑材料而使电池成本进一步降低。BP Solar 公司计划在 Fairfield 生产 CdTe 薄膜太阳电池。而 Solar Cells 公司也将进一步扩大 CdTe 薄膜太阳电池生产。

我国的 CdTe 薄膜太阳电池仍处于实验室基础应用研究阶段。有关 CdTe 薄膜太阳电池研究，除了内蒙古大学对电沉积 n-CdTe 薄膜的研究报道外，很少有这一领域的研究报道。今后我国在 CdTe 薄膜太阳电池领域应加大研究和开发力度，尽快向工业化生产发展，重点将在以下几个方面进行：研究 CdS 化学沉积方法及处理技术；CdTe 的近空间升华沉积技术；Cu 掺杂 ZnTe 蒸发设备及沉积技术。以期获得性能良好的 CdTe / CdS 太阳电池，在近期内小面积 CdTe / CdS 薄膜太阳电池的转换效率力争达到 13%，以缩短和世界水平的差距。

4. 晶体硅薄膜的制备方法及其晶体硅薄膜太阳电池

为了进一步降低晶体硅太阳电池的成本，近几年来，各国光伏学者发展了晶体硅薄膜太阳电池。即将晶体硅薄膜生长在低成本的衬底材料上，用相对薄的晶体硅层作为太阳电池的激活层，不仅保持了晶体硅太阳电池的高性能和稳定性，而且使硅材料的用量大幅度下降，明显地降低了电池成本。利用晶体硅薄膜制备太阳电池的基本要求为：（1）晶体硅薄膜厚度为 5-150 μm ；（2）增加光子吸收；（3）晶体硅薄膜的宽度至少是厚度的一倍；（4）少数载流子扩散长度至少是厚度的一倍；（5）衬底必须具有机械支撑能力；（6）良好的背电极；（7）背表面进行钝化；（8）良好的晶粒间界。

4.1 晶体硅薄膜的制备方法

4.1.1 半导体液相外延生长法（LPE 法）

LPE 法生长技术已广泛用于生长高质量的外延层和化合物半导体异质结构，如 GaAs、AlGaAs、Si、Ge、SiGe 等。LPE 可以在平面和非平面衬底上生长，能获得结构十分完美的材料。用 LPE 技术生长晶体硅薄膜来制备高效薄膜太阳电池，近年来引起了广泛兴趣。

LPE 生长可以进行掺杂，形成 n-型和 p-型层，LPE 生长设备为通用外延生长设备，生长温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ -900 $^{\circ}\text{C}$ ，生长速率为 0.2 μm -2 $\mu\text{m}/\text{min}$ ，厚度为 0.5 μm -100 μm 。外延层的形貌决定于结晶条件，并可直接获得具有绒面织构表面的外延层。

4. 1. 2 区熔再结晶法 (ZMR 法)

在硅 (或其它廉价衬底材料上) 形成 SiO_2 层, 用 Lp-CVD 法在其上沉积硅层 ($3\mu\text{m}-5\mu\text{m}$, 晶粒尺寸为 $0.01-0.1\mu\text{m}$), 将该层进行区熔再结晶 (ZMR) 形成多晶硅层。

控制 ZMR 条件, 可使再结晶硅膜中的腐蚀坑密度由 $1 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 下降到 $1-2 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$, 同时 (100) 晶相面积迅速增加到 90% 以上。为了满足光伏电池对层厚的要求, 在 ZMR 层上用 CVD 法生长厚度为 $50\mu\text{m}-60\mu\text{m}$ 的硅层作为激活层, 用扫描加热使其晶粒增大至几毫米, 从而形成绝缘层硅结构 (SOI), 激活层为 p 型, 电阻率为 $1 \Omega \cdot \text{cm}-2 \Omega \cdot \text{cm}$ 。为获得高质量的激活层, 在进行 Lp-CVD 前, 对 ZMR 层表面进行 HCl 腐蚀处理。

为制备多晶硅薄膜太阳电池, 在激活层表面进行腐蚀形成绒面结构, 并在其上进行 n-型杂质扩散形成 p-n 结, 然后进行表面钝化处理和沉积减反射层, 并制备上电极, 进行背面腐蚀和氢化处理, 制作背电极, 即制成多晶硅薄膜太阳能电池。

上述结构不但有效地降低串联电阻, 还能增加背反射。在 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 面积上获得转换效率为 14.22% 的多晶硅薄膜太阳电池。

4. 1. 3 等离子喷涂法 (PSM)

采用 DC-RF 混合等离子系统。以纯度为 99.9999%, 粒度为 $50\mu\text{m}-150\mu\text{m}$ 的 p-型晶体硅粉作为原材料, 用 Ar 气作为携带气体, 由 DC-RF 等离子体进行喷涂。原料贮存盒和携带气体管道涂覆 Si-C-N-O 化合物, 防止金属杂质污染。

硅粉在高温等离子体中加热熔化。熔化的粒子沉积在衬底上, 衬底由加热器加热, 沉积前, 用红外热偶测试衬底温度, 使之保持在 1200°C , 沉积室由不锈钢制成, 用无油泵抽真空, 其真空度为 $1.33 \times 10^{-2} \text{pa}$ 。等离子体由 Ar 和少量 H 构成, 沉积时压强为 $8 \times 10^{-8} \text{pa}$ 。沉积的多晶硅膜厚度为 $200\mu\text{m}-1000\mu\text{m}$ 。多晶硅晶粒尺寸为 $20\mu\text{m}-50\mu\text{m}$, 沉积速率大于 $10\mu\text{m} / \text{s}$ 。

用等离子体喷涂沉积多晶硅薄膜太阳电池, 全部采用低温等离子 CVD 工艺。用碱或酸溶液腐蚀沉积的多晶硅层, 在其上于 200°C 用等离子 CVD 形成厚度约 $200 \times 10^{-8} \text{cm}$ 的微晶硅作为发射层, 并制备 ITO 减反射层和银浆电极构成太阳电池。

面积为 1cm^2 ，在 AM1.5、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 条件下，电他转换效率为 $\eta=4.3\%$ 。

4. 1. 4 叠层法

在较低的温度 300°C 下，用叠层技术，在经预先氟化处理的玻璃衬底上沉积多晶硅薄膜，该方法类似于沉积 a-Si:H 薄膜。在低温下用等离子增强化学气相沉积法 (PELVD) 沉积大面积多晶硅薄膜。

一般，p 型掺杂多晶硅薄膜用叠层技术沉积，其厚度为 $0.28\text{mm}\sim 5.78\text{mm}$ 。典型的沉积条件为：SiF₄ 流量为 60SCCm，氢流量为 15SCCm，沉积温度为 300°C ，微波功率为 200W，压强为 53.3Pa。进行 n 型掺杂沉积时，在氢气中混合 10ppmPH₃，流量为 18SCCm。每次沉积持续和原子氢处理时间为 10s。由于沉积时，掺杂用的 PH₃ 和源 SiF₄ 加入氢等离子体区域，这样可以较好地控制膜中的 P 和 Si 的比例。

在 100K-400K 温度范围内，用霍尔效应和电导测量确定其载流子输运特性。实验表明，材料结构是膜厚的函数，霍尔迁移率随膜厚度增加而增加，样品的最高迁移率区是在薄膜表面附近。载流子电导由晶粒间界势垒决定。

4. 1. 5 化学气相沉积法 (CVD)

用化学气相沉积法 (CVD)，在铝陶瓷衬底上沉积 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 的硅薄膜。为了获得高质量的硅薄膜，铝陶瓷衬底上预先沉积 Si₃N₄ / SiO_x 双层膜。在硅薄膜沉积时，引入硼掺杂。用 CW-Ar 激光束溶化沉积的硅膜，在氮气氛中， $400^\circ\text{C}\sim 500^\circ\text{C}$ 下再结晶。

制备薄膜太阳能电池时，用常规方法进行 P 扩散和沉积 ITO 膜，用氢等离子处理来钝化晶体缺陷。电池也可采用 MgF₂ ($110\times 10^{-8}\text{cm}$) / TiO₂ ($650\times 10^{-8}\text{cm}$) 双层减反射膜，MgF₂ 层用电子束蒸发方法沉积，TiO₂ 层用常压 CVD 沉积。该方法制备的太阳能电池厚度为 $4.2\mu\text{m}$ ，短路电流为 $25.5\text{mA}/\text{cm}^2$ ，开路电压为 0.48V，FF 为 0.53， $\eta=6.52\%$ 。

4. 1. 6 固相结晶法 (SPC)

开始材料 a-Si 用 SiH₄ 或 Si₂H₆，辉光放电沉积在平面或绒面衬底上，沉积时加 A PH₃，形成 p 掺杂层，其作用起增强晶核和形成大晶核的作用。p-掺杂层典型的厚度为 170nm，在其上沉积不掺杂的 a-Si 层。通过改变沉积条件，如压力，RF 功率等来改变不掺杂的 a-Si 层的结构。沉积后，在真空中 600°C 下进行退火，使 a-Si 层进行固相结晶，形成多晶硅。

用 Raman 光谱研究未掺杂 a-Si 结构和多晶硅膜关系,经 Secco 腐蚀显露出晶界,用扫描电镜测量晶粒尺寸和密度。

用上述 SPC 法制备的多晶硅薄膜电池,其结构为衬底采用钨,SPC 后 n 型多晶硅层厚度为 $\sim 10\mu\text{m}$,在 n 型多晶硅上沉积卜型 a-Si 和 p 型 a-Si,其厚度为 $\sim 10\mu\text{m}$,在 p 型 a-Si 上沉积 $\sim 70\text{nm}$ 的 ITO 膜,并沉积金属电极。制作的多晶硅太阳电池,面积为 1cm^2 ,转换效率为 6.3%,当波长为 900nm 时,电他的收集系数为 51%,电他少数载流子扩散长度为 $11\mu\text{m}$,最高短路电流为 $28.4\text{mA}/\text{cm}^2$ 。p 型掺杂层的 P 掺杂大于 10^{20}cm^{-3} 。

4.2 国内外发展现状与趋势

晶体硅薄膜太阳电池,近年来在国外发展比较迅速。为了使晶体硅薄膜太阳电池达到商业化,努力将实验室结果推向市场,1988 年制造出 100cm^2 的薄膜太阳电池,其转换效率为 8%。18 个月后,其效率在同样面积下达到 10.9%,3 年半后 12kw 薄膜太阳电池系统投入市场。1994 年底美国加利福尼亚区成功建立了 17.1kW 硅薄膜太阳电池方阵系统,这个系统电池是利用高温热分解喷涂法制备的。在薄膜电池上覆盖了一层抗反射层,硅薄膜晶粒为毫米级,具有宏观结构特性,减少了兰色和远红外光的响应。

1997 年召开的 26 届 IEEE PVSC,14 届欧洲 PVSEC 和世界太阳能大会报道了 Uvited Solar Systemn 薄膜硅太阳电池,转换效率为 16.6%,日本的 Kanebo 为 9.8%,美国 NREL 提供的测试结果,USSA 的 Si/SiGe/SiGe 薄膜电池,面积为 903cm^2 ,转换效率为 10.2%,功率为 9.2W。

我国晶体硅薄膜太阳电他的研究仍处于实验室阶段。1982 年长春应用化学研究所韩桂林等人用 CVD 法,在系统中采用高频加热石墨,系统抽真空后通氦气以驱除残留气体,加热石墨至所需温度,随即通入混合气体,在 1100°C - 1250°C 下, SiCl_4 被 H_2 还原,硅沉积在衬底上。研究了多晶硅薄膜的生长规律并对膜的基本物理特性进行研究。1998 年北京市太阳能研究所赵玉文等报道了以 SiH_2Cl_2 为原料气体,采用快速热化学气相沉积(RTCVD)工艺在石英反应器中沉积多晶硅薄膜。气源为 H_2 和 SiH_2Cl_2 的混合物,石英管内配有石墨样品托架,采用程控光源将石墨样品托架加热到 1200°C 。试验所用衬底为重掺杂磷非活性单晶硅

片或非硅质底材。在 1030℃下薄膜生长速率为 10nm / s，研究了薄膜生长特性，薄膜的微结构，并研制了多晶硅薄膜电池，电池结构为金属栅线 / p+多晶硅膜 / n 多晶硅膜 / n++C-硅 / 金属接触。采用扩硼形成 p+层，结深约为 1μm，电池面积为 1cm²，AM1.5、100mV / cm² 条件下，无减反射涂层，电池转换效率为 4.54 %，J_{sc}=14.3mA / cm²，V_{oc}=0.460V，FF=0.67。

我国晶体硅薄膜太阳能电池研究水平与国际水平相差较大，应加速发展。在廉价衬底上形成高质量的多晶硅薄膜，研究衬底与硅膜之间夹层，用以阻挡杂质向硅膜扩散，并研制出具有较高转换效率的多晶硅薄膜电池，在近期内使其转换效率能达到 10%左右，为工业化生产作准备，以期成本能降低到 \$ 1/w 左右。

5. 有机半导体太阳能电池

共轭高分子聚合物材料由于沿着其化学链的每格点已轨道交迭形成了非定域化的导带和价带，因而呈现半导体性质。通过适当的化学掺杂可达到高电子迁移率，禁带宽度为几个电子伏特。有机半导体有许多特殊的性质，可用来制造许多薄膜半导体器件，如：场效应晶体管、场效应电光调制器、光发射二极管、光伏器件等。用有机半导体制造太阳能电池工艺简单、重量轻、价格低、便于大规模生产。

用于光伏器件的高分子材料主要有酞青锌 (ZnPc)、甲基叶林 (TTP)、聚苯胺 (PAm)、聚对苯乙炔 (PPV) 等。一般用金属电极与有机半导体之间形成肖特基势垒和产生的内建电场，离解光生激子成为自由载流子并驱动载流子在有机半导体中传输。以 PPV 为例，制作太阳能电池过程如下：先在透明玻璃上沉积透明导电膜 ITO 层，再用旋转法将 PPV 溶液涂于 ITO 层上，然后在 250℃下加热使溶液转换成 PPV。PPV 的厚度控制在 100nm 左右。最后利用热蒸发将金属 Al、Mg 或 Cd 沉积于 PPV 上，这样制备成金属 / PPV / ITO 结构光伏二极管。

有机半导体光伏器件中光生载流子的产生依赖界面之间的电场，即只有扩散到金属 / 有机界面的激子才能够有效地转化为自由载流子。因而肖特基型有机太阳能电池光伏特性与电极性质有关。同时金属电极透光性差，又能促使激子复合，以及金属电极表面态又是自由载流子的强复合中心，所以导致了金属 / 有机半导体太阳能电池的填充因子很低。例如 Mg / PPV 太阳能电池的填充因子只有 0.2。

为了提高填充因子，改进太阳能电池的特性，利用有机半导体与有机半导体形成双层 p-n 异质结的系统。这种结构可使内建电场存在的结合面与金属电极隔开。

例如用 PPV 作为 p 型半导体, Perylene 为 n 型半导体, 构成 ITO / PPV (90nm) / Perylene (120nm) / Al 结构的太阳电池、在暗场下 3V 偏压时, 其整流比率大于 10⁵。在 490nm 波长和 0.27mWcm⁻² 功率的光照下, 开路电压约为 1V, 短路电流量子产额大于 6%。激子的扩散长度约为 9×10⁻⁹m。

双层有机半导体异质结太阳电池不同于单层电池的另一个关键性的原因是, 有机 / 有机界面决定其光伏性质而不是有机 / 电极界面。有机 / 有机界面区控制着光生载流子的产生, 界面内建场提供了自由载流子输运到电极的驱动力。表 3 列出了几种有机半导体异质结太阳电池的主要参数。

经理论分析表明, 异质结酞菁 (Me-pTC) / 铝酞菁 (CIAiPc) 太阳电池最佳厚度为 3×10⁻⁸m 时, 电池的理论转换效率最大可达 4.76%。而单层酞菁膜层厚度为 2×10⁻⁸m 时, 其单层肖特基电池的最大转换效率为 1.0%。另外酞菁和铝酞菁在真空沉积过程中, 酞菁分子呈有序排列, 因而激子扩散长度 (1.5×10⁻⁸m) 比非晶层 (无序结构) 中的激子的扩散长度 (6×10⁻⁸m) 长得多。

目前所有的非晶有机半导体或掺杂的高分子聚合物的一个突出问题是, 低的载流子迁移率, 即迁移率仅约 10⁻⁸ 到 10⁻²cm² / Vs。一般电子迁移率低于空穴迁移率。无序有机材料荷电粒子的传输主要是通过跳跃式过程进行的, 即中性分子和荷电衍生物之间单电子氧化-还原过程。荷电粒子的跳跃速率或迁移率主要受无序性对电荷电粒子传输位置的影响。因此增加分子有序或减少无序性是增强迁移率的一种有效办法。最近 Lin 等人利用真空共蒸发的方法将 NTDI (N, N' bis (1,2-dimethylpropyl-1, 4, 5, 8-naphthal-enetetra-carboxylic diimide) TTA (tri-*i*-tolylamine) 形成组份薄膜, 其组份比例 0.55 / 0.45。这种 NTDI / TTA 组份有机半导体薄膜的电子迁移率比单一的 NTDI 膜增加了 4-6 倍。另外, 在 125℃ 的衬底温度下, 真空蒸发 CuPc 形成的膜, 其载流子迁移率达到 100cm² / Vs。利用透射和扫描电子显微镜观察发现, 在 125℃ 下形成的 CuPc 膜是由尺寸为 50nm×260nm 棒状小晶体组成, 已成为结晶薄膜, 所以大大地增强了迁移率。

*理论值

综上所述, 选择最佳有机半导体材料、提高转换效率和稳定性等诸多方面问题, 需要进行大量的工作才能解决, 只有这样有机半导体太阳电池才能达到实际应用

水平。

9. 多晶硅薄膜太阳电池

1. 前言

如果问人类在 21 世纪面临的最大的挑战是什么，答案肯定是环境污染和能源私有制。这两个问题已经变成高悬在人类头顶上的达摩克利斯利剑。人类在努力寻找解决这两个问题方法时发现，太阳能的利用应是解决这两个问题的最好方案。

太阳能是地球上取之不尽的能源。人类利用太阳能的想法由来已久，最早是将它转换为热能加以利用，后来光伏效应的发现使太阳能转化为电能成为可能，以致使太阳能利用领域更加广阔。早在本世纪 50 年代，第一个实用性的硅太阳电池就在美国贝尔实验室内诞生了。不久，它即被用于人造卫星的发电系统上。迄今为止，太空中成千的飞行器都装备了太阳电池发电系统。尽管如此，太阳电池在地面的应用却一直未得到广泛重视，直到 70 年代世界出现“石油危机”，地面大规模应用太阳电池发电才被列上许多国家的议事日程。当时太阳能发电主要使用的是单晶硅太阳电池。进入 80 年代中期，环境能源之后，又成为国际社会普遍关注的焦点之一，全人类又都把目光集中到解决这两个问题的交叉点——太阳能光伏发电上，从而大大加速了开发利用的步伐。此后，随着生产规模的不断扩大、技术的日益提高，单晶硅太阳电池的成本也逐渐下降，1997 年每峰瓦单晶硅太阳电池的成本已经降到 5 美元以下。单晶硅太阳电池虽然在现阶段的大规模应用和工业生产中占主导地位，但是也暴露了许多缺点，其主要问题是成本过高。受单晶硅材料价格和单晶硅电池制备过程的影响，若要再大幅度地降低单晶硅太阳电池成本是非常困难的。作为单晶硅电池的替代产品，现在发展了薄膜太阳电池，其中包括非晶硅薄膜太阳电池，硒铜和碲化镉薄膜电池，多晶硅薄膜太阳电池。在这几种薄膜电池中，最成熟的产品当数非晶硅薄膜太阳电池，在世界上已经有多家公司在生产该种电池的产品，其主要优点是成本低，制备方便，但也存在严重的缺点，即非晶硅电池的不稳定性，其光电转换效率会随着光照时间的延续而衰减，另外非晶硅薄膜太阳电池的效率也较低。一般在 8% 到 1

0%，硒铜和碲化镉多晶薄膜电池的效率较非晶硅薄膜电池高，成本较单晶硅电池低，并且易于大规模生产，还没有效率衰减问题，似乎是非晶硅薄膜电池的一种较好的替代品，在美国已有一些公司开始建设这种电池的生产线。

但是这种电池的原材料之一镉对环境有较强的污染，与发展太阳电池的初衷相背离，而且硒、铜、碲等都是较稀有的金属，对这种电池的大规模生产会产生很大的制约。多晶硅薄膜电池由于所使用的硅量远较单晶硅少，又无效率衰减问题，并用有可能在廉价底材上制备，其成本预期要远低于体单晶硅电池，实验室效率已达18%，远高于非晶硅薄膜电池的效率。因此，多晶硅薄膜电池被认为是最有可能替代单晶硅电池和非晶硅薄膜电池的下一代太阳电池，现在已经成为国际太阳能领域的研究热点。

2、多晶硅薄膜太阳电池的研究概况

多晶硅薄膜太阳电池的研究重点有两个方面，其一是电池衬底的选择，其二是制备电池的工艺和方法，但无论是哪一方面的研究都应满足制备多晶硅薄膜电池的一些基本要求：

(1) 低成本 (材料和工艺)

(2) 高效率

(3) 易于产业化

对于衬底的选择必须满足以下一些条件：

(1) 低成本

(2) 导电 (或绝缘，依结构设计而定)

(3) 热膨胀系数与硅匹配

(4) 非毒性

(5) 有一定机械强度

比较合适的衬底材料为一些硅或铝的的化合物, 如 SiC, Si₃N₄, SiO₂, Si, Al₂O₃, SiAlON, Al 等, 从目前的文献看有以下一些衬底:

(1) 单晶硅

(2) 多晶硅

(3) 石墨包 SiC

(4) SiSiC

(5) 玻璃碳

(6) SiO₂ 膜

目前, 制备多晶硅薄膜的工艺方法主要有以下几种:

(1) 化学气相沉积法 (CVD法)

(2) 等离子体增强化学气相沉积法 (PECVD法)

(3) 液相外延法 (LPE)

(4) 等离子体溅射沉积法

化学气相沉积 (CVD) 法就是将衬底加热到适当的温度, 然后通以反应气体 (如 SiH_2Cl_2 、 SiHCl_3 、 SiCl_4 、 SiH_4 等), 在一定的保护气氛下反应生成硅原子并沉积在衬底表面。这些反应的温度通常较高, 在 $800 \sim 1200^\circ\text{C}$ 之间。人们发现, 如果直接在非硅底材上用 CVD 法沉积多晶硅, 较难形成较大的晶粒, 并且容易在晶粒之间形成孔隙, 对制备较高效率的电池不利。因此发展了再结晶技术, 以提高晶粒尺寸, 其具体方法是: 先用低压化学气相沉积 (LPCVD) 法在衬底表面形成一层较薄的、重掺杂的非晶硅层, 再用高温将这层非晶硅层退火, 得到较大的晶粒, 用这层较薄的大尺寸多晶硅层作为籽晶层, 在其上面用 CVD 法生长厚的多晶硅膜。可以看出, 这种 CVD 法制备多晶硅薄膜太阳能电池的关键是寻找一种较好的再结晶技术。到目前为止, 再结晶技术主要有以下几种:

(1) 固相晶化 (LAR) 法

(2) 区熔再结晶 (ZMR) 法

(3) 激光再结晶 (LMC) 法

固相晶化法需对非晶硅薄膜进行整体加热, 温度要求达到 1414°C 的硅的熔点。该法的缺点是整体温度较高, 晶粒取向散乱, 不易形成柱状结晶。区熔再结晶法需将非晶硅整体加热至一定温度, 通常是 1100°C , 再用一个加热条加热局部使其达到熔化状态。加热条在加热过程中需在非晶硅表面移动。区熔再结晶法可以得到厘米量级的晶粒, 并且在一定的技术处理和工艺条件的配合下可以得到比较一致的晶粒聚向。激光退火法采用激光束的高温将非晶硅薄膜熔化结晶, 以得到多晶硅薄膜。在这三种方法中以 ZMR 法最成功, 日本三菱公司用该法制备的电池, 效率已达 16.42%, 德国的 FRONHAUFER 研究所在这方面的研究处于领先水平。

等离子增强化学气相沉积（PECVD）法是利用PECVD技术在非硅衬底上制备晶粒较小的多晶硅薄膜的一种方法。该薄膜是一种P—I—N结构，主要特点是在P层和N层之间有一层较厚的多晶硅的本征层（I层）。其制备温度很低（100—200℃），晶粒很小（~10—7M量级），但已属于多晶硅薄膜，几乎没有效率衰减问题。日本科尼卡公司在1994年提出这一方法，目前用这一方法制备的电池，最高效率已达10.7%。但是，该方法也存在生长速度太慢以及薄膜极易受损等问题，有待今后研究改进。

液相外延（LPE）法就是通过将硅熔融在母液里，降低温度使硅析出成膜的一种方法，美国ASTRO POWER公司和德国MAX—PLANCK研究所对这一技术进行了深入的研究。前者用LPE法制备的电池，效率已达12.2%，但技术细节十分保密。

等离子体溅射法是一种物理制备法，还很不成熟。其主要问题也是晶粒的致密度问题。

除了上述制备薄膜的方法外，在用多晶硅薄膜制备太阳能电池器件方面人们也采取了一系列工艺步聚，以提高效率。这些工艺步聚包括：

- （1）衬底的制备和选择
- （2）隔离层的制备
- （3）籽晶层或匹配层的制备
- （4）晶粒的增大
- （5）沉积多晶硅薄膜

(6) 制备 P-N 结

(7) 光学限制: 上下表面结构化, 上下表面减反射

(8) 电学限制: 制备背场 (BSF) 和前后电极的欧姆接触

(9) 制备电极

(10) 钝化: 晶粒间界的钝化和表面钝化

目前, 几乎所有制备体单晶硅高效电池的实验室技术均已用在制备多晶硅薄膜太阳能电池的工艺上, 甚至还包括一些制备集成电路的方法和工艺。表 1 总结了多晶硅薄膜太阳能电池的进展情况。

3、北京市太阳能研究所的工作

北京市太阳能研究所从 1995 年开始研究多晶硅薄膜太阳能电池, 其目标是跟踪该领域世界发展情况, 为今后产业化和降低成本打下坚实的基础, 进而赶超世界先进水平。我们在薄膜太阳能电池研究方面主要进行 CVD 法和 PECVD 法研究。在 CVD 方法的研究方面, 我们自行设计加工了一台 CVD 设备, 并开展了生长单晶硅和多晶硅薄膜的研究。在重掺单晶硅衬底上用 CVD 法外延生长得到 20 μm 的硅薄膜, 在生长的同时掺入硼, 使得硅薄膜成 P 型。再通过磷扩散在薄膜上形成 P-N。在电池的正表面生长一层 110 nm 的 SiO₂ 膜, 该膜具有减反射和表面钝化的双重作用。前电极采用光刻栅线的方法在 SiO₂ 膜上开出电极栅线条, 再用热蒸发法制备 Ti/PD/AG 电极。在衬底的背面蒸镀 AL 或 Ti/PD/AG, 得到背电极。用这种方法得到的硅薄膜电池的效率已达到 12.11%。

在非硅底材上生长多晶硅薄膜的太阳能电池的研究方面, 我们主要研究在 SiO

2 和 S I 3 N 4 膜底材上生长多晶硅薄膜电池。S I O 2 膜与硅的晶格匹配较好，热膨胀系数也较相近，用 S I O 2 作衬底较佳。首先在 S I O 2 膜上直接用 C V D 法沉积薄膜，得到晶粒尺寸为几十微米的多晶硅薄膜，但发现薄膜中晶粒之间有较大的孔隙，这些孔隙导致晶粒之间的电传导减弱，使得下下电极之间极易短路，以致电池效率很低。我们进一步采用 L P C V D 法先在 S I O 2 膜生长一层晶粒很小、很薄的多晶硅薄膜，由于采用 S I H 4 热分解方法，使得在 S I O 2 膜上的选择性生长较弱，晶粒很致密。以这样一层微晶硅膜作为衬底，用 C V D 法生长多晶硅厚膜，便得到了晶粒较致密的多晶硅薄膜。但由于作为籽晶层的微晶层中晶粒较小，其上生长的多晶硅薄膜中的晶粒也不大，影响了电池的效率，目前我们正在研制 Z M P 设备，以增大晶粒尺寸。

采用 C V D 法必须有再结晶步聚，而再结晶一般均需很高温度，这样便大大提高了电池生产成本。我们正在研究能避免再结晶过程的薄膜电池制备方法。我们发现，在 S I 3 N 4 膜上有 C V D 法直接沉积可以得到很致密的多晶硅膜。熔融硅对 S I O 2 和 S I 3 N 4 的浸润角不同，在 S I O 2 上的浸润角为 87 度角，而在 S I 3 N 4 膜上为 25 度角，这样在生长时就会表现出不同的动力学过程。在 S I O 2 上生长时晶粒趋于收缩，使得晶粒间孔隙较大；而在 S I 3 N 4 膜上生长时，晶粒趋于铺展，使得晶粒间孔隙较小。我们通过比较这两种衬底上生长的多晶硅膜的扫描电镜图象和 X 射线分析，发现这两种薄膜存在较大差异，我们正在研究在这种薄膜上制备电池。

在 P E C V D 法制备多晶硅薄膜电池方面，我们自行研制了一台加热温度可达 700℃ 的 P E C V D 系统。通过改变衬底温度和 S I H 4 与 H 2 的比例，得以在 P E C V D 设备上得到多晶硅薄膜。用这种方法制备的 P - I - N 结构多晶硅电池，其开路电压达 430 mV，目前正在优化工艺条件，以得到更好的电池。

总之，多晶硅薄膜太阳电池已成为目前世界上光伏领域中最活跃的研究方向，人们期待研究工作获得突破，以大大降低太阳电池的成本，为解决能源和环境问题作出贡献。 返回 11

10. 世界太阳能开发利用现状

在跨入 21 世纪之际，人类将面临实现经济和社会可持续发展的重大挑战，在有限资源和环保严格要求的双重制约下发展经济已成为全球热点问题。而能源问题将更为突出，不仅表现在常规能源的匮乏不足，更重要的是化石能源的开发利用带来了一系列问题，如环境污染，温室效应都与化石燃料的燃烧有关。目前的环境问题，很大程度上是由于能源特别是化石能源的开发利用造成的。因此，人类要解决上述能源问题，实现可持续发展，只能依靠科技进步，大规模地开发利用可再生洁净能源。太阳能以其独具的优势，其开发利用必将在 21 世纪得到长足的发展，并终将在世界能源结构转移中担纲重任，成为 21 世纪后期的主导能源。

1. 太阳能与化石能源的简要比较

1.1 化石能源带来的问题

(1) 能源短缺

由于常规能源的有限性和分布的不均匀性，造成了世界上大部分国家能源供应不足，不能满足其经济发展的需要。从长远来看，全球已探明的石油储量只能用到 2020 年，天然气也只能延续到 2040 年左右，即使储量丰富的煤炭资源也只能维持二三十年。因此，如不尽早设法解决化石能源的替代能源，人类迟早将面临化石燃料枯竭的危机局面。

(2) 环境污染

当前，由于燃烧煤、石油等化石燃料，每年有数十万吨硫等有害物质抛向天空，使大气环境遭到严重污染，直接影响居民的身体质量和生活质量；局部地区形成

酸雨，严重污染水土。这些问题最终将迫使人们改变能源结构，依靠利用太阳能等可再生洁净能源来解决。

(3) 温室效应

化石能源的利用不仅造成环境污染，同时由于排放大量的温室气体而产生温室效应，引起全球气候变化。这一问题已提到全球的议事日程，其影响甚至已超过了对环境的污染，有关国际组织已召开多次会议，限制各国 CO₂ 等温室气体的排放量。

1. 2 太阳能资源及其开发利用特点

(1) 储量的“无限性”

太阳能是取之不尽的可再生能源，可利用量巨大。太阳每秒钟放射的能量大约是 $1.6 \times 10^{23} \text{kW}$ ，其中到达地球的能量高达 $8 \times 10^{13} \text{kW}$ ，相当于 $6 \times 10^9 \text{t}$ 标准煤。按此计算，一年内到达地球表面的太阳能总量折合标准煤共约 1.892×10^{13} 千亿 t，是目前世界主要能源探明储量的一万倍〔2〕。太阳的寿命至少尚有 40 亿年，相对于人类历史来说，太阳可源源不断供给地球的时间可以说是无限的。相对于常规能源的有限性，太阳能具有储量的“无限性”，取之不尽，用之不竭。这就决定了开发利用太阳能将是人类解决常规能源匮乏、枯竭的最有效途径。

(2) 存在的普遍性

虽然由于纬度的不同、气候条件的差异造成了太阳能辐射的不均匀，但相对于其他能源来说，太阳能对于地球上绝大多数地区具有存在的普遍性，可就地取用。这就为常规能源缺乏的国家和地区解决能源问题提供了美好前景。

(3) 利用的清洁性

太阳能像风能、潮汐能等洁净能源一样，其开发利用时几乎不产生任何污染，加之其储量的无限性，是人类理想的替代能源。

(4) 利用的经济性

可以从两个方面看太阳能利用的经济性。一是太阳能取之不尽，用之不竭，而且在接收太阳能时不征收任何“税”，可以随地取用；二是在目前的技术发展水平下，有些太阳能利用已具经济性，如太阳能热水器一次投入较高，但其使用过程不耗能，而电热水器和燃气热水器在使用时仍需耗费，有关研究结果表明〔3〕，太阳能热水器已具很强的竞争力。随着科技的发展以及人类开发利用太阳能的技术突破，太阳能利用的经济性将会更明显。

1.3 21 世纪后期太阳能将占主导地位

世界各国，尤其发达国家对 21 世纪的能源问题都特别关注。由于化石能源储量的有限性和利用的污染性，各国专家都看好太阳能等可再生能源，尽管目前太阳能的利用仅在世界能源消费中占很小的一部分。如果说 20 世纪是石油世纪的话，那么 21 世纪则是可再生能源的世纪，太阳能的世纪。据权威专家估计，如果实施强化可再生能源的发展战略，到下世纪中叶，可再生能源可占世界电力市场的 3/5，燃料市场的 2/5。在世界能源结构转换中，太阳能处于突出位置。美国的马奇蒂博士对世界一次能源替代趋势的研究结果表明，太阳能将在 21 世纪初进入一个快速发展阶段，并在 2050 年左右达到 30% 的比例，次于核能居第二位，21 世纪末太阳能将取代核能居第一位〔5〕。壳牌石油公司经过长期研究得出结论，下一世纪的主要能源是太阳能；日本经济企划厅和三洋公司合作研究后则更乐观地估计，到 2030 年，世界电力生产的一半将依靠太阳能。正如世界观察研究所的一期报告所指出：正在兴起的“太阳经济”将成为未来全球能源的主流。其最新一期报告则指出，1997 年全球太阳电池的销售量增长了 40%，已成为

全球发展最快的能源。

2 太阳能开发利用技术及其产业化的现状与发展趋势

人类利用太阳能已有几千年的历史，但发展一直很缓慢，现代意义上的开发利用只是近半个世纪的事情。1954年美国贝尔实验室研制出世界上第一块太阳能电池，从此揭开了太阳能开发利用的新篇章。之后，太阳能开发利用技术发展很快，特别是70年代爆发的世界性的石油危机有力地促进了太阳能开发利用。经过近半个世纪的努力，太阳能光热利用技术及其产业异军突起，成为能源工业的一支生力军。迄今为止，太阳能的应用领域非常广泛，但最终可归结为太阳能热利用和光利用两个方面。

2.1 太阳能热利用及其产业发展

根据可持续发展战略，太阳能热利用在替代高含碳燃料的能源生产和终端利用中大有用武之地。太阳能热利用具有广阔的应用领域，可归纳为太阳能热发电(能源产出)和建筑用能(终端直接用能)，包括采暖、空调和热水。当前太阳能热利用最活跃、并已形成产业的当属太阳能热水器和太阳能热发电。

2.1.1 太阳能热水器

在世界范围内，太阳能热水器技术已很成熟，并已形成行业，正在以优良的性能不断地冲击电热水器市场和燃气热水器市场。国外的太阳能热水器发展很早，但80年代的石油降价，加之取消对新能源减免税优惠的政策导向，使工业发达国家太阳能热水器总销售量徘徊在几十万平方米。据报道，1992年国外太阳能热水器总量为45万m²，其中日本为20万m²，美国为12万m²，欧洲为8万m²，其他国家为5万m²。世界环境发展大会之后，许多国家又开始重视太阳能热水器在节约常规能源和减少排放CO₂方面的潜力，仅据美国加州首府萨克门托市的

计划，到 2000 年太阳能热水器将取代该州 47000 套家用电热水器；到 2000 年日本太阳能热水器的拥有量将翻一番；以色列更是明文规定，所有新建房屋必须配备太阳能热水器。目前，我国是世界上太阳能热水器生产量和销售量最大的国家。1992 年销售量为 50 万 m²，为世界其他各国销售量之和；1995 年销售量翻番，达 100 万 m²。据初步统计，1997 年我国太阳能热水器销售量 300 万 m²，目前，我国从事太阳能热水器研制、生产、销售和安装的企业达到 1000 余家，年产值 20 亿元，从业人数 1.5 万人能源工程，1999，(1)：59。但从房屋的热水器安装率来说，以色列已达 80%，日本为 11%，台湾达 2.7%。(6) .，我国在千分之几左右，其太阳能热水器的推广应用潜力仍很大。国际上，太阳能热水器产品经历了闷晒式、平板式、全玻璃真空管式的发展，目前其产品的发展方向仍注重提高集热器的效率，如将透明隔热材料应用于集热器的盖板与吸热间的隔层，以减少热量损失；聚脂薄膜的透明蜂窝已在德国和以色列批量生产。

随着世界范围内的环境意识和节能意识的普遍提高，太阳能热水器必将逐步替代电热水器和燃气热水器。虽然太阳能热水器目前仍存在市场价格高、受季节和天气影响的不利因素，但太阳能热水器具有不耗能、安全性、无污染等优势，而且随着技术的发展其经济性也逐渐显露出来。

2.1.2 太阳能热发电技术

80 年代太阳能热利用技术的最大突破是实现了太阳能热发电的商业化。Luz 国际公司在美国南加州自 1984 年至 1991 年共建造了 9 个柱形抛物槽镜分散聚光系统的太阳能热发电站，总功率为 354MW，约占当地电网容量的 2%。9 座电站中最大的容量为 80MW，约有 900 条聚光槽组成。由于美国政府和州政府先后在 1991 年取消对太阳能电站的投资减免税优惠政策，迫使第 10 号电站停建，公司宣告破产。另一颇具实力的 Solel 公司也在致力于太阳能热发电，它于 1992 年接收了破产的 Luz 公司的技术，将开发市场瞄向澳大利亚、以色列和北美洲。Solel 公司自称具有建造 300MW 大型太阳能热发电站的能力。该公司已开始在美国建造一座 70MW 的槽型太阳能热发电装置，并计划在以色列建一座 200MW 的电站，同时正在洽谈在北美洲和另两洲建三座电站，每座 200~300MW。Solel 公司在

澳大利亚的另一目标是 2000 年的悉尼奥运会，它和米尔斯公司将合建一个太阳能热发电的联合体，为奥运村旅馆和运动会主会场提供 10MW 的电力。希腊政府 1997 年开始实施一项 500MW 的太阳能热发电项目，计划于 2003 年完工，届时将是世界上最大的太阳能电站。此外，它的阿莫科石油公司将在印度沙漠地区建造一座更大的太阳能热电站。

目前，太阳能热发电在技术上和经济上可行的三种形式是：①30~80MW 线聚焦抛物面槽式太阳热发电技术(简称抛物面槽式)；②30~200MW 点聚焦中央接收式太阳热发电技术(简称塔式)；③7.5~25kW 的点聚焦抛物面盘式太阳热发电技术(简称抛物面盘式)。在上述三种技术中，抛物面槽式领先一步，美国加州的 9 座太阳热发电站可以代表槽式热发电技术的发展现状。塔式太阳热发电技术也是集中供电的一种适用技术，目前只有美国巴斯托建的一座叫“Solar II”的电站，功率为 43MW，该电站成功运行两年后，两家美国电力公司计划建两座 100MW 的电站。为了提高塔式电站的效率，有人提出了一种新想法，把带有太阳能塔的定日镜阵列附加到先进联合循环电站上作为燃料节省装置，采用甲烷重整工艺，以太阳能提高天然气等级。抛物面盘式太阳热发电技术很适合于分散式发电，可以在偏远地区用作独立系统。作为太阳能供电的一种方式，太阳热发电技术在经济上是可行的，而且有较大的市场潜力。在美国加州的太阳热发电站建造过程中，由于技术进步及容量的增大，电站的装机造价和发电成本显著下降，1984 年 I 号电站(14MW)造价为 5979 美元/kW，发电成本 26.5 美分/kWh；到 1990 年的 VIII 号电站(80MW)，造价降至 3011 美元/kW，发电成本降到 8.9 美分/kWh。因此，抛物面槽式在太阳能丰富的地区，经济上已能与燃油的火电站竞争。我国西南电力设计院曾对西藏地区以引进 Luz 公司太阳能热电站进行估算，如果考虑设备的折旧和还贷，太阳能热电站和火力发电站的发电成本均为 1.1 元/kWh，如果不考虑设备折旧，仅计入运行和维护费用，则太阳能电站的发电成本为 0.1 元/kWh，而火力发电站的成本为 0.8 元/kWh。有人估算过 13 种太阳热电站在不同日照射条件下的发电成本，结果表明，随着年产电量的增加，主要是随着机组容量的增大、日射强度的增高、部件和系统的进一步改进，发电成本显著下降。

进而对地中海国家的太阳能热发电应用进行过可行性研究，认为太阳能的热利用在这一地区具有特殊重要性，具有巨大的市场潜力。一方面，地中海国家技术水平高、资金雄厚，且有很好的太阳能热发电示范和早期商业化基础；另一方面，未来几十年里，地中海国家能源需求量大，每年要新增 5~6GW，加之该地区太阳能资源丰富，年辐射强度大于 1700kWh/m^2 的面积达到 700 万 km^2 ，太阳热可发电容量达 1200GW，是目前全球电力需求的 4 倍。所有这一切形成了地中海地区广阔的太阳能热发电市场。

2.2 太阳能光电技术及其产业

2.2.1 太阳能光电已成为全球发展最快的能源

50 年代第一块实用的硅太阳能电池的问世，揭开了光电技术的序幕，也揭开了人类利用太阳能的新篇章。自 60 年代太阳能电池进入空间、70 年代进入地面应用以来，太阳能光电技术发展迅猛。世界观察研究所在其最近一期研究报告中指出，利用太阳能获取电力已成为全球发展最快的能量补给方式。报告说，1990 年以来，全球太阳能光伏发电装置的市场销售量以年平均 16% 的幅度递增，目前总发电能力已达 800MW，相当于 20 万个美国家庭的年耗电量太阳能。

2.2.2 提高转换效率、降低成本是光电技术发展的关键

当前影响光电池大规模应用的主要障碍是它的制造成本太高。在众多发电技术中，太阳能光电仍是花费最高的一种形式，因此，发展阳光发电技术的主要目标是通过改进现有的制造工艺，设计新的电池结构，开发新颖电池材料等方式降低制造成本，提高光电转换效率。近年来，光伏工业呈现稳定发展的趋势，发展的特点是：产量增加，转换效率提高，成本降低，应用领域不断扩大。目前，世界太阳能电池年产量已超过 150MW，是 1944 年产量的两倍还多，如表 2 所示。单晶硅太阳能电池的平均效率为 15%，澳大利亚新南威尔士大学的实验室效率已达 24.4%；多晶硅太阳能电池效率也达 14%，实验室最大效率为 19.8%；非晶硅

太阳能电池的稳定效率，单结 6~9%，实验室最高效率为 12%，多结电池为 8~10%，实验室最高效率为 11.83 %。由于生产规模的扩大，生产工艺的改进，晶体硅太阳能电池组件的制造成本已降至 3~3.5 美元/W_p，售价也相应降到 4~5 美元/W_p；非晶硅太阳能电池单结售价 3~4 美元，多结售价为 4~5 美元/W_p。与十年前相比，太阳光电池价格普遍降低 20%。最近，瑞士联邦工学院 M·格雷策尔研制出一种二氧化钛太阳能电池，其光电转换率高达 33%，并成功地采用了一种无定形有机材料代替电解液，从而使它的成本比一块差不多大的玻璃贵不了多少，使用起来也更加简便。可以预料，随着技术的进步和市场的拓展，光电池成本及售价将会大幅下降。表 4 为地面用光伏组件成本/价格的预测结果，表 5 为美国国家可再生能源实验室对太阳能电池成本与市场的关系所做的估计。对比表 4、表 5，可以看出，2010 年以后，由于太阳能电池成本的下降，可望使光伏技术进入大规模发展时期。

表 2 世界光电组件的产量及年增长率

年份	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
年产量(MW)	42.0	47.0	54.0	58.2	61.0	70.7	81.0	90.6	112	

表 3 商品化光伏直流组件效率预测 (%)

电池技术	1990	1995	2000	2010
单晶硅	12	15	18	22
浇铸多晶硅	11	14	16	20
带状硅	12	14	17	21

聚光器(光电池) 17202530

非晶硅(包括叠层电池) 5~67~91014

CuInSe\ -2-8~101214

CdTe-8~101214

低成本基片硅薄膜-8~101215

球粒电池-101214

表 4 地面用太阳能电池组件成本/价格预测(美元)

电池种类\年份 1990 1995 2000 2010

单晶硅 3.25/5.40 2.40/4.00 1.50/2.50 1.20/2.00

多晶硅 3.00/5.00 2.25/3.75 1.50/2.50 1.20/2.00

聚光电池 3.00/5.00 2.00/3.30 1.20/2.00 1.00/1.67

非晶硅 3.00/5.00 2.00/3.33 1.20/2.00 0.75/1.25

薄膜硅 2.00/3.33 1.20/2.00 0.75/1.25

CIS 2.00/3.33 1.20/2.00 0.75/1.25

CdTe 1.50/2.50 1.20/2.00 0.75/1.25

表 5 太阳能电池成本与市场的关系

太阳能电池成本 (美元/峰瓦)可进入的市场

>6 少量应用 2~5 通信、边远地区

1~2 城市屋顶系统 <1 大规模发电

2. 2. 3 光伏新技术发展日新月异

近年来,围绕光电池材料、转换效率和稳定性等问题,光伏技术发展迅速,日新月异。晶体硅太阳能电池的研究重点是高效率单晶硅电池和低成本多晶硅电池。限制单晶硅太阳能电池转换效率的主要技术障碍有:①电池表面栅线遮光影响;②表面光反射损失;③光传导损失;④内部复合损失;⑤表面复合损失。针对这些问题,近年来开发了许多新技术,主要有:①单双层减反射膜;②激光刻槽埋藏栅线技术;③绒面技术;④背点接触电极克服表面栅线遮光问题;⑤高效背反射器技术;⑥光吸收技术。随着这些新技术的应用,发明了不少新的电池种类,极大地提高了太阳能电池的转换效率,如澳大利亚新南威尔士大学的格林教授采用激光刻槽埋藏栅线等新技术将高纯化晶体硅太阳能电池的转换效率提高到 24.4%,他在 1994 年 5 月表示能用纯度低 100 倍的硅制成高效光电池,约在 10 年后采用该类电池的太阳能发电成本可降至 5~8 美分/kWh. (15)。光伏技术发展的另一特点是薄膜太阳能电池研究取得重大进展和各种新型太阳能电池的不断涌现。晶体硅太阳能电池转换效率虽高,但其成本难以大幅度下降,而薄膜太阳能电池在降低制造成本上有着非常广阔的诱人前景。早在几年前,澳大利亚科学家利用多层薄膜结构的低质硅材料已使太阳能电池成本骤降 80%,为此,澳大利亚政府投资 6400 万美元支持这项研究,并希望 10 年内使该项技术商业化。

高效新型太阳能电池技术的发展是降低光电池成本的另一条切实可行的途径,近年来,一些新型高效电池不断问世。专家推断,只要有一二种取得突破,就会使光电池局面得到极大的改观。

(1) 硒化铜铟(CuInSe₂, CIS)薄膜太阳能电池: 1974年CIS电池在美国问世,1993年美国国家可再生能源实验室使它的本征转换效率达16.7%,由于CIS太阳能电池具有成本低(膜厚只有单晶硅的1/100)、可通过增大禁带宽度提高转换效率(理论值为单晶30%,多晶24%)、没有光致衰减、抗放射性能好等优点,各国都在争相研究开发,并积极探索大面积应用的批量生产技术。

(2) 硅-硅串联结构太阳能电池〔18〕: 通过非晶硅与窄禁带材料的层叠,是有效利用长波太阳光,提高非晶硅太阳能电池转换效率的良好途径。研究表明,把1.3eV和1.7eV光学禁带度组合起来的薄膜非晶硅与多晶硅串联电池转换效率最高。它具有成本低、耗能少、工序少、价廉高效等优点

(3) 用化学束外延(CBE)技术生产的多结III-V族化合物太阳能电池〔19〕: III-V族化合物(如GaAs, InP)具有较高的光电转换效率,这些材料的多层匹配可将太阳能电池转换效率提高到35%以上。而这种多层结构很容易用CBE法制作,并能以低于1美元/W_p的成本获得超高效率。

(4) 大面积光伏纳米电池: 1991年瑞士M. Grtzel博士领导的研究小组,用纳米TiO₂粉水溶液作涂料,和含有过渡族金属有机物的多种染料及玻璃等材料制作出微晶染料敏感太阳能电池,简称纳米电池。计算表明,可制造出转换效率至少为12%的低成本电池。这种电池为大面积应用于建筑物外表面提供了广阔的前景。

2.2.4 各国的光伏计划雄心勃勃

随着太阳能光电技术的日趋成熟和商业化发展,太阳能光电技术的推广应用有了

长足的进展。目前，已建成多座兆瓦级光伏电站，最大的是位于美国加州的光伏电站，容量为 6.5MW_p，现正在希腊克里特岛建造的一座阳光电站，容量为 50MW_p，估计 2003 年可建成供电，总投资 1775 万美元。1997，19(2)：23。而在美国准备建造的另一座电站规模将达到 100MW_p，已与太阳能热发电站容量相匹敌。除此之外，一些国家推出的屋顶计划将更引人注目，显示了阳光发电的广阔应用前景和强大的生命力。1990 年，德国政府率先推出的“千顶计划”，至 1997 年已完成近万套屋顶光伏系统，每套容量 1~5kW_p，累计安装量已达 33MW_p，远远地超出了当初制定的计划规模。日本政府从 1994 年开始实施“朝日七年计划”，计划到 2000 年安装 16.2 万套屋顶系统，总容量达 185MW_p，1997 年又再次宣布实施“七万屋顶计划”，每套容量扩大到 4kW_p，总容量为 280MW_p。印度于 1997 年 12 月宣布在 2002 年前推广 150 万套太阳能屋顶系统。意大利 1998 年开始实施“全国太阳能屋顶计划”，总投入 5500 亿里拉，总容量达 50MW_p。而最雄心勃勃的屋顶计划当属 1997 年 6 月美国总统克林顿宣布实施的美国“百万屋顶计划”，计划从 1997 年开始至 2010 年，将在百万个屋顶上，安装总容量达到 3025MW_p 的光伏系统，并使发电成本降到 6 美分/kWh。上述各国屋顶计划的实施，将有力地促进太阳能光电的应用普及，使太阳能光电进入千家万户。

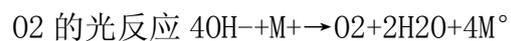
与此相呼应，当前世界上实力雄厚的 10 家光伏公司，虽然目前的生产能力都不大，但都有雄心勃勃的扩展计划。各公司年产目标为：Kyocera 公司和夏普公司 60MW，BP 太阳能公司 50MW，西门子公司和 Solarex 公司 30MW，壳牌/Pilington 公司和 ASE 公司 25MW，Photowatt 公司，AP 公司和三洋/Solec 公司 15MW。据美国 Spire 公司预测，2003 年世界光电池的生产能力将达到 350MW，而 2010 年的光电池组件交易量将达到 700~4000MW/年。

光伏技术发展的趋势，近期将以高效晶体硅电池为主，然后逐步过渡到薄膜太阳能电池和各种新型太阳能光电池的发展。应用上将从屋顶系统突破，逐步过渡到与建筑一体化的大型并网光伏电站的发展。

2.3 太阳能光电制氢

70年代科学家发现：在阳光辐照下 TiO₂ 之类宽频带间隙半导体，可对水的电解提供所需能量，并析出 O₂ 和 H₂，从而在太阳能转换领域产生了一门新兴学科——光电化学。随着光 电化学及光伏技术和各种半导体电极试验的发展，使得太阳能制氢成为发展氢能产业的最佳选择。

1995年，美国科学家利用光电化学转换中半导体/电介质界面产生的隔栅电压，通过固定两个光粒子床的方法，来解决水的光催化分离问题取得成功〔22〕。其两个光粒子床概念的光电化学水分解机制为：



净结果为： $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ (其中 M 为氧化还原介质)

近来，美国国家可再生能源实验室还推出了一种利用太阳能一次性分解成氢燃料的装置。该装置的太阳能转换率为 12.5%，效率比水的二步电解法提高一倍，制氢成本也只有电解法的大约 1/4。日本理工化学研究所用特殊半导体做电极，铂对极，电解质为硝酸钾，在太阳光照射下制得了氢，光能利用效率为 15%左右。

在太阳能制氢产业方面，1990年德国建成一座 500kW 太阳能制氢示范厂，沙特阿拉伯已建成发电能力为 350kW 的太阳能制氢厂。印度于 1995年推出了一项制氢计划，投资 4 800 万美元，在每年有 300 个晴天的塔尔沙漠中建造一座 500kW 太阳能电站制氢，用光伏-电解系统制得的氢，以金属氧化物的形式贮存起来，保证运输的安全新能源。自 90 年代以来，德、英、日、美等国已投资积极进行氢能汽车的开发。美国佛罗里达太阳能中心研究太阳能制氢 (SH) 已达 10 年之

久，最近用 SH 作为汽车燃料-压缩天然气的一种添加剂，使 SH 在高价值利用方面获得成功，为氢燃料汽车的实用化提供了重要基础。其他，在对重量十分敏感的航天、航空领域以及氢燃料电池和日常生活中“贮氢水箱”的应用等方面氢能都将获得特别青睐。

由于氢是一种高效率的含能体能源，它具有重量最轻、热值高、“爆发力”强、来源广、品质纯净、贮存便捷等许多优点，因此，随着太阳能制氢技术的发展，用氢能取代碳氢化合物能源将是 21 世纪的一个重要发展趋势。 返回 11

11. 21 世纪我国太阳能利用发展趋势

引言

近 30 年来，太阳能利用技术在研究开发、商业化生产、市场开拓方面都获得了长足发展，成为世界快速、稳定发展的新兴产业之一。包括太阳能在内的可再生能源在下世纪将会以前所未有的速度发展，逐步成为人类的基础能源之一。据预测，到下世纪中叶，可在生能源在世界能源结构中占到 50%以上，

1. 资源

太阳内部进行着剧烈的由氢聚变成氦的核反应，并不断向宇宙空间辐射出巨大能量。太阳内部的热核反应足以维持 6×10^{10} 年，相对于人类历史的有限年代而言，可以说是“取之不尽、用之不竭”的能源。地面上的太阳辐射能随着时间、地理纬度、气候变化，实际可利用量较低，但可利用资源仍远远大于满足现在人类全部能耗及 2100 年后规划的能源利用量。地球上太阳能资源一般以全年总辐射量 $[\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ 和全年日照总时数表示。就全球而言，美国西南部、非洲、澳大利亚、中国西藏、中东等地区的全年总辐射量或日照总时数最大，为世界太阳能资源最丰富地区。

我国陆地面积每年接收的太阳辐射总量在 $3.3 \times 10^3 \sim 8.4 \times 10^6$ kJ/ (m² · a) 之间, 相当于 2.4×10^4 亿 t 标准煤, 属太阳能资源丰富的国家之一。全国总面积 2/3 以上地区年日照时数大于 2000h, 日照在 5×10^6 kJ/ (m² · a) 以上。我国西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏、内蒙古高原的总辐射量和日照时数均为全国最高, 属太阳能资源丰富地区; 除四川盆地、贵州资源稍差外, 东部、南部及东北等其它地区为资源较富和中等区。

2. 国外发展概况和趋势

2.1 太阳能光伏发电

世界光伏组件在过去 15 年平均年增长率约 15%。90 年代后期, 发展更加迅速, 最近 3 年平均年增长率超过 30%。1999 年光伏组件生产达到 200MW。在产业方面, 各国一直通过扩大规模、提高自动化程度、改进技术水平、开拓市场等措施降低成本, 并取得了巨大进展。商品化电池效率从 10%~13% 提高到 13%~15%, 生产规模从 1~5MW/年发展到 5~25MW/年, 并正在向 50MW 甚至 100MW 扩大; 光伏组件的生产成本降到 3 美元/W 以下。发展中国家印度处于领先地位, 目前有 50 多家公司从事与光伏发电技术有关的制造业, 其中有 6 个太阳电池制造厂和 12 个组件生产厂, 年生产组件 11MW, 累计装机容量约 40MW。

在研究开发方面, 单晶硅电池效率已达 24.7%, 多晶硅电池效率突破 19.8%。非晶硅薄膜电池通过双结、三结迭层和 Ge⁰;Si 合金层技术, 在克服光衰减和提高效率上不断有新的突破, 实验室稳定效率已经突破 15%。碲化镉电池效率达到 15.8%, 铜铟硒电池效率 18.8%。晶硅薄膜电池的研究工作自 1987 年以来发展迅速, 成为世界关注的新热点。

21 世纪世界光伏发电的发展将具有以下特点: (1) 产业将继续以高增长速率发展。多年来光伏产业一直是世界增长速度最高和最稳定的领域之一, 预测今后

10a 光伏组件的生产将以 20%~30%甚至更高的递增速度发展。光伏发电的未来前景已补愈来愈多的国家政府和金融界（如世界银行）所认识。许多发达国家和地区纷纷制定光伏发展规划，如到 2010 年，美国计划累计安装 4.6GW(含百万屋顶计划)；欧盟计划累计安装 6.7GW(可再生能源白皮书)，其中 3.7GW 安装在欧洲内部，3GW 出口；日本计划累计安装 5 GW (NEDO 日本新阳光计划)；预计其它发展中国家 1.8GW (估计约 10%)，预计世界总累计安装 18 GW. 到下个世纪中页，光伏发电成为人类的基础能源之一。

(2) 太阳能电池组件成本将大幅度降低。光伏发电系统安装成本每年以 9%速率降低。1996 年平均安装成本约 7 美元/W, 预计 2005 年可降到 3 美元/W，相当于光伏发电成本 0.11 美元/ (kW·h)，2010 年发电成本将降到 6 美分/ (kW·h)。降低成本可通过扩大规模、提高自动化程度和技术水平、提高电池效率等技术途径实现。欧洲就扩大水平、提高电池效率等技术途径实现。欧洲就扩大规模对降低成本的影响进行了可行性研究[5]，结果表明，年产 500MW 的规模，采用现有几种晶硅电池生产技术，可使光伏组件成本降低到 0.71~1.78 欧元/W。如果加上技术改进和提高电池效率等措施，组件平均成本可降低到 1 美元/W 以下，发电成本约为 6 美分/ (kW·h)。考虑到下个世纪薄膜电池技术会有重大突破，其降低成本的潜力更大。因此下个世纪太阳能电池组件成本大幅度降低是必然趋势。

(3) 光伏产业向百兆瓦级规模和更高技术水平发展。目前光伏组件的生产规模在 5~20MW/年。壳牌公司在德国建立的年产 25MW 多多晶硅组件生产厂于今年 4 月份开工。许多公司在计划扩建和新建年产 50~100MW 级光伏组件生产厂。同时自动化程度、技术水平也将大大提高，电池效率将由现在的水平（单晶硅 13%~15%，多晶硅 11%~13%）向更高水平（单晶硅 18%~20%，多晶硅 16%~18%）发展。

(4) 薄膜电池技术将获得突破。薄膜电池具有大幅度降低成本的潜力，世界许多国家都在大力研究开发薄膜电池。下个世纪薄膜电池技术将获得重大突破，规模会向百兆瓦级以上发展，成本会大幅度降低，实现光伏发电与常规发电相竞争的目标，从而成为可替代能源。

(5) 太阳能光伏建筑集成及并网发电的快速发展。建筑光伏集成具有多功能和可持续发展的特征，建筑物的外壳能为光伏系统提供足够的面积，不需要占用昂贵的土地，省去光伏系统的支撑结构；光伏阵列可以替常规墙包覆装修成本与光伏组件成本相当；光伏系统的安装可集成到建筑施工过程，降低施工成本；

在用电地点发电，避免传输和分电损失（5%~10%），降低了电力传输、分配投资和维修成本；集成设计使建筑更加洁净、完美，使人赏心悦目，容易被专业建筑师、用户和公众接受。太阳能光伏系统和建筑的完美结合体现了可持续发展的理想范例，国际社会十分重视。许多国相继制定了本国的屋顶计划，使得建筑光伏集成技术如旭日东升，蓬勃发展。1997年6月美国宣布了“克林顿总统百万屋顶光伏计划”，2010年完成；欧洲于大致相同的时间宣布了百万屋顶计划，于2010年完成；日本政府在21997财政年度计划安装9400套4kW的屋顶系统，总计37MW。日本政府的计划目标是，到2010年安装5000MW屋顶光伏发电系统。德国联合政府在欧洲百万屋顶的框架下于1998年10月份提出一个光伏工业20年来最庞大的计划即在6a内安装10万套光伏屋顶系统，总容量在300~500MW，总费用约9.18亿马克。该计划于1999年1月实施，在德国引起很大反响，对德国的PV工业将产生不可估量的影响。

光伏系统和建筑结合将使太阳能光伏发电向替代能源过渡，成为世界能源结构组成的重要部分。

2.2 太阳能热利用

2.2.1 太阳能热水器

热水器是太阳能热利用中商业化程度最高、应用最普遍的技术。1998年世界太阳能热水器的总保有量约5400万m²。塞浦路斯和以色列人均使用太阳能热水器面积居世界首位，分别为1m²/人。日本和以色列太阳能热水器户用比例分别为20%和80%。21世纪热水器将仍然是太阳能热利用的最主要市场之一。目前虽然许多国家都得到了较普遍应用，但世界太阳能热水器的平均用户比例还非常低，约1%~2%，同日本的20%和以色列的80%相比，相差很远；此外，服务业、旅游业、公共福利事业等中低温热水应用市场也非常大。1997年世界太阳能热水器的市场约7亿美元。2015年世界人口约70亿，如果热水器用户比例达到20%（日本今天的水平），社会经济和环境效益将非常显著。

2.2.2 太阳能建筑

发展很迅速。80年代国际能源组织（IEA）组织15个国家的专家对太阳能建筑技术进行联合攻关，欧美发达国家纷纷建造综合利用太阳能示范建筑。试验表明，太阳能建筑节能率大约75%左右，已成为最有发展前景的领域之一。建筑能耗占世界总能耗的1/3，其中空调和供热能耗占有相当大的比例，是太阳能热利用的重要市场。太阳能建筑的发展不仅要求建筑师和太阳能专家互相密切合作，而且要求在概念、技术上相互融合、渗透、集成一体，形成新的建筑概念和设计。目前太阳能建筑集成已成为国际上不仅要求有高性能的太阳能部件，同时要求高效的功能材料和专用部件，如隔热材料、透光材料、储能材料、智能窗（变色玻璃）、透明隔热材料等，这些都是未来技术开发的内容。

2.2.3 太阳能热发电

目前热发电系统主要有3种类型：槽式线聚焦系统、塔式系统和碟式系统。槽式系统是利用抛物柱面槽式反射镜将阳光聚焦到管状的接收器上，并将管内传热工质加热产生蒸汽，推动常规汽轮机发电；塔式系统是利用独立跟踪太阳的定日镜，将阳光聚焦到一个固定在塔顶部的接收器上，以产生很高的温度；碟式系统是由许多镜子组成的抛物面反射镜，接收器在抛物面的焦点上，接收器内的传热工质被加热到750℃左右，驱动发动机进行发电。

以色列鲁兹（Luz）公司1985年起先后在美国加州的Mojave沙漠建成9个槽式发电装置，总容量354MW。随着技术不断发展，系统效率由起初的11.5%提高到13.65%，发电成本由26.3美分/(kW·h)降低到12美分/(kW·h)。但近几年来这种系统没有扩大和推广，可认为只是一种大型的商业化示范系统。其它2种处在研究开发和示范阶段，其中由于碟式系统光学效率高、启动损失小及效率高达29%，在3类系统中位居首位。太阳能热发电技术同其它太阳能技术一样，在不断完善和发展，但其它太阳能技术一样，在不断完善和发展，但其商业化程度还

未达到热水器和光伏发电的水平。太阳能热发电正处在商业化前夕，预计 2020 年前，太阳能热发电将在发达国家实现商业化，并逐步向发展中国家扩展。

3. 我国太阳能利用概况和 21 世纪发展思考

3.1 光伏发电

我国太阳池的研究始于 1958 年，1959 年研制成功第 1 个有实用价值的太阳电池。1971 年 3 月首次成功地应用于我国第 2 颗卫星上，1973 年太阳电池开始在地面应用，1979 年开始生产单晶硅太阳电池。80 年代中后期，引进国外太阳电池生产线或关键设备，初步形成生产能力达到 4.5MW 太阳能光伏产业。其中单晶硅电池 2.5MW，非晶硅电池 2MW，工业组件的转换效率单晶硅电池为 11%~13%，非晶硅电池为 5%~6%。

我国光伏组件生产逐年增加，成本不断降低，市场不断扩大，装机容量逐年增加，1999 年底累计约 15MW。应用领域包括农村电气化、交通、通信、石油、气象、国防等。特别是光伏电源系统解决了许多农村学校、医疗所、家庭照明、电视等用电，对发展边远贫困地区的社会经济和文化发挥了十分重要的作用。西藏有 7 个无电县城采用光伏电站供电，社会经济效益非常显著。

在研究开发方面，开展了单晶硅、多晶硅电池研究及非晶硅、碲化镉、硒铜等薄膜电池研究，同时还开展了浇铸多晶硅、银/铝浆、EVA 等材料研究，并取得可喜成果，其中刻槽埋栅电池效率达到国际水平。

20 年来我国光伏产业已形成了较好基础，但在总体水平上我国同国外相比还有很大差距，表现为：（1）生产规模小。我国太阳电池制造厂的生产能力约为 0.5~1MW/a，比国外生产规模低一个多数量级。（2）技术水平较低。电池效率、封装水平同国外存在一定差距。（3）专用原材料国产化经过“八五”攻关取得一定成果，但性能有待能有待进一步改进，部分材料仍采用进口品。（4）成本高。目前我国电池组件成本约 30 元/W，平均售价 42 元/W，成本和售价都高于国

外产品。(5) 市场培育和发展迟缓, 缺乏市场培育和开拓的支持政策、法规、措施。

21 世纪我国光伏发电的发展可考虑 2 种模式, 即年增长率约 15% 的常规模式和在政策法规驱动下年增长率约 25% 的快速模式。根据光伏工业自身的发展经验, 生产量和规模每增加 1 倍, 成本下降约 20%, 而价格通常比成本高 30%; 发电成本考虑了总系统价格、经济寿命(折旧期)、利率、运行和维护费用、保险费等因素。按照这种估算, 2010 年我国光伏组件年生产量将分别达到 11MW 和 27MW, 发电成本分别为 1.14 和 0.96 元, 装机容量分别达到 80MW 和 140MW。2030 年光伏组件年生产量分别达到 175MW 和 2320MW, 发电成本分别为 0.57 和 0.28 元, 总装机容量分别达到 1700MW 和 11700MW。光伏技术的发电成本在 2020 年估计在 0.5~1.0 元/(kW·h) 范围, 在相当大的市场上开始具有竞争力; 在 2030 年左右, 则在几乎整个电力市场上都具有竞争力; 联合国专家组针对世界光伏技术和产业的发展作了更详细的分析和预测[9], 结果更为乐观: 2005~2015 年发电成本在 0.045~0.091 美元/(kW·h) 之间, 在相当大的市场上开始具有竞争力; 2015 年后, 发电成本低于 0.045 美元/(kW·h), 则在几乎整个电力市场上都具有竞争力。

3.2 太阳能热利用技术

3.2.1 热水器

太阳能热水器是我国太阳能利用中应用最广泛、产业化发展最迅速的领域, 1979~1998 年期间平均年增长率 35%。1987 通过引进铜铝复合吸热板技术并与我国自选研制成功的铝阳极化选择性吸收涂层技术相结合, 使我国太阳能热水器产业进入现代化生产阶段。80 年代后期, 我国先后研制成功全玻璃和热管式真空管集热器并实现了产业化。1998 年全国热水器产量约 400 万 m², 总安装量约 1400 万 m², 占世界第 1 位。

我国目前太阳能热水器产业已处在商业化良性运作时期,绝大部份热水器企业都有良好的经济效益。目前我国有上千个热水器生产厂家,年安装量约 1 400 万 m²,占世界第 1 位。但户用比例仅 3%,与日本和以色列等国家相比,差距很大。到 2010 年,我国人口约 14 亿,热水器户用比例如果能达到 10%,平均户用面积也将有所增加,热水器总安装量将达到 1 亿 m²。亚太银行专家对我国太阳能热水器的利用给出估计:10%的住宅安装太阳能热水器(2m²/户),热水负荷的 75%由太阳能供给,每年可节约 310 亿 kW·h 电(相当于 1 050 万 t 标煤),相当于减排 3 850 万 t CO₂,说明太阳能热水器的经济、环境和社会效益非常好。

3.2.2 太阳能建筑

我国 70 年代开始被动太阳年采暖建筑的研究开发和示范,至今已抗议约 1 000 万 m²(建筑面积)。目前被动太阳房开始由群体建筑向住宅小区发展,如甘肃省临夏市建成占地 9.8hm²、建筑面积 9.2 万 m²的太阳能小区;兰州“阳光计划”投资 4.28 亿在郊区兴建 73.3 万 m²太阳能住宅小区等。我国被动太阳房采暖节能 60%~70%,平均每 m²建筑面积每年可节约 20~40kg 标准煤,发挥着良好的经济产社会效益,但在技术水平上同国外还有相当大的差距。

21 世纪应组织建筑师和太阳能专家联合攻关,解决太阳能技术与建筑的集成技术,使太阳能采暖和热水器真正纳入建筑的集成技术,使太阳能采暖和热水器真正纳入建筑设计标准和规范,参照以色列作法,通过强制性政策法规,逐步实现民用建筑必须有太阳能设计才可批准施工。争取在 2010 年和 2030 年分别实现民用建筑太阳房达到 10%和 30%,其社会、经济、环境效益将十分可观。

3.2.3 太阳能热发电

我国太阳能热发电技术的研究开发工作始于 70 年代末,担由于工艺、材料、部件及相关技术未得到根本解决,加上经费不足,热发电项目先后停止;国家“八

五计划安排了小型部件和材料的攻关项目，带有技术储备性质，目前还没有试验机，与国外差距很大。我国热发电与国外差距很大。考虑到国内外的技术现状作粗略预测，在 2000~2010 期间进行 MW 级样机研制及示范，2010~2030 期间进行 10~100MW 级商业性示范，2030~2050 期间进行 1 000MW 级商业化推广应用。

4. 政策措施建议

(1) 结合我国实际情况制定鼓励可再生能源利用的政策法规。(2) 鼓励产业发展，积极开拓市场。为使太阳能在 21 世纪中叶成为后续能源之一，必须从现在起，加大投入，通过产业化技术攻关、消化吸收等，使我国光伏制造产业在技术水平、市场规模、自动化程度、原材料国产化程度方面赶上国际先进水平；通过激励政策，积极鼓励大型企业参与太阳能光伏技术的产业活动。通过市场激励政策促进消费，开发边远地区光伏市场。(3) 结合“西部大开发战略”，把太阳能列入重点建设项目。作好西部地区全面利用太阳能的规划及实施措施，将太阳能作为这些地区的后续替代能源。(4) 加大基础性应用研究投入，如新型薄膜太阳能电池、太阳能基础材料、光谱选择性吸收薄膜和其它光谱反射、透过功能薄膜等，为未来大幅度降低太阳能利用能量成本奠定基础。

中国光伏发电产业与市场

中国于 1958 年开始研制太阳电池，1959 年第一块有实用价值的太阳电池诞生。1971 年 3 月首次应用太阳电池作为科学实验卫星的电源，开始了太阳电池的空间应用。1973 年首次在天津港的浮标灯上进行太阳电池供电试验，开始了太阳电他的地面应用。

1. 产业及产品

经过 40 年的努力，中国光伏发电产业已具有一定的基础。到 1998 年底，已建成 6 个初具规模的光伏电池

专业生产厂，光伏电池组件的年生产能力为 4. 5MW，其中：单晶硅电池 2. 5MW，非晶硅电池 2MW。

中国主要光伏电池厂的情况列于表 1。

中国光伏电他的主要产品是单晶硅电池和非晶硅电池，多晶硅电池只有少量的中试产品。单晶硅电池主要是直径 100mm 的圆片，商品组件的转换效率为 11%—13%，由 36 片电池串联成的组件的功率为 37W，左右。个别工厂可以生产 100mmX100mm 的准方片单晶硅电池，但受现有设备条件的限制和在成本上的考虑，未进行正式生产。商品非晶硅光伏电池组件的最大面积为 305mm×915mm，转换效率为 5%—6%，功率为 11—12Wp，为单结 p-i-n 电池。多晶硅光伏电池组件中试产品的转换效率为 10%—11%。

1998 年中国光伏电池组件的产量为 2.3MW，其中：单晶硅光伏电池组件为 1.8MW，非晶硅光伏电池组件为 0.5MW。1998 年从国外进口单晶硅光伏电池及组件约 200kw。

1998 年中国单晶硅光伏电池组件的售价为 40—45 元 / Wp，非晶硅光伏电池组件的售价为 24—26 元 / Wp。

2. 研究与开发

中国光伏发电的研究开发工作，经过几十年的努力取得了不小的成就。有关研究单位、高等院校、工厂企业先后开展了单晶硅和多晶硅高效电池、非晶硅薄膜电池、CdTe 薄膜电池、CIS 薄膜电池、多晶硅薄膜电池以及应用系统关键设备的研究开发。

近年来，在国家科技部和北京市的支持下，国家新能源工程中心和北京市太阳能光电中心取得一些可喜的研究成果。单晶硅高效电池效率达到 19.79%，大面积 6cm×5cm 刻槽埋栅单晶硅电池效率达到 18.6%，多晶硅电池效率达到 13.5%，10cm×10cm 多晶硅电他效率达到 11.8%；在多晶硅薄膜电池方面，采用快速热 CVD 技术在非活性衬底上制备的多晶硅薄膜电池效率达到 12.11%，采用 pECVD 技术制备的微晶硅 / 非晶硅迭层薄膜电池效率达到 9.5%。

在光伏发电的平衡系统方面，也取得了不小的进步。“八五”期间，开发出了独立光伏发电系统用的 15kW 和 30kw 的正弦波 DC—AC 逆变器，逆变效率大于 90%；“九五”期间，在国家科技部的安排下，又开展了 kW 级并网逆变器的研究与开发，研制出了一系列光伏专用的控制器和检测仪器。

在光伏水泵系统、通信光伏电源系统、独立光伏电站、输油输气管道阴极保护

光伏电源系统、家用光伏电源系统、光 / 风互补发电系统等系统技术方面，也取得了不少研究成果和工程经验。

3. 应用与市场

中国光伏电池的在地面应用始于 1973 年。26 年来，系统技术不断提高，应用项目不断增多，市场不断扩大。1980 年以前，应用项目有限，功率很小，光伏电池年销售量不超过 10kw。由于电池价格昂贵，1985 年以前，主要是作为航标灯、铁路信号灯、气象台站观测仪表、电围栏、小型通信机、黑光灯、直流照明灯、割胶灯等的电源，功率不大。这是我国光伏发电市场应用的初级阶段。这一时期，在原国家科委的支持下，进行了一些对于今后市场开拓具有指导意义的示范工程，如太阳能无人值守微波中继站、小型太阳能充电站、农村载波电话光伏电源系统、石油管道和水库闸门阴极保护太阳能电源系统等。80 年代后期，随着几条光伏电池生产线的引进，光伏电池价格下降，产量提高，应用领域不断开辟，市场逐渐拓展。90 年代以来，改革开放的大好形势，为光伏发电的广泛应用和市场开拓创造了有利条件，光伏电池已不再是仅仅作为小功率电源来使用，而是扩展到通信、交通、石油、气象、国防、农村电气化以及民用等国民经济的不同应用领域，光伏电池用量每年以 20% 以上的速率递增。到 1998 年底，中国光伏电池的累计用量已达 13.2MW。

值得一提的应用项目有：（1）建成了 40 多座县、乡级小型光伏电站，光伏电池总装机容量约 600kW，其中以西藏为最多，达 426kW；以 1998 年 10 月建成的西藏那曲安多县光伏电站的光伏电池装机容量为最大，达 100kW。（2）家用光伏电源在青海、内蒙古、新疆、甘肃、宁夏、西藏以及辽宁、吉林、河北、海南的部分地区和四川的阿坝州等地已进入较广泛地推广应用阶段。据不完全统计，至今全国已累计推广应用家用光伏电源约 15 万台，光伏电池总功率约达 2.9MW。

（3）在 22 所农村学校建立了光伏电站，光伏电池组件的总装机容量为 57kW。

（4）1998 年在中国通信史上建设难度最大的兰—西—拉光缆干线工程中，有 26 个光缆通信站采用光伏电池作电源，其海拔高度多在 4500m 以上，光伏电池组件的总功率达 100kW。（5）1996 年建成了塔中 4—轮南输油输气管道阴极保护光伏电源系统，光伏电池组件总功率为 40kW。该系统横贯塔克拉玛干大沙漠，总长达 300km，工程环境恶劣复杂。（6）在 1995 年 62 个国家重点援藏项目之一

的西藏广播电视发射接收工程中，采用光伏电池供电。在西藏自治区建区 30 年大庆之前，共建 216 套卫视接收站光伏电源供电系统和 118 套调频发射站光伏电池供电系统，光伏电池组件总功率为 56kw。

表 2 列出了中国光伏电池历年的产量、价格和累计用量。

4. 存在的主要问题

从总体上来讲，中国的光伏发电产业，与国外发达国家相比还有很大差距，存在的主要问题是：

(1) 生产规模小。目前的 4 个单晶硅光伏电池生产厂，基本上保持在 1987—1990 年引进时的生产规模和技术工艺水平。各厂在引进时都称年生产能力为 1MW，但各厂都在不同的工艺环节上存在着“瓶颈”，因此：实际年生产能力都在 0.5MW 左右，所以中国晶体硅光伏电池的全国总计年生产能力仅为 2MW。1998 年中、国单晶硅光伏电池组件的年产量为 1.8MW，仅占世界光伏电池总产量的 1.14%。生产的规模化程度，比国外的 5—20Mw 的生产规模低一个数量级。

(2) 技术水平较低。目前中国商品单晶硅光伏电池组件的光电转换效率多在 11%—12% 之间；组件的封装水平较低，有的组件经过 3—5 年的使用有发黄、起泡、焊线脱落、效率下降等现象；组件的实际使用寿命，也不如国外产品。至今尚无多晶硅光伏电池的生产工厂。非晶硅光伏电池厂只能生产单结电池，稳定性较差，转换效率较低，尚不能生产双结和三结电池。

(3) 平衡设备薄弱落后。光伏发电用的控制器、逆变器等关键平衡设备，至今尚无具有一定规模的、拥有较先进生产和检测设备的专业工厂生产，仅在几个研究所等单位有小量的生产，技术性能不够高，可靠性较低，品种规格少，价格也高，更谈不上研究开发更先进的产品。

(4) 专用材料的国产化程度不高。银浆、低铁钢化玻璃、PVF 等关键封装材料尚未真正实现国产化。国家曾把专用材料的国产化列入“八五”攻关计划，虽然取得了一定成果，但性能仍然不如国外产品，各生产厂为保证产品质量，目前许多专用材料仍然依靠从国外进口。

(5) 成本、价格高。目前晶体硅光伏电池组件的生产成本约为 26—30 元/W_p，平均售价约为 40—45 元/W_p，成本和售价均高于国外产品，在国际市场上缺乏竞争力。

5. 规划和设想

中国地域辽阔，人口众多，电网难以覆盖的无电地区面积大、人口多，许多特殊领域需要采用光伏发电供电，光伏发电的潜在市场十分巨大。面对这样一个将被开发的巨大市场，中国政府和光伏界，必须采取有力措施，加大投入力度，加快中国光伏发电技术的发展和产业建设，以占领这个广阔巨大的应用市场。

(1) 1995 年 11 月，国家计委、国家科委、国家经贸委制定并颁布了“1996—2010 年中国新能源和可再生能源发展纲要”。“纲要”把光伏发电技术的开发利用作为发展的重点之一。提出：特别要在太阳电池组件和配套的技术装备方面加强研究开发，努力降低系统造价；在 2000 年前，完成西藏 9 个无电县独立光伏电站的建设，大力推广应用小功率光伏电源系统，建立分散型和集中型 MW 级联网光伏示范电站。并提出了提高认识加强领导、制定优惠政策、加强科研和示范、加强产业建设、开展国际合作引进国际先进技术和资金等对策和措施。

为组织实施“纲要”，制定了“中国新能源和可再生能源发展优先项目”。项目中的第二项为光伏技术，内容包括两大方面：(1) 发展高效低成本太阳电池，建立一条年生产能力为 MW 级的生产线。(2) 建立 MW 级多晶硅太阳电池组件生产线，要求组件效率达 13%，组件寿命 20—25 年；对单晶硅太阳电池组件生产线进行技术改造，要求组件效率达 14%—15%，组件寿命 20—25 年。在光伏应用方面，“项目”要求实现小功率光伏电源的产业化，100kW 容量以下独立光伏电站系列化、规范化和商品化，研究并网光伏发电技术，为大规模应用做好前期准备。同时开展高扬程光伏水泵的研制。

(2) 1996 年国家电力部提出“1996—2020 年太阳能发电发展规划设想”。该设想内容：①采用家用光伏电源系统解决 150 万户无电农牧民的供电问题。②在 1996—2000 年期间，每年建设 50 座县、乡对才用小型光伏电站，平均每座规模为 10kW，到 2000 年建成的总装机容量为 2.5MW；在 2001—2020 年期间，除继续在居住相对集中的无电地区建设光伏电站外，还可发展

城市小规模并网或独立运行的光伏电站，平均每年建设 50 座，平均每座规模为 30kW，到 2020 年建成的总装机容量为 30MW，③到 2000 年末，建设 2 座容量 500kW 并网运行的大型光伏电站；在 2001 — 2020 年期间，建成 5 座容量各 1MW 并网运行的大型光伏电站，为电网提供补充电力。同时提出了为实现这一设想在研究开发、产业建设、政策措施等方面的建议。

(3) 1996 年国家计委制订了“中国光明工程”实施计划草案。计划到 2010 年利用小型风力发电、太阳能光伏发电和各种新能源互补发电系统，使 2300 万农村无电人口用上电，使他们人均拥有发电容量 100W。其首期目标是：解决 800 万无电人口（约 178 万户）、2000 个无电村及 100 个微波站、100 个边防哨所的基本用电问题。初步计算，为实现这一目标约需小型风力发电机组 87.3 万台，光伏电池组件 105.7MW。

6. 未来应用市场估计

21 世纪世界能源将发生巨大的变革，以资源有限、污染严重的化石能源为主的能源结构，将逐步转变为以资源无限、清洁干净的可再生能源为主的多样化、复合型的能源结构。但在 21 世纪的前 30 — 40 年，世界能源仍将以化石能源为基石，不包括水能在内的可再生能源在世界能源构成中的比重，虽会有所上升，但仍将不会很大。这是因为，一场能源结构的重大变革绝非一日之功，是一个由量变到质变的渐进过程，至少需要百年以上的时间。根据中国政府关于经济与发展的远景目标，参照世界光伏市场发展的总趋势，对中国未来 12 年（1999 — 2010 年）的光伏应用市场作如下初步估计。

市场估计和价格估计是建立在以下技术预测基础上的：①晶体硅光伏电池在 2010 年前仍然是光伏技术的主角，但将向高效率、低成本的方向大步前进；②薄膜光伏电池是 21 世纪中叶以后的主力电池，前景看好，在 2010 的前后可望有重大突破，逐步投入商业化生产，并应用于光伏并网发电和光伏屋顶发电等领域；③控制器、逆变器等关键平衡设备将向高可靠、高效率、智能化、低成本的方向发展，并取得重大进展；④将研制开发出更适合光伏发电用的长寿命、低成本、免维护的蓄电池；⑤系统集成技术将更加科学化、规范化、智能化、综合化。

6.1 非联网系统应用市场估计

中国目前的光伏发电系统均为非联网光伏发电系统（通常所说的独立光伏发电系统）。估计在今后 12 年，即从 1999 — 2010 年，中国的非联网光伏发电系统的光伏电池装机容量，将会以大于 20% 的速度逐年递增，参见表 3，这个估计与下面的分项估计不是相加的关系，分项估计将大于这个总估计。

6. 1. 1 农村及农村电气化

(1) 市场估计

估计到 1998 年底，中国至少还会有约 1400 多万户、6000 多万农牧业人口仍然未用上电。在这些人口中，有相当一部分居住在西北五省、区以及内蒙古、西藏、云南、海南、四川阿坝州等太阳能资源丰富或比较丰富的地区，具有利用光伏发电解决其基本生活用电和少部分生产用电的自然资源条件。下面仅根据国家关于农村电气化的总要求及有关部门、有关省区关于农村电气化的规划和设想，对农村及农村电气化方面的光伏市场作一初步估计，参见表 4。

上述估算，包括独立光伏电站、家用光伏电源和光伏水泵等。在 1999 — 2000 年的市场需求量中，包括了世界银行及荷兰壳牌家用光伏电源系统项目中光伏电源的安装容量。

由于中国农牧民尚很贫困，就是到 2010 年，许多边远山区、高原的农牧民也仍然不会十分富裕。所以，在估算中，家用光伏电源的安装功率，在 2000 年前多按每户 20 — 50W 计，在 2001 — 2010 年多按每户 50 — 100W 计。

上述估算考虑了有关省、区的规划和预测。内蒙古对该区近期的光伏市场作了预测：2 — 10kW 的村落光伏发电系统的需求量约为 5001000 座，家用光伏电源的需求量约为 30 万套，共计约需光伏电池 20MW 以上。甘肃的规划目标是：“九五”期间共安装家用光伏电源 10 万户，2001 — 2010 年期间共安装家用光伏电源 14 万户。新疆的规划目标是：“九五”，期间安装 2 — 3 万套家用光伏电源，在牧区建设 500 座光伏电站和 3 个镇照明、电视光伏电源系统，青海省电力局在其“1995 — 2010 年的电力扶贫共富工程”中规划，安装家用光伏电源 7.5 万套、计 1.4Mw，并建设县、乡光伏集中供电系统 340kw。

(2) 价格估计

(a) 家用光伏电源系统

以目前应用最多的 20W 直流家用光伏电源系统为例作一粗略剖析。

家用光伏电源系统目前的平均售价为 1800 元，即平均每峰瓦系统为 90 元，其中光伏电池组件为 840 元，占整个系统售价约 50%，而其降价的潜力最大，估计可由现在的 42 元 / W_p 左右，到 2000 年降至 35 元 / W_p 左右，到 2005 年降至 30 元 / W_p 左右，到 2010 年降至 20 元 / W_p 左右。这样，家用光伏电源系统的售价，就可由现在的 90 元 / W_p，在 2000 年降低到 75 — 80 元 / W_p，在 2005 年降低到 60 — 70 元 / W_p，在 2010 年降低到 50 — 55 元 / W_p。随着农牧民经济收入的增加，常规电力价格的不断上涨，家用光伏电源系统的售价又以这样大的幅度逐年下降，农牧民是有能力购买家用光伏电源的，其市场将会逐年扩大。

(b) 独立光伏电站

目前，在一般地区，光伏电站的系统造价为 90 — 100 元 / W_p；在西藏等交通极其不便的高海拔地区，光伏电站的系统造价为 120 — 130 元 / W_p。其中，光伏电池组件的价格占整个系统造价约 45%—50%。如果光伏电池的售价以上述的速度降低，那么光伏发电的系统造价到 2010 年降低到 6 元 / W_p 以下，是完全可能的。这样，光伏电站的发电成本就可比柴油机发电便宜；比综合计算的常规能源发电厂的发电成本仅高几倍，在一些特定地区就具有了竞争力。

(c) 光伏水泵系统

目前光伏水泵系统售价为 70 元 / W_p，其中：光伏电池组件及支架约为 45 元 / W_p，占 64%；机泵、逆变器及潜水电缆等约为 25 元 / W_p，占 36%，按照上述光伏电池逐年降价的估计，到 2010 年光伏水泵系统的售价降低到 40 — 45 元 / W_p，是完全可能的。这样，光伏水泵系统的市场需求量，就将会成数倍的增长。

6. 1. 2 通信

(1) 市场估计

估计 1998 年中国在通信电源方面应用的光伏电池组件大约有 0.8MW。

通信业是国民经济的基础产业，随着国民经济的快速发展，通信业的发展速度也必将十分快速。我们估计，应用于通信业的光伏电池组件，在今后 12 年，前 7 年将以每年 10% 的速度递增，后 5 年将以每年 5% 的速度递增，参见表 5。主

要应用于光缆通信、微波通信、农村通信、卫视接收站等方面。

(2) 价格估计

通信光伏电源的价格，包括光伏电池、蓄电池、控制器等在内的平均系统价，目前约为 80—90 元/W_p。我们估计，到 2005 年可望降到 65—70 元/W_p，到 2010 年可望降到 55—60 元/W_p。

6. 1. 3 其它工业领域

(1) 市场估计

主要包括铁路及公路信号电源、航标及灯塔电源、气象台站电源、地震测报台站电源、管道阴极保护电源、森林防火系统电源、公路道班电源、边防哨所电源、公路标志电源等。这些工业领域对光伏电源的需求量，按照占整个光伏市场总量的 20% 计，基期的 1998 年为 0.40MW，2000 年为 0.58MW，2005 年为 1.44MW，2010 年为 3.57MW。

其中光伏电池在海水淡化、电动车、工业备用电源、制氢等方面的应用将是很值得大力开发的项目，应用前景广阔；管道阴极保护、公路标志及道班、铁路信号等方面对光伏电源的需求量，将会有比较大的增长。

(2) 价格估计

目前的平均系统价格为 85—90 元/W_p，估计 2005 年有可能降到 65—70 元/W_p，2010 年有可能降到 50—55 元/W_p。

6. 1. 4 民用商品及其它

(1) 市场估计

主要包括太阳帽、太阳能充电器、太阳能计算器、太阳能手表、太阳能钟、太阳能路灯、太阳能庭院灯、太阳能玩具、太阳能广告灯箱、太阳能汽车、太阳能游艇、太阳能半导体冷藏箱等。

按照占整个光伏市场总量的 10% 计，基期的 1998 年为 0.20MW，2000 年为 0.29MW，2005 年为 0.72MW，2010 年为 1.8MW。

其中太阳能路灯、太阳能玩具、太阳能庭院灯、太阳能广告牌等项目的需求量，将会有较大幅度的增长。

(2) 价格估计

估计到 2005 年的平均系统价格可降为 60—70 元 / W_p , 2010 年可降为 45—50 元 / W_p 。

6. 2 联网系统应用市场估计

联网发电系统是光伏技术步入大规模发电阶段、成为电力工业组成部分之一的重大技术步骤,是当今世界光伏发电的发展趋势。联网发电系统,可分为直接并入电网的联网系统和与建筑相结合的即屋顶联网系统等类。在光伏联网发电系统方面,中国目前尚处于蕴酿阶段,还无应用实例。应该采取措施,筹措资金,于 1999 年开始建设 2—3 处 10kW 级的光伏联网发电系统,以宣传示范,总结经验,完善技术。

6. 2. 1 联网发电

(1) 市场估计

随着光伏发电系统造价的大幅度降低,常规能源发电综合成本的不断上升,环境保护要求的日益严格,联网发电系统的的市场需求将不断扩大。估计,在 2000 年建设光伏电他装机容量共计为 1MW 的光伏联网发电系统 3—4 座;到 2005 年建成光伏电池装机容量共计为 5MW 的光伏联网发电系统 5—8 座;到 2010 年建成光伏电池装机容量共计为 15MW 的光伏联网发电系统 15—20 座。

(2) 价格估计

由于联网发电系统所发的电力直接并入电网,省掉了贮能的蓄电池组,因而其造价一般来说会比独立光伏发电系统要低 15%—20%左右。2000 年的系统造价为 65—70 元 / W_p , 2005 年为 50—60 元 / W_p , 2010 年将降到 40—45 元 / W_p 。

6. 2. 2 屋顶发电

(1) 市场估计

光伏发电与建筑相结合,构成光伏屋顶发电系统,近年来在国外发展甚快,前景诱人,市场广阔。其特点是:与电网并联,可以完全省掉或大部分省掉蓄电池;通过巧妙地设计,可以降低建筑造价,从而也就降低了光伏发电系统的造价;适合于因地、因户制宜的分散用电;可对电网起一定的调节作用等。

在 2000 年建设 2—3kW 的光伏屋顶发电系统 40 套,共计安装光伏电池 80—120kW;到 2005 年建成 2—4kW 的光伏屋顶发电系统 10000 套,共计安装光伏电池 20000—40000kW;到 2010 年建成 2—5kW 的光伏屋顶发电系统 200000 套,

共计安装光伏电池 400000 — 1000000kW。

(2) 价格估计

2000 年的系统价格为 60 — 70 元 / W_p ，2005 年的系统价格为 50 — 55 元 / W_p ，2010 年的系统价格为 40 — 45 元 / W_p 。

7. 关于中国光伏发电产业化发展的建议

为促进和加快中国光伏发电产业化发展进程，借鉴国外经验，从中国现状和实际出发，提出如下建议：

第一，建议国家制定规划、计划，采取有力措施，加大投资力度，并制定和实行一系列的优惠政策，来支持和扶植中国光伏发电产业化发展。

光伏发电技术是新能源技术的重要组成部分，是正在发展着的高新技术，是把世界能源从以资源有限、污染严重的化石能源为基础的轨道上转换到以资源无限、清洁干净的可再生能源为基础的轨道上来的能源革命的重要方面军。因此，世界各国，特别是发达国家，都十分重视，纷纷制定规划，采取措施，投入巨额资金，积极发展。世界各国的实践说明，光伏发电技术的发展和产业化，离不开政府的扶持。政府的扶持是光伏发电技术发展和产业化的强大动力。把一个新兴的、正在发展着的高新技术一下子就彻底地推入市场，而国家不给予必要的扶植和支持，是不现实的：它是很难快速而健康地成长起来的。美国、日本、德国等发达国家，为了促进和加快光伏发电技术等新能源技术的发展和产业化，一方面是制定国家级的规划、计划，采取有力措施组织实施，并投入巨额资金对重要课题组织力量进行研究开发；另一方面则是对光伏企业在一定时期内实行减免税收等的优惠政策，对用户购买光伏设备在一定时期内给予补贴和贷款的优惠政策等，以刺激和鼓励

公众使用光伏设备。在印度等发展中国家，政府也同样制定有发展光伏发电技术的规划，并投入了不小的研究开发和试验示范资金，并出台了与上述各国相类似的扶植和鼓励的一系优惠政策 / p 度的光伏发电技术所以发展快，走在发展中国家的前列，政府的扶植是重要的原因。中国虽然也有粗线条的规划，也有一些扶持和鼓励的优惠政策，有些省和自治区对农村的光伏应用也有一定的地方财政上的补贴，但总的来说，规划粗放，不具体，资金不落实，很难操作实施；用于研究开发和试验示范的资金投入少，使用分散，力度不够；对光伏企业的优惠政策

少得可怜，而且不系统、不规范；鼓励用户应用的补贴和贷款等优惠政策不完善、不规范，已有的也是不连续、数额小。为此，建议：

(1) 在国务院领导下，成立一个统一的、有权威的全国新能源技术发展和产业化领导小组，负责全国新能源技术的规划编制、政策制定、组织协调、资金筹措和分配、重大课题和工程的安排等。这样，就可把国家计委、国家经贸委、科技部、农业部、国家电力公司等部门的力量统一起来，变成合力。

(2) 在三委“纲要”的基础上，尽快制定一个具体的、可操作的 1999 — 2005 年的光伏发电技术发展和产业化的 7 年计划。应做到：有目标，有项目，有内容，有要求，有资金来源，有措施，可以操作。

(3) 通过“S-863 计划”、“火炬计划”、“重大科技项目攻关计划”、“基础科学研究计划”，“国家自然科学基金”等，对光伏发电技术发展及其产业化给予更多、更大支持，列入更多研究课题和试验示范项目。

(4) 通过“双加工程”等技改资金，对光伏企业的技术改造项目给予低息、贴息等优惠贷款上的支持。

(5) 建议国家对生产光伏产品的企业，在增值税和所得税的征收上，制定一个在一定时间内给予免税和减税的优惠政策，以扶持其发展。

(6) 建议国家制定一个对无电贫困地区广大农牧民为解决其最低生活用电而购买的光伏电源设备给予一定数量或比例补贴的办法，以刺激他们采用光伏设备，使广大无电农牧业户早日用上电。补贴资金，可以设想从国家扶贫基金和电力扶贫共富工程资金中解决。

(7) 光伏发电技术走向产业化大规模应用的一个重要发展趋势，是与电网并联和与建筑相结合。为促使中国光伏发电技术尽快跟上这一前景广阔的商业化大规模应用的趋势，建议国家投入一定数量的资金安排一些示范工程项目，以取得经验和完善技术。对一定时期内的并网光伏发电工程和与建筑相结合的光伏发电工程，国家应给予 40%—50% 的补贴，以刺激应用，调动有关方面和用户的积极性。

第二，建立光伏发电技术发展及产业化基金。

为加快中国光伏发电技术发展及产业化进程，筹措一笔可用的发展资金是重要

的一环。参照国内外经验，建议采用在每千瓦时用电中加价：厘钱的办法建立“中国光伏发电技术发展及产业化基金”，有计划、有重点的使用，滚动发展。按2000年发电量14000亿kWh计，每年可筹集基金14亿元，5年可筹集基金70亿元。

第三，宣传教育，科学普及）让广大人民群众了解光伏发电技术，动员广大人民群众投入光伏发电技术的推广应用。

建议广泛利用电视、电影、广播、互联网、报纸、杂志、书籍等各种宣传教育和科学普及的媒体以及学校教育等形式，宣传利用光伏发电技术的意义，普及光伏发电知识，让广大人民群众、特别是青少年，关心光伏发电技术，懂得光伏发电技术的基本知识，动员广大人民群众都来关心光伏事业、投入光伏事业。有广大人民群众、特别是青少年的了解、关心、支持和参与的事业，必将兴旺发达。

第四，进一步建立健全光伏发电技术的基本标准、规范和技术要求，强化对于光伏发电系统及部件的质量检测和技术监督，严格光伏市场的监督管理。

这是光伏发电技术产业化发展的重要技术措施和管理保证。目前的现状是：（1）基本标准、规范和技术要求不健全、不配套，已有的一些也未得到严格、认真地贯彻执行；（2）生产光伏电池组件的企业及生产配套蓄电他的企业，虽然都有较为完备的产品检测制度和办法，但有的企业贯彻执行不够严格认真，而在一些小型的蓄电池生产厂则不是缺乏严格的产品检测制度和办法，就是对于质量的控制很不认真、很不严格；（3）多数控制器、逆变器的生产单位，规模小，检测仪器设备不齐、不多，缺乏严格的技术工艺规程和检测办法，质量控制不严格，以致进入市场的若干产品故障频繁、可靠性不高；（4）进入市场的少数光伏产品，无商标，无铭牌，无完备的产品说明书和安装使用手册，甚至有假冒伪劣产品流入市场，鱼龙混杂，败坏了光伏产品的声誉。因此，必须尽快进一步建立健全光伏发电技术最基本的标准、规范和技术要求；必须下大力气强化光伏系统及其部件的企业内部的检测制度和对于产品质量的严格监控，在企业外部则应建立几个全国性的具有权威的产品检测中心，进行质量认证；必须严格规范和净化光伏市场，设法堵住假冒伪劣产品流入，使光伏发电技术的产业化发展健康而有序地前进。

第五，建议通过多种形式组建几个光伏企业集团，形成规模优势，大幅度降低产品成本，占领和开拓更广、更大市场。

现有的光伏电池生产企业，规模小，技术经济实力弱，生产设备陈旧、老化、不平衡，生产成本较高，很难适应国际光伏市场激烈竞争的形势。建议采取多种形式组建几个具有 3—5MW 以上光伏电池生产能力的、高起点的、具有较强技术经济实力的、既生产光伏器件又生产光伏应用系统的大型光伏企业集团，以形成规模优势，大幅度降低产品的成本。所谓多种形式，就是以现有的光伏电池生产企业为基础，采取或由大企业集团兼并，或由大企业集团投资控股，或与外国大型光伏企业合作、合资，或由国内几家相关光伏企业联合、改组等形式来组建具有一定规模的大型光伏企业集团，以形成规模优势，进而转变为经济优势。

第六，多渠道、多形式的广泛开展光伏技术的国际合作和技术交流，以加快和促进中国光伏发电技术的提高和产业化发展进程。这是一个投入少、见效快的好办法，应充分加以利用。

多渠道、多形式的利用国际组织、外国政府、外国公司的经济、技术援助，开展光伏应用的试验示范工程等，对开拓中国的光伏应用领域和市场，促进中国光伏技术的产业化发展，十分有利，应解放思想，积极利用。

返回 11

12. 国内外太阳能电池和光伏发电的进展与前景

引言

开发新能源和可再生清洁能源是二十一世纪世界经济发展中最具决定性影响的五项技术领域之一。充分开发利用太阳能是世界各国政府可持续发展的能源战略决策，其中阳光发电则最受瞩目。太阳光发电远期将大规模应用，近期可解决特殊应用领域的需要。到 2030 年光伏发电在世界总发电量中将占到 5—20%。太阳能电池发电独具许多优点，如安全可靠，无噪声，无污染，能量随处可得，不受地域限制，无需消耗燃料，无机械转动部件，故障率低，维护简便，可以无人值守，建设周期短，规模大小随意，无需架设输电线路，可以方便地与建筑物相结合等。这些优点都是常规发电和其它发电方式所不及的。

1. 国际太阳电池和光伏发电的进展

近几年国际上光伏发电快速发展，美国、欧洲及日本制定了庞大的光伏发电发展计划，1997 年美国 and 欧洲相继宣布“百万屋顶光伏计划”，日本 1997 年补贴“屋顶光伏计划”的经费为 9200 万美元。美国计划到 2010 年安装 1000~3000MW 太阳电池，日本的目标是 7600Mw。印度计划 1998—2002 年太阳电池总产量为 150MW，其中 2002 年为 50MW。国际光伏市场开始由边远农村和特殊应用向并网发电和与建筑结合供电的方向发展，光伏发电已由补充能源向替代能源过渡。表 1 和表 2 列出了近年来世界太阳电池组件的生产和发货量以及主要国家所占的比例。

表 1 世界太阳电池组件发货量 (Mw)

国际上许多发达国家的政府都重视光伏技术的研究与发展，其 1996 年的经费分配情况见表 3。实验室各种太阳电池的最高效率列于表 4，但这种高效电池往往是采用高成本的精密工艺来达到的，未必能简单地推广应用到生产上。

国际上目前很难确定那一种太阳电池是最佳选择。虽然目前晶体硅电他销量最大，但大家公认今后薄膜电池最具有潜力；另外，不同电他的特性各不相同，在光伏市场中各有其不同的应用领域，例如非晶硅电池主要应用在商用电子方面，多晶硅电池主要用于光伏屋顶，单晶硅电池主要在高功率应用上。最近几年国际上对多晶硅薄膜电他的研究较活跃，但采用哪种工艺方案较佳，尚难断定。近几年有机纳米太阳电他的效率有较大提高，受到一定的关注。在锗片上用 MOCVD 法制作砷化镓空间太阳电池取得进展。

美国国家光伏发电计划的总目标是使其在国家的经济中具有明显的作用。1997年光伏计划指标是：2000年光伏发电的电费（并网）达到12—15美分/kWh，光伏发电系统价格为3—7美元/w，组件效率为10—20%。

光伏产品在国际上的四个主要市场：消费性产品（14%）；离开电网的居民供电系统（35%）；离开电网的工业供电系统（33%），并网光伏系统（18%）。

发达国家近几年来主要开拓的市场是屋顶式并网发电系统。其原因是发达国家的电网分布已很密集，并网发电不用蓄电池，电网峰值用电的电费高，阳光好的地区采用光伏发电的电价已接近商品电价（估计在2000年到2005年进入成本合算期），人们预测10年后屋顶并网发电系统将大规模推广应用。

并网光伏发电系统应用始于80年代初，美国、日本、德国、意大利都为此作出了努力，当时建造的都是较大型的光伏并网电站，规模从100kw到1MW不等，而且都是政府投资建设的试验性电站。但试验结果并不十分理想，由于当时太阳能电池很贵，很难让电力公司接受。

自90年代以来，国外发达国家重新掀起了发展并网光伏系统的高潮，这次的努力不是建造大型并网光伏电站，而是发展屋顶光伏并网系统，屋顶光伏系统充分利用了阳光的分散性特点，将太阳能电池安装在现成的屋顶上，其灵活性和经济性都大大优于大型并网光伏电站，受到了各国的重视。

1993年，德国首先开始实施由政府投资支持，被电力公司认可的1000屋顶计划，继而扩展为2000屋顶计划，现在实际建成的屋顶光伏并网系统已经超过5000。这些屋顶并网系统均不带蓄电池，属于不可派送的发电系统，电力公司对光伏并网系统发出的电予以收购，大大刺激了这一领域的商业性发展和技术上的完善。德国政府于1999年1月开始实施10万太阳能屋顶（每户约3kW—5kW）计划，今后几年内需要300MW—500MW太阳能电池。1999年先推广6000套，共18MW，政府给用户37.5%的补助及10年的无息贷款。由此可以看出德国政府在推广光伏屋顶系统上的决心。

日本在光伏发电与建筑结合方面已经有十几年的努力，尤其在1996年以后更是突飞猛进，每年新建的光伏屋顶达几万套。日本光伏屋顶的发展有一个特点，他们将太阳能电池组件制作成建筑材料的形式，如瓦和玻璃等，这样太阳能电池就容

易安装在建筑物上，也很容易被建筑公司接受。

80年代初，美国就已经开始了并网光伏发电的努力，制定了 PVUSA 计划，即光伏电力规模的应用计划，主要是建立 100kW 以上的大型并网光伏发电系统，最大的系统计划达 10MW，但是由于成本高，电力不可调度，不受电力公司欢迎。

1996 年，在美国能源部的支持下，又开始了一项称为“光伏建筑物计划（PV — BONUS）”，计划投资 20 亿美元。美国目前电力的 2 / 3 用于包括为民用住宅在内的各类建筑物供电，该计划的目标是采用光伏发电缓解建筑物的峰值负荷，并探求未来清洁的建筑物供电途径。此项计划将有助于开发新型的光伏建筑材料，包括玻璃、天窗、墙体等，有助于开发光伏屋顶模块和可由电力部门很容易安装的光伏调峰电力模块等。计划分为三步实施：概念开发，产品开发和市场开发。这项计划的内容很丰富，其中典型的开发项目包括：

（1）DsM 系统（按需求安排发电的系统），即带有蓄电他的电力可以调度的光伏发电系统。这种并网系统在今后四年内仅在美国国内就会有 300MW 的市场。目前这种系统的发电成本为 40 美分 / kWh，而美国某些地区的峰值电价已高达 20 — 30 美分 / kWh（一般冬季电价为 3 — 4 美分 / kWh，夏季 7 — 8 美分 / kWh）。估计不久这类调峰系统即可进入市场。

（2）太阳热水器和非晶硅太阳电池联合构成的光伏、光热系统，可以为用户同时提供电力和热水。由于非晶硅太阳电池不象晶体硅太阳电池那样，当温度升高后输出功率会降低，所以特别适合于这种系统。

（3）光伏屋顶建筑材料（柔性的和非柔性的），如透明光伏玻璃，聚光电池供电、供水系统，光伏墙体，光伏智能窗帘等。

1997 年，美国总统宣布了百万屋顶计划，即到 2010 年美国将在美国国内建造 100 万座太阳能屋顶，包括供热和供电。这一计划有 3 个目的：（1）计划完成后每年减排的二氧化碳相当于 850000 辆汽车的排放量；（2）可以增加 70000 个高技术就业机会；（3）通过这一计划，将大大加强美国光伏工业在世界上的领先地位和竞争实力。

其它一些发达国家也都有类似的光伏屋顶并网发电项目或计划，如荷兰、瑞士、芬兰、奥地利、英国、加拿大等。

除了光伏屋顶系统，国外发达国家还在其它光伏应用方面也作了大量工作，主要有：

(i) 风光柴互补发电系统：为了进一步降低可再生能源的发电成本，国外在风光柴混合发电系统上作了大量的示范工作和经济对比。NRE1。还开发了混合发电系统的优化软件，它可用于根据当地资源设计最合理最经济的供电方案。

(2) 未来与汽车配套的发电系统：光伏发电系统在汽车行业有很大的潜在市场，国外已经开发出较成功的可以为电动汽车蓄电池充电的太阳能快速充电系统，太阳能汽车空调板，太阳能汽车换气扇，太阳能空调和冷饮箱等。

(3) 太阳能制氢加燃料电池的再生发电系统：芬兰的 NAPs 已经完成这一发电系统的示范。太阳电池将太阳能转变成电能，通过电解他电解水，产生氢气和氧气，氧气排放到空气中，氢气储存到储氢罐中。使用时氢气再与空气中的氧气通过燃料电池发电，氢气和氧气在发电过程中又化合成水。该系统属于最清洁的再生能源发电系统，在未来具有巨大的市场，尤其对于冬夏太阳能辐射差异很大，采用蓄电池极不经济的高纬度地区，通过这种办法利用太阳能将会十分有效，此外，随着电动汽车的发展，这一发电系统也会变得更为重要。

(4) 再生能源海岛供电系统：海岛是一个特殊的环境，由于其淡水的缺乏，燃料的昂贵，使得可再生能源有了用武之地。国外已经对海岛上应用风光柴混合发电系统作了大量示范，为海岛供应电力和淡水。此外，由于岛上渔民需要用冰来储存和运送新鲜的鱼虾，海岛的可再生能源制冰系统也得到了推广。

(5) 太阳能发电专用直流负载：为了提高光伏发电系统效率，减少故障环节，国外开发了许多不需要采用逆变器、可以直接由太阳电池和蓄电池供电的直流负载，包括直流电视机、直流电冰箱、直流空调等，这类专用负载特别适合于车辆、船只和流动性的单位，如旅游团、地质队、部队等。

2. 中国太阳电池和光伏发电的进展

我国于 1958 年开始太阳电池的研究，1971 年成功地首次应用于我国发射的第二颗卫星上，1973 年开始地面应用。1979 年开始用半导体工业的次品硅生产单晶硅太阳电池，使太阳电池成本明显下降，打开了地面应用的市场。当时太阳电池面积小，采用真空蒸镀银铝的方法制作太阳电池的电极。80 年代中期，

引进国外太阳能电池生产线或关键设备，使我国太阳能电池生产能力达到 4.5MW。单晶硅太阳能电池采用攀网印刷工艺制作电极，明显地提高了生产效率。

我国进行光伏研究与开发的单位约有 38 个。目前正在研究的项目包括：实用单晶硅太阳能电池，高效单晶硅太阳能电池，多晶硅太阳能电池，非晶硅太阳能电池，砷化镓太阳能电池，空间用的硅太阳能电池及其系统，铜钢锡及硫化镉化合物薄膜太阳能电池；硅聚光太阳能电池系统；光伏系统应用方面有：水泵、逆变器、控制器、太阳能灯等。对一些太阳能电池专用材料国产化也开展了研究。

2. 1 太阳能电池与材料的研究

我国太阳能电池达到的最高效率列于表 5。

在多晶硅太阳能电池方面，发展了单向凝固法铸锭，铸锭重 15kg，尺寸为 220mmX220mmX140mm，铸锭用的石墨柑涡或方形石英柑涡，可重复使用。

在实用型电池工艺方面，研究采用在丝网印刷工艺中加入具有钝化作用的氧化膜方法，来提高电池性能，建立了一条 30cmX30cm 的非晶硅太阳能电池中试线及一条 20cmX20cm 的科研线，所有设备均为国产。

开发的 p-i-n 非晶硅单结太阳能电池，组件的稳定效率达到 6%。除了使用玻璃作基片的常规非晶硅太阳能电池，主耐温塑料片上制作的柔性非晶硅太阳能电池也已开发成功。

近期高效太阳能电池的研究相当活跃。发射极钝化的硅太阳能电池最高效率达到 19.79%；采用的高效化工艺包括：发射区钝化，分区轻 (n+) 重 (n++) 扩散，背场，表面织构化。实验室用多晶硅薄膜太阳能电池研究设备已经建立。稳定型 M1S 结构的硅太阳能电池也在进行研究。

空间用硅太阳能电池大面积化的研究正在进行，目标是研制出 8cm×8cm 及 10cm×10cm 面积的空间用高质量太阳能电池。GaAs 太阳能电池外延生长法的研究已有相当基础，最近的重点转向在诸片上用 MOCVD 的方法生长 GaAs 膜，制作空间用 GaAs 电池。

对旋铸法直接制作硅片进行了初步研究。在该方法中硅料是使用冷柑涡电磁感应熔炼法来提供的。小硅球太阳能电池组件也在我国进行了探索性的研究，掌握了基本的制作方法。

铜钢锡太阳电池最近采用蒸镀及硒化方法制备 C1S 膜取得进展, 5cm×6cm 面积的电池效率达到 6.7%。

对太阳电池用封装材料也进行了研制, 包括 EVA 膜及 PVF 复合膜。其中 EVA 膜基本能满足我国光伏工业的需求, 快速固化 EVA 膜还需要改进。PVF 复合膜还需要进行较大的改进。丝网印刷用的浆料也进行了国产化, 其中铝浆已能取代进口材料, 正面电极用的银浆性能略逊于进口产品。

低倍聚光的小型光伏系统进行了生产性的研究; 高倍聚光的光伏系统有一家公司引进国外技术进行生产, 但许多技术性的问题需要进一步研究解决。

我国第 9 个五年光伏攻关计划的研究目标为: 工厂生产的 10cm×10cm 单晶硅太阳电池的效率达到 14-15%; 多晶硅太阳电他达到 12-13%, 铸出 100kg 级的铸锭; 化合物薄膜太阳电他的效率达到 10%, 多晶硅薄膜电他的效率也是要达到 810%; 弱光型非晶硅太阳池的合格率太子 70%, 稳定效率达到 8%, 功率型大面积非晶硅太阳电池稳定效率达到 7%。

2.2 太阳电池生产

我国太阳电他的主要产品是单晶硅太阳电池及非晶硅太阳电池, 多晶硅太阳电他只有少量中试产品。单晶硅太阳电池产品主要是直径为 100mm 的圆片电池, 效率为 12—13%, 36 片太阳电池串联的组件功率约为 37W。少数工厂生产 100mm×100mm 准方片太阳电池, 但未进行正式生产, 只有北京有色金属研究总院中试线生产准方片单晶硅太阳电池。非晶硅太阳电他的组件面积为 30cm×120cm。转换效率为 4—6%, 为单结 p-n 太阳电池。

我国太阳电池组件的年生产能力为 4.5MW, 其中晶体硅太阳电池为 2.5MW, 非晶硅太阳电池 2MW。1998 年太阳电他组件销售量为 2.1MW, 其中晶体硅太阳电池 1.8MW, 非晶硅太阳电池 0.3MW, 进口单晶硅太阳电池或组件约 200kW。1998 年我国太阳电池用单晶硅片的出口为 1MW。

2.3 光伏应用

我国光伏应用进行了许多研究, 开发了各种光伏系统的控制器及逆变器, 研制的逆变器最大达 20kW, 光伏水泵已形成一定生产能力。各种太阳能灯具已推广应用。1—5kW 级并网逆变器已开始结合实际需要进行研制。

我国光伏发电在地面应用始于 1973 年，用于为天津港航标灯供电。截止到 1998 年底，我国太阳电池的累计用量已经达到 13.3MW。由于光伏发电价格高，不含土建和输电线路的小型光伏系统的造价每峰瓦约 60—80 元，含土建和输电线路的独立光伏电站系统的造价每峰瓦约 80—120 元，大规模应用尚受一定的限制。目前我国光伏发电以特殊应用领域和边远地区为主。

2.4 国际合作

由于我国光伏发电市场的潜力大，光伏项目又具有环保及扶贫双重作用，经常成为国际间的合作与援助优选项目。早期有与德国合作项目北京大兴县多晶硅太阳电池及水泵示范工程，日本在甘肃省的 10kW 光伏示范工程，欧共体在浙江省大陈岛的光伏示范工程。近期有德国在中国的黄金计划光伏工程，美国能源部在甘肃省及内蒙古的户用光伏项目，日本 NEDO 机构的光伏工程。这些合作项目对推动我国光伏应用都起到了积极作用。

正在进行或即将进行的项目有 1999 年开始的世界银行全球环境基金的 2500 万美元赠款的 5 年光伏计划，5 年内将在西北地区推广 10MW 户用光伏系统。荷兰政府将为新疆提供 1500 万美元赠货，新疆地方出资相当于：千万美元，实施新疆丝绸之路光明工程计划（5 年），推广应用总数为 7.8 万套户用光伏系统。联合国开发计划署与国家经贸委合作，计划在山东大管岛和浙江北龙岛建立 60—100kW 的风光互补发电系统，为海岛军民供电；另外计划在西北推广 200 套小型风光互补发电系统，每套功率在 150—500W 左右。世界银行与教育部合作，计划在云南省和海南省建立 13 所太阳能学校，每校光伏发电功率 1kW 左右。世界银行还与卫生部合作，在 7 个省开展乡级卫生院改建计划）用可再生能源为乡级卫生院提供采暖、热水和电力，其中约有几百所卫生院将采用太阳电池供电。

3. 光伏发电的前景

目前，国际上光伏发电已进入加速发展阶段，近两年太阳电池组件的年增长率高达 30% 左右，世界上 1998 年宣布的扩产计划有 263.5MW / 年，发展势头强劲。另外，发达国家先后宣布的太阳能屋顶计划强有力地支持了光伏产业的发展，预计今后 10 年内太阳电池将以平均 20% 的年增长率增长。估计我国也将以此速度增长，单晶硅、多晶硅及非晶硅太阳电池将在今后 20 年内各占相当市场，

硅带及硅厚膜电池在今后 10 年将逐渐扩大生产，CdTe 及 C1S 电池会扩大到一定的产量。多晶硅薄膜及染料光敏化电池目前预测其产量还为时过早。以现有的基础来看，单晶硅、多晶硅及非晶硅太阳电池仍是我国目前产业化发展的主要产品。

世界光伏工业从 1980 年到 1997 年以 20% 的年增长率增长，到 2010 年太阳电池产量达 1600MW，以 2 美元 / w 的组件批发价计算，年产值将达到 30 亿美元。欧共体能源部门发表的光伏应用各领域的分布情况示于表 6。

表 6 国际光伏工业发货中主要应用领域的分布及 2010 年预测 (%)

我国目前尚有约 2000 万户、6000—7000 万农村人口还没有用上电，60% 的有电县严重缺电，光伏市场潜力巨大。我国光伏系统成本每年下降约 3—5%，2000—2005 年，我国户用光伏系统的用量将大幅度增长，预计总量将达到 20MW。预计在 5 年内我国也将有几个 2—5Mw 年生产能力的太阳电池工厂建立或扩建而成，2005 年后将出现年产 10Mw 的生产线。通讯及工业用光伏系统将从目前的 40—50% 的市场份额到 2010 年下降到 20—30%，户用及民用光伏系统将从目前的 30% 上升到 40—50%，预计到 2010 年我国也将开始发展并网式屋顶光伏系统，但预计其系统功率将为发达国家的 V4，市场份额将不超过 5%，但在 2020 年后并网系统将会得到大量发展。

4. 我国光伏产业发展的障碍与对策

(1) 我国发展光伏产业的主要障碍与国际上一样，仍然是太阳电池的成本高，限制大量推广应用。因此，我国研究与发展经费投入应针对太阳电池降价这一主要目标。同时，我国太阳电池工厂主要采用引进设备及其附带的技术，太阳电池研究工作要适应这一特点，研究单位与光伏工厂间的技术转移工作应加强，以提高企业的技术水平。

(2) 由于资金有限，光伏产业发展要适当安排与引导，一方面要让投资者对光伏产业的特性有更多的了解，以进行合理的投资。另一方面对合资建厂、引进技术、支持国内发展等都应进行均衡的考虑。10 年内我国光伏市场以年增 30% 进行规划是可行的，但处于微利经营状态，应加强宣传，使得各方面及潜在的支持者了解光伏产业所具有的重大长期效益及近期效益，增强投资者的信心。

(3) 应加强光伏技术队伍的建设，为人才成长创造必要的条件。各级政府应支持对光伏科研单位及企业应予以支持。

(4) 在发展太阳电池的品种上, 晶体硅太阳电池属于马上能得到应用并可存在相当长时间的产品, 应作为主要产品。同时重点发展多晶硅电池, 尽快在我国建成有相当规模的多晶硅太阳电池生产线。我国非晶硅太阳电池已有一定基础, 应给予相当的重视。应加速单晶硅太阳电池、非晶硅太阳电池产业的技术改造和技术革新, 大幅度提高太阳电池产量和质量, 同时减少消耗、降低成本, 使国产电池价格和国际价格相当。非晶硅电池方面需要较大的投资, 才能将目前单结电池生产线改建成三结电池生产线, 稳定性才能提高。SiS、多晶硅薄膜、CdTe、有机纳米太阳电池等, 有的在国际上发展前景尚未定论, 有的在我国基础太薄弱, 虽然具有潜力, 但不能盲目, 应投入一定的经费进行探索性研究, 密切注意国际上发展动向。

(5) 建议在国务院统一领导下, 由国家综合部门牵头, 约请有关部委参加, 建立新能源领导小组, 拟定统一的新能源规划, 克服某些分散混乱现象, 使我国光伏发电技术与产业逐步走入快速有序的发展轨道。主管新能源的政府官员及光伏界人士应共同关注各种重大发展机会, 包括科技攻关、重大基础研究项目(973计划)、超级 863 科研计划、双加工程、重大科技成果产业化计划等, 共同配合做好可行性论证工作, 争取在经费上对光伏发电项目的支持。

(6) 制定促进光伏发电的优惠政策。让从事光伏发电的企事业单位享受高新技术产业的优惠政策。对其产品按照小水电的税率征收增值税或采取类似的措施。为促进老、少、边、穷地区推广光伏发电技术, 提倡由当地政府根据情况向购买光伏发电产品的农户提供一定的费用补贴。

(7) 重视“光伏发电”学科点建设和人才培养。建议在有条件的院校建立光伏发电培训试验中心, 以培养出一大批能胜任发展需要的中高级光伏发电专业技术人才和管理人才。

(8) 加强光伏发电知识的普及与宣传。依靠基层政府部门、中小学和农村供销社等多种渠道开拓无电和缺电地区的光伏发电市场, 并建立售后服务体系。进行边远农牧区银行或农村信用社给光伏用户进行信贷的试点工作。

(9) 应增强我国光伏产品在世界上的竞争力。当务之急是, 晶体硅电他的效率应迅速提高到国际水平, 生产出 10cmX10cm 准方片太阳电池, 成本降低到与进口太阳电池组件相当。 返回 11

13. 20 世纪太阳能科技发展的回顾与展望

据记载，人类利用太阳能已有 3000 多年的历史。将太阳能作为一种能源和动力加以利用，只有 300 多年的历史。真正将太阳能作为“近期急需的补充能源”，“未来能源结构的基础”，则是近来的事。20 世纪 70 年代以来，太阳能科技突飞猛进，太阳能利用日新月异。回顾和总结本世纪太阳能科技发展的历程，对 21 世纪太阳能事业的发展十分有意义，本文对此作了尝试。

1. 历史回顾

近代太阳能利用历史可以从 1615 年法国工程师所罗门·德·考克斯在世界上发明第一台太阳能驱动的发动机算起。该发明是一台利用太阳能加热空气使其膨胀作功而抽水的机器。在 1615 年-1900 年之间，世界上又研制成多台太阳能动力装置和一些其它太阳能装置。这些动力装置几乎全部采用聚光方式采集阳光，发动机功率不大，工质主要是水蒸汽，价格昂贵，实用价值不大，大部分为太阳能爱好者个人研究制造。20 世纪的 100 年间，太阳能科技发展历史大体可分为七个阶段，下面分别予以介绍。

1. 1 第一阶段 1900-1920

在这一阶段，世界上太阳能研究的重点仍是太阳能动力装置，但采用的聚光方式多样化，且开始采用平板集热器和低沸点工质，装置逐渐扩大，最大输出功率达 73.64kW，实用目的比较明确，造价仍然很高。建造的典型装置有：1901 年，在美国加州建成一台太阳能抽水装置，采用截头圆锥聚光器，功率：7.36kW；1902-1908 年，在美国建造了五套双循环太阳能发动机，采用平板集热器和低沸点工质；1913 年，在埃及开罗以南建成一台由 5 个抛物槽镜组成的太阳能水泵，每个长 62.5m，宽 4m，总采光面积达 1250m²。

1. 2 第二阶段（1920-1945）

在这 20 多年中，太阳能研究工作处于低潮，参加研究工作的人数和研究项目大为减少，其原因与矿物燃料的大量开发利用和发生第二次世界（1935-1945）有关，而太阳能又不能解决当时对能源的急需，因此使太阳能研究工作逐渐受到冷落。

1. 3 第三阶段（1945-1965）

在第二次世界大战结束后的 20 年中，一些有远见的人士已经注意到石油和天然气资源正在迅速减少，呼吁人们重视这一问题，从而逐渐推动了太阳能研究工作的恢复和开展，并且成立太阳能学术组织，举办学术交流和展览会，再次兴起太阳能研究热潮。在这一阶段，太阳能研究工作取得一些重大进展，比较突出的有：1955 年，以色列泰伯等在第一次国际太阳热科学会议上提出选择性涂层的基础理论，并研制成实用的黑镍等选择性涂层，为高效集热器的发展创造了条件；1954 年，美国贝尔实验室研制成实用型硅太阳电池，为光伏发电大规模应用奠定了基础。

此外，在这一阶段里还有其它一些重要成果，比较突出的有：1952 年，法国国家研究中心在比利牛斯山东部建成一座功率为 50kW 的太阳炉。1960 年，在美国佛罗里达建成世界上第一套用平板集热器供热的氨-水吸收式空调系统，制冷能力为 5 冷吨。1961 年，一台带有石英窗的斯特林发动机问世。在这一阶段里，加强了太阳能基础理论和基础材料的研究，取得了如太阳选择性涂层和硅太阳电池等技术上的重大突破。平板集热器有了很大的发展，技术上逐渐成熟。太阳能吸收式空调的研究取得进展，建成一批实验性太阳房。对难度较大的斯特林发动机和塔式太阳能热发电技术进行了初步研究。

1. 4 第四阶段(1965-1973)

这一阶段，太阳能的研究工作停滞不前，主要原因是太阳能利用技术处于成长阶段，尚不成熟，并且投资大，效果不理想，难以与常规能源竞争，因而得不到公众、企业和政府的重视和支持。

1. 5 第五阶段（1973-1980）

自从石油在世界能源结构中担当主角之后，石油就成了左右经济和决定一个国家生死存亡、发展和衰退的关键因素，1973 年 10 月爆发中东战争，石油输出国组织采取石油减产、提价等办法，支持中东人民的斗争，维护本国的利益。其结果是使那些依靠从中东地区大量进口廉价石油的国家，在经济上遭到沉重打击。于是，西方一些人惊呼：世界发生了“能源危机”（有的称“石油危机”）。这次“危机”在客观上使人们认识到：现有的能源结构必须彻底改变，应加速向未来能源结构过渡。从而使许多国家，尤其是工业发达国家，重新加强了对太阳能及其它可再生能源技术发展的支持，在世界上再次兴起了开发利用太阳能热

潮。1973年，美国制定了政府级阳光发电计划，太阳能研究经费大幅度增长，并且成立太阳能开发银行，促进太阳能产品的商业化。日本在1974年公布了政府制定的“阳光计划”，其中太阳能的研究开发项目有：太阳房、工业太阳能系统、太阳热发电、太阳电他生产系统、分散型和大型光伏发电系统等。为实施这一计划，日本政府投入了大量人力、物力和财力。

70年代初世界上出现的开发利用太阳能热潮，对我国也产生了巨大影响。一些有远见的科技人员，纷纷投身太阳能事业，积极向政府有关部门提建议，出书办刊，介绍国际上太阳能利用动态；在农村推广应用太阳灶，在城市研制开发太阳热水器，空间用的太阳电池开始在地面应用……。1975年，在河南安阳召开“全国第一次太阳能利用工作经验交流大会”，进一步推动了我国太阳能事业的发展。这次会议之后，太阳能研究和推广工作纳入了我国政府计划，获得了专项经费和物资支持。一些大学和科研院所，纷纷设立太阳能课题组和研究室，有的地方开始筹建太阳能研究所。当时，我国也兴起了开发利用太阳能的热潮。

这一时期，太阳能开发利用工作处于前所未有的大发展时期，具有以下特点：

(1) 各国加强了太阳能研究工作的计划性，不少国家制定了近期和远期阳光计划。开发利用太阳能成为政府行为，支持力度大大加强。国际间的合作十分活跃，一些第三世界国家开始积极参与太阳能开发利用工作。

(2) 研究领域不断扩大，研究工作日益深入，取得一批较大成果，如CPC、真空集热管、非晶硅太阳能电池、光解水制氢、太阳能热发电等。

(3) 各国制定的太阳能发展计划，普遍存在要求过高、过急问题，对实施过程中的困难估计不足，希望在较短的时间内取代矿物能源，实现大规模利用太阳能。例如，美国曾计划在1985年建造一座小型太阳能示范卫星电站，1995年建成一座500万kW空间太阳能电站。事实上，这一计划后来进行了调整，至今空间太阳能电站还未升空。

(4) 太阳热水器、太阳电他等产品开始实现商业化，太阳能产业初步建立，但规模较小，经济效益尚不理想

1.6 第六阶段（1980-1992）

70年代兴起的开发利用太阳能热潮，进入80年代后不久开始落潮，逐渐进入低谷。世界上许多国家相继大幅度削减太阳能研究经费，其中美国最为突出。

导致这种现象的主要原因是：世界石油价格大幅度回落，而太阳能产品价格居高不下，缺乏竞争力；太阳能技术没有重大突破，提高效率和降低成本的目标没有实现，以致动摇了一些人开发利用太阳能的信心；核电发展较快，对太阳能的发展起到了一定的抑制作用。受 80 年代国际上太阳能低落的影响，我国太阳能研究工作也受到一定程度的削弱，有人甚至提出：太阳能利用投资大、效果差、贮能难、占地广，认为太阳能是未来能源，主张外国研究成功后我国引进技术。虽然，持这种观点的人是少数，但十分有害，对我国太阳能事业的发展造成不良影响。

这一阶段，虽然太阳能开发研究经费大幅度削减，但研究工作并未中断，有的项目还进展较大，而且促使人们认真地去审视以往的计划和制定的目标，调整研究工作重点，争取以较少的投入取得较大的成果。

1.7 第七阶段（1992- 至今）

由于大量燃烧矿物能源，造成了全球性的环境污染和生态破坏，对人类的生存和发展构成威胁。在这样背景下，1992 年联合国在巴西召开“世界环境与发展大会”，会议通过了《里约热内卢环境与发展宣言》，《21 世纪议程》和《联合国气候变化框架公约》等一系列重要文件，把环境与发展纳入统一的框架，确立了可持续发展的模式。这次会议之后，世界各国加强了清洁能源技术的开发，将利用太阳能与环境保护结合在一起，使太阳能利用工作走出低谷，逐渐得到加强。

世界环发大会之后，我国政府对环境与发展十分重视，提出 10 条对策和措施，明确要“因地制宜地开发和推广太阳能、风能、地热能、潮汐能、生物质能等清洁能源”，制定了《中国 21 世纪议程》，进一步明确了太阳能重点发展项目。1995 年国家计委、国家科委和国家经贸委制定了《新能源和可再生能源发展纲要》（1996- 2010），明确提出我国在 1996-2010 年新能源和可再生能源的发展目标、任务以及相应的对策和措施。这些文件的制定和实施，对进一步推动我国太阳能事业发挥了重要作用。

1996 年，联合国在津巴布韦召开“世界太阳能高峰会议”，会后发表了《哈拉雷太阳能与持续发展宣言》，会上讨论了《世界太阳能 10 年行动计划》（1996- 2005），《国际太阳能公约》，《世界太阳能战略规划》等重要文件。

这次会议进一步表明了联合国和世界各国对开发太阳能的坚定决心，要求全球共同行动，广泛利用太阳能。

1992年以后，世界太阳能利用又进入一个发展期，其特点是：太阳能利用与世界可持续发展和环境保护紧密结合，全球共同行动，为实现世界太阳能发展战略而努力；太阳能发展目标明确，重点突出，措施得力，有利于克服以往忽冷忽热、过热过急的弊端，保证太阳能事业的长期发展；在加大太阳能研究开发力度的同时，注意科技成果转化为生产力，发展太阳能产业，加速商业化进程，扩大太阳能利用领域和规模，经济效益逐渐提高；国际太阳能领域的合作空前活跃，规模扩大，效果明显。

通过以上回顾可知，在本世纪100年间太阳能发展道路并不平坦，一般每次高潮期后都会出现低潮期，处于低潮的时间大约有45年。太阳能利用的发展历程与煤、石油、核能完全不同，人们对其认识差别大，反复多，发展时间长。这一方面说明太阳能开发难度大，短时间内很难实现大规模利用；另一方面也说明太阳能利用还受矿物能源供应，政治和战争等因素的影响，发展道路比较曲折。尽管如此，从总体来看，20世纪取得的太阳能科技进步仍比以往任何一个世纪都大。

2. 太阳能科技进步

太阳能利用涉及的技术问题很多，但根据太阳能的特点，具有共性的技术主要有四项，即太阳能采集、太阳能转换、太阳能贮存和太阳能传输，将这些技术与其它相关技术结合在一起，便能进行太阳能的实际利用。

2.1 太阳能采集

太阳辐射的能流密度低，在利用太阳能时为了获得足够的能量，或者为了提高温度，必须采用一定的技术和装置（集热器），对太阳能进行采集。集热器按是否聚光，可以划分为聚光集热器和非聚光集热器两大类。非聚光集热器（平板集热器，真空管集热器）能够利用太阳辐射中的直射辐射和散射辐射集热温度较低；聚光集热器能将阳光会聚在面积较小的吸热面上，可获得较高温度，但只能利用直射辐射，且需要跟踪太阳。

2.1.1 平板集热器

历史上早期出现的太阳能装置，主要为太阳能动力装置，大部分采用聚光集热器，只有少数采用平板集热器。平板集热器是在 17 世纪后期发明的，但直至 1960 年以后才真正进行深入研究和规模化应用。在太阳能低温利用领域，平板集热器的技术经济性能远比聚光集热器好。为了提高效率，降低成本，或者为了满足特定的使用要求，开发研制了许多种平板集热器：

按工质划分有空气集热器和液体集热器，目前大量使用的是液体集热器；

按吸热板芯材料划分有钢板铁管、全铜、全铝、铜铝复合、不锈钢、塑料及其它非金属集热器等；

按结构划分有管板式、扁盒式、管翅式、热管翅片式、蛇形管式集热器，还有带平面反射镜集热器和逆平板集热器等；

按盖板划分有单层或多层玻璃、玻璃钢或高分子透明材料、透明隔热材料集热器等。

目前，国内外使用比较普遍的是全铜集热器和铜铝复合集热器。铜翅和铜管的结合，国外一般采用高频焊，国内以往采用介质焊，1995 年我国也开发成功全铜高频焊集热器。1937 年从加拿大引进铜铝复合生产线，通过消化吸收，现在国内已建成十几条铜铝复合生产线。

为了减少集热器的热损失，可以采用中空玻璃、聚碳酸酯阳光板以及透明蜂窝等作为盖板材料，但这些材料价格较高，一时难以推广应用。

2. 1. 2 真空管集热器

为了减少平板集热器的热损，提高集热温度，国际上 70 年代研制成功真空集热管，其吸热体被封闭在高真空的玻璃真空管内，大大提高了热性能。将若干支真空集热管组装在一起，即构成真空管集热器，为了增加太阳光的采集量，有的在真空集热管的背部还加装了反光板。

真空集热管大体可分为全玻璃真空集热管，玻璃七型管真空集热管，玻璃。金属热管真空集热管，直通式真空集热管和贮热式真空集热管。最近，我国还研制成全玻璃热管真空集热管和新型全玻璃直通式真空集热管。

我国自 1978 年从美国引进全玻璃真空集热管的样管以来，经 20 多年的努力，我国已经建立了拥有自主知识产权的现代化全玻璃真空集热管的产业，用于

生产集热管的磁控溅射镀膜机在百台以上，产品质量达世界先进水平，产量雄居世界首位。

我国自 80 年代中期开始研制热管真空集热管，经过十几年的努力，攻克了热压封等许多技术难关，建立了拥有全部知识产权的热管真空管生产基地，产品质量达到世界先进水平，生产能力居世界首位。

目前，直通式真空集热管生产线正在加紧进行建设，产品即将投放市场。

2. 1. 3 聚光集热器

聚光集热器主要由聚光器、吸收器和跟踪系统三大部分组成。按照聚光原理区分，聚光集热器基本可分为反射聚光和折射聚光两大类，每一类中按照聚光器的不同又可分为若干种。为了满足太阳能利用的要求，简化跟踪机构，提高可靠性，降低成本，在本世纪研制开发的聚光集热器品种很多，但推广应用的数量远比平板集热器少，商业化程度也低。

在反射式聚光集热器中应用较多的是旋转抛物面镜聚光集热器（点聚焦）和槽形抛物面镜聚光集热器（线聚焦）。前者可以获得高温，但要进行二维跟踪；后者可以获得中温，只要进行一维跟踪。这两种聚光集热器在本世纪初就有应用，几十年来进行了许多改进，如提高反射面加工精度，研制高反射材料，开发高可靠性跟踪机构等，现在这两种抛物面镜聚光集热器完全能满足各种中、高温太阳能利用的要求，但由于造价高，限制了它们的广泛应用。

70 年代，国际上出现一种“复合抛物面镜聚光集热器”（CPC），它由二片槽形抛物面反射镜组成，不需要跟踪太阳，最多只需要随季节作稍许调整，便可聚光，获得较高的温度。其聚光比一般在 10 以下，当聚光比在 3 以下时可以固定安装，不作调整。当时，不少人对 CPC 评价很高，甚至认为是太阳能热利用技术的一次重大突破，预言将得到广泛应用。但几十年过去了，CPC 仍只是在少数示范工程中得到应用，并没有象平板集热器和真空管集热器那样大量使用。我国不少单位在七八十年代曾对 CPC 进行过研制，也有少量应用，但现

在基本都已停用。

其它反射式聚光器还有圆锥反射镜、球面反射镜、条形反射镜、斗式槽形反射镜、平面。抛物面镜聚光器等。此外，还有一种应用在塔式太阳能发电站的聚光镜—定日镜。定日镜由许多平面反射镜或曲面反射镜组成，在计算机控制下

这些反射镜将阳光都反射至同一吸收器上，吸收器可以达到很高的温度，获得很大的能量。

利用光的折射原理可以制成折射式聚光器，历史上曾有人在法国巴黎用两块透镜聚集阳光进行熔化金属的表演。有人利用一组透镜并辅以平面镜组装成太阳能高温炉。显然，玻璃透镜比较重，制造工艺复杂，造价高，很难做得很大。所以，折射式聚光器长期没有什么发展。70年代，国际上有人研制大型菲涅耳透镜，试图用于制作太阳能聚光集热器。菲涅耳透镜是平面化的聚光镜，重量轻，价格比较低，也有点聚焦和线聚焦之分，一般由有机玻璃或其它透明塑料制成，也有用玻璃制作的，主要用于聚光太阳电池发电系统。

我国从70年代直至90年代，对用于太阳能装置的菲涅耳透镜开展了研制。有人采用模压方法加工大面积的柔性透明塑料菲涅耳透镜，也有人采用组合成型刀具加工直径1.5m的点聚焦菲涅耳透镜，结果都不大理想。近来，有人采用模压方法加工线性玻璃菲涅耳透镜，但精度不够，尚需提高。

还有两种利用全反射原理设计的新型太阳能聚光器，虽然尚未获得实际应用，但具有一定启发性。一种是光导纤维聚光器，它由光导纤维透镜和与之相连的光导纤维组成，阳光通过光纤透镜聚焦后由光纤传至使用处。另一种是荧光聚光器，它实际上是一种添加荧光色素的透明板（一般为有机玻璃），可吸收太阳光中与荧光吸收带波长一致的部分，然后以比吸收带波长更长的发射带波长放出荧光。放出的荧光由于板和周围介质的差异，而在板内以全反射的方式导向平板的边缘面，其聚光比取决于平板面积和边缘面积之比，很容易达到10—100，这种平板对不同方向的入射光都能吸收，也能吸收散射光，不需要跟踪太阳。

2.2 太阳能转换

太阳能是一种辐射能，具有即时性，必须即时转换成其它形式能量才能利用和贮存。将太阳能转换成不同形式的能量需要不同的能量转换器，集热器通过吸收面可以将太阳能转换成热能，利用光伏效应太阳能电池可以将太阳能转换成电能，通过光合作用植物可以将太阳能转换成生物质能，等等。原则上，太阳能可以直接或间接转换成任何形式的能量，但转换次数越多，最终太阳能转换的效率便越低。

2.2.1 太阳能-热能转换

黑色吸收面吸收太阳辐射，可以将太阳能转换成热能，其吸收性能好，但辐射热损失大，所以黑色吸收面不是理想的太阳能吸收面。

选择性吸收面具有高的太阳吸收比和低的发射比，吸收太阳辐射的性能好，且辐射热损失小，是比较理想的太阳能吸收面。这种吸收面由选择性吸收材料制成，简称为选择性涂层。它是在本世纪 40 年代提出的，1955 年达到实用要求，70 年代以后研制成许多新型选择性涂层并进行批量生产和推广应用，目前已研制成上百种选择性涂层。

我国自 70 年代开始研制选择性涂层，取得了许多成果，并在太阳集热器上广泛使用，效果十分显著。

2. 2. 2 太阳能—电能转换

电能是一种高品位能量，利用、传输和分配都比较方便。将太阳能转换为电能是大规模利用太阳能的重要技术基础，世界各国都十分重视，其转换途径很多，有光电直接转换，有光热电间接转换等。这里重点介绍光电直接转换器件——太阳电池。

世界上，1941 年出现有关硅太阳电池报道，1954 年研制成效率达 6% 的单晶硅太阳电池，1958 年太阳电池应用于卫星供电。在 70 年代以前，由于太阳电池效率低，售价昂贵，主要应用在空间。70 年代以后，对太阳电池材料、结构和工艺进行了广泛研究，在提高效率和降低成本方面取得较大进展，地面应用规模逐渐扩大，但从大规模利用太阳能而言，与常规发电相比，成本仍然大高。

目前，世界上太阳电池的实验室效率最高水平为：单晶硅电池 24% (4cm²)，多晶硅电池 18.6% (4cm²)，InGaP / GaAs 双结电池 30.28% (AM1)，非晶硅电池 14.5% (初始)、12.8% (稳定)，碲化镉电池 15.8%，硅带电池 14.6%，二氧化钛有机纳米电池 10.96%。

我国于 1958 年开始太阳电池的研究，40 多年来取得不少成果。目前，我国太阳电池的实验室效率最高水平为：单晶硅电池 20.4% (2cm×2cm)，多晶硅电池 14.5% (2cm×2cm)、12% (10cm×10cm)，GaAs 电池 20.1% (1cm×cm)，GaAs / Ge 电池 19.5% (AM0)，CuInSe 电池 9% (1cm×1cm)，多晶硅薄膜电池 13.6% (1cm×1cm，非活性硅衬底)，非晶硅电池 8.6% (10cm

×10cm)、7.9% (20cm×20cm)、6.2% (30cm×30cm), 二氧化钛纳米有机
电池 10% (1cm×1cm)。

2.2.3 太阳能—氢能转换

氢能是一种高品位能源。太阳能可以通过分解水或其它途径转换成氢能,
即太阳能制氢,其主要方法如下:

1) 太阳能电解水制氢

电解水制氢是目前应用较广且比较成熟的方法,效率较高(75%-85%),
但耗电大,用常规电制氢,从能量利用而言得不偿失。所以,只有当太阳能发电
的成本大幅度下降后,才能实现大规模电解水制氢。

2) 太阳能热分解水制氢

将水或水蒸汽加热到 3000K 以上,水中的氢和氧便能分解。这种方法制氢
效率高,但需要高倍聚光器才能获得如此高的温度,一般不采用这种方法制氢。

3) 太阳能热化学循环制氢

为了降低太阳能直接热分解水制氢要求的高温,发展了一种热化学循环制
氢方法,即在水中加入一种或几种中间物,然后加热到较低温度,经历不同的反
应阶段,最终将水分解成氢和氧,而中间物不消耗,可循环使用。热化学循环分
解的温度大致为 900-1200K,这是普通旋转抛物面镜聚光器比较容易达到的温
度,其分解水的效率在 17.5%-75.5%。存在的主要问题是中间物的还原,即
使按 99.9%-99.99%还原,也还要作 0.1%-0.01%的补充,这将影响氢的价
格,并造成环境污染。

4) 太阳能光化学分解水制氢

这一制氢过程与上述热化学循环制氢有相似之处,在水中添加某种光敏物
质作催化剂,增加对阳光中长

波光能的吸收,利用光化学反应制氢。日本有人利用碘对光的敏感性,设计
了一套包括光化学、热电反应的综

合制氢流程,每小时可产氢 97 升,效率达 10%左右。

5) 太阳能光电化学电池分解水制氢

1972 年,日本本多健一等人利用 n 型二氧化钛半导体电极作阳极,而以
铂黑作阴极,制成太阳能光电化学电池,在太阳光照射下,阴极产生氢气,阳极

产生氧气，两电极用导线连接便有电流通过，即光电化学电池在太阳光的照射下同时实现了分解水制氢、制氧和获得电能。这一实验结果引起世界各国科学家高度重视，认为是太阳能技术上的一次突破。但是，光电化学电他制氢效率很低，仅 0.4%，只能吸收太阳光中的紫外光和近紫外光，且电极易受腐蚀，性能不稳定，所以至今尚未达到实用要求。

6) 太阳光络合催化分解水制氢

从 1972 年以来，科学家发现三联吡啶钌络合物的激发态具有电子转移能力，并从络合催化电荷转移反应，提出利用这一过程进行光解水制氢。这种络合物是一种催化剂，它的作用是吸收光能、产生电荷分离、电荷转移和集结，并通过一系列偶联过程，最终使水分解为氢和氧。络合催化分解水制氢尚不成熟，研究工作正在继续进行。

7) 生物光合作用制氢

40 多年前发现绿藻在无氧条件下，经太阳光照射可以放出氢气；十多年前又发现，兰绿藻等许多藻类在无氧环境中适应一段时间，在一定条件下都有光合放氢作用。

目前，由于对光合作用和藻类放氢机理了解还不够，藻类放氢的效率很低，要实现工程化产氢还有相当大的距离。据估计，如藻类光合作用产氢效率提高到 10%，则每天每平方米藻类可产氢 9 克分子，用 5 万平方公里接受的太阳能，通过光合放氢工程即可满足美国的全部燃料需要。

2. 2. 4 太阳能-生物质能转换

通过植物的光合作用，太阳能把二氧化碳和水合成有机物（生物质能）并放出氧气。光合作用是地球上最大规模转换太阳能的过程，现代人类所用燃料是远古和当今光合作用固定的太阳能，目前，光合作用机理尚不完全清楚，能量转换效率一般只有百分之几，今后对其机理的研究具有重大的理论意义和实际意义。

2. 2. 5 太阳能-机械能转换

20 世纪初，俄国物理学家实验证明光具有压力。20 年代，前苏联物理学家提出，利用在宇宙空间中巨大的太阳帆，在阳光的压力作用下可推动宇宙飞船

前进，将太阳能直接转换成机械能。科学家估计，在未来 10~20 年内，太阳帆设想可以实现。

通常，太阳能转换为机械能，需要通过中间过程进行间接转换。

2.3 太阳能贮存

地面上接受到的太阳能，受气候、昼夜、季节的影响，具有间断性和不稳定性。因此，太阳能贮存十分必要，尤其对于大规模利用太阳能更为必要。

太阳能不能直接贮存，必须转换成其它形式能量才能贮存。大容量、长时间、经济地贮存太阳能，在技术上比较困难。本世纪初建造的太阳能装置几乎都不考虑太阳能贮存问题，目前太阳能贮存技术也还未成熟，发展比较缓慢，研究工作有待加强。

2.3.1 太阳能贮热

(1) 显热贮存

利用材料的显热贮能是最简单的贮能方法。在实际应用中，水、沙、石子、土壤等都可作为贮能材料，其中水的比热容最大，应用较多。七八十年代曾有利用水和土壤进行跨季节贮存太阳能的报道。但材料显热较小，

贮能量受到一定限制。

(2) 潜热贮存

利用材料在相变时放出和吸入的潜热贮能，其贮能量大，且在温度不变情况下放热。

在太阳能低温贮存中常用含结晶水的盐类贮能，如 10 水硫酸钠 / 水氯化钙、12 水磷酸氢钠等。但在使用中要解决过冷和分层问题，以保证工作温度和使用寿命。

太阳能中温贮存温度一般在 100℃ 以上、500℃ 以下，通常在 300℃ 左右。适宜于中温贮存的材料有：高压热水、有机流体、共晶盐等。

太阳能高温贮存温度一般在 500℃ 以上，目前正在试验的材料有：金属钠、熔融盐等。

1000℃ 以上极高温贮存，可以采用氧化铝和氧化锆耐火球。

(3) 化学贮热

利用化学反应贮热，贮热量大，体积小，重量轻，化学反应产物可分离贮存，需要时才发生放热反应，贮存时间长。

真正能用于贮热的化学反应必须满足以下条件：反应可逆性好，无副反应；反应迅速；反应生成物易分离且能稳定贮存；反应物和生成物无毒、无腐蚀、无可燃性；反应热大，反应物价格低等，目前已筛选出一些化学

吸热

反应能基本满足上述条件，如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的热分解反应： $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 63.6\text{kJ} \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

放热

利用上述吸热反应贮存热能，用热时则通过放热反应释放热能。但是， $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在大气压脱水反应温度高于 500°C ，利用太阳能在这一温度下实现脱水十分困难，加入催化剂可降低反应温度，但仍相当高。所以，对化学反应贮存热能尚需进行深入研究，一时难以实用。

其它可用于贮热的化学反应还有金属氢化物的热分解反应、硫酸氢铵循环反应等。

(4) 塑晶贮热

1984年，美国在市场上推出一种塑晶家庭取暖材料。塑晶学名为新戊二醇（NPG），它和液晶相似，有晶体的三维周期性，但力学性质象塑料。它能在恒定温度下贮热和放热，但不是依*固-液相变贮热，而是通过塑晶分子构型发生固-固相变贮热。塑晶在恒温 44°C 时，白天吸收太阳能而贮存热能，晚上则放出白天贮存的热能。

美国对 NPG 的贮热性能和应用进行了广泛的研究，将塑晶熔化到玻璃和有机纤维墙板中可用于贮热，将调整配比后的塑晶加入玻璃和纤维制成的墙板中，能制冷降温。

我国对塑晶也开展了一些实验研究，但尚未实际应用。

(5) 太阳池贮热

太阳池是一种具有一定盐浓度梯度的盐水池，可用于采集和贮存太阳能。由于它简单、造价低和宜于大规模使用，引起人们的重视。60年代以后，许多国家对太阳池开展了研究，以色列还建成三座太阳池发电站。

70年代以后，我国对太阳池也开展了研究，初步得到一些应用。

2.3.2 电能贮存

电能贮存比热能贮存困难，常用的是蓄电池，正在研究开发的是超导贮能。

世界上铅酸蓄电池的发明已有100多年的历史，它利用化学能和电能的可逆转换，实现充电和放电。铅酸蓄电池价格较低，但使用寿命短，重量大，需要经常维护。近来开发成功少维护、免维护铅酸蓄电池，使其性能有一定提高。目前，与光伏发电系统配套的贮能装置，大部分为铅酸蓄电池。

1908年发明镍-铜、镍-铁碱性蓄电池，其使用维护方便，寿命长，重量轻，但价格较贵，一般在贮能量小的情况下使用。

现有的蓄电池贮能密度较低，难以满足大容量、长时间贮存电能的要求。新近开发的蓄电池有银锌电池、钾电池、钠硫电池等。

某些金属或合金在极低温度下成为超导体，理论上电能可以在一个超导无电阻的线圈内贮存无限长的时间。这种超导贮能不经过任何其它能量转换直接贮存电能，效率高，起动迅速，可以安装在任何地点，尤其是消费中心附近，不产生任何污染，但目前超导贮能在技术上尚不成熟，需要继续研究开发。

2.3.3 氢能贮存

氢可以大量、长时间贮存。它能以气相、液相、固相（氢化物）或化合物（如氨、甲醇等）形式贮存。

气相贮存：贮氢量少时，可以采用常压湿式气柜、高压容器贮存；大量贮存时，可以贮存在地下贮仓、由不漏水土层复盖的含水层、盐穴和人工洞穴内。

液相贮存：液氢具有较高的单位体积贮氢量，但蒸发损失大。将氢气转化为液氢需要进行氢的纯化和压缩，正氢-仲氢转化，最后进行液化。液氢生产过程复杂，成本高，目前主要用作火箭发动机燃料。

固相贮氢：利用金属氢化物固相贮氢，贮氢密度高，安全性好。目前，基本能满足固相贮氢要求的材料主要是稀土系合金和钛系合金。金属氢化物贮氢技术研究已有30余年历史，取得了不少成果，但仍有许多课题

有待研究解决。我国对金属氢化物贮氢技术进行了多年研究，取得一些成果，目前研究开发工作正在深入。

2. 3. 4 机械能贮存

太阳能转换为电能，推动电动水泵将低位水抽至高位，便能以位能的形式贮存太阳能；太阳能转换为热能，推动热机压缩空气，也能贮存太阳能。但在机械能贮存中最受人关注的是飞轮贮能。

早在 50 年代有人提出利用高速旋转的飞轮贮能设想，但一直没有突破性进展。近年来，由于高强度碳纤维和玻璃纤维的出现，用其制造的飞轮转速大大提高，增加了单位质量的动能贮量；电磁悬浮、超导磁浮技术的发展，结合真空技术，极大地降低了摩擦阻力和风力损耗；电力电子的新进展，使飞轮电机与系统的能量交换更加灵活。所以，近来飞轮技术已成为国际上研究热点，美国有 20 多个单位从事这项研究工作，已研制成贮能 20kWh 飞轮，正在研制 5MWh~100MWh 超导飞轮。我国已研制成贮能 0.3kWh 的小型实验飞轮。

在太阳能光伏发电系统中，飞轮可以代替蓄电池用于蓄电。

2. 4 太阳能传输

太阳能不象煤和石油一样用交通工具进行运输，而是应用光学原理，通过光的反射和折射进行直接传输，或者将太阳能转换成其它形式的能量进行间接传输。

直接传输适用于较短距离，基本上有三种方法：通过反射镜及其它光学元件组合，改变阳光的传播方向，达到用能地点；通过光导纤维，可以将入射在其一端的阳光传输到另一端，传输时光导纤维可任意弯曲；采用表面镀有高反射涂层的光导管，通过反射可以将阳光导入室内。

间接传输适用于各种不同距离。将太阳能转换为热能，通过热管可将太阳能传输到室内；将太阳能转换为氢能或其它载能化学材料，通过车辆或管道等可输送到用能地点；空间电站将太阳能转换为电能，通过微波或激光将电能传输到地面。

太阳能传输包含许多复杂的技术问题，应认真进行研究，这样才能更好地利用太阳能。

3. 太阳能利用

在过去的 100 年间，人们对各种太阳能利用方式进行了广泛的探索，逐步明确了发展方向，初步得到一些利用。70 年代以后，世界各国加大了对太阳能

研究开发的投入，太阳能热水、太阳能建筑、太阳能光伏发电等利用项目发展速度加快，规模逐渐扩大。但从总体而言，目前太阳能利用的规模还不大，技术尚不完善，商品化程度较低，需要继续努力。

3.1 太阳能热发电

太阳能热发电是太阳能利用中的重要项目，只要将太阳能聚集起来，加热工质，驱动汽轮发电机即能发电。1950年，原苏联设计了世界上第一座太阳能塔式电站，建造了一个小型试验装置。70年代，太阳能电池价格昂贵，效率较低，相对而言，太阳热发电效率较高，技术比较成熟，因此当时许多工业发达国家都将太阳热发电作为重点，投资兴建了一批试验性太阳能热发电站。据不完全统计，从1981~1991年，全世界建造的太阳能热发电站（500kw以上）约有20余座，发电功率最大达80MW。

按太阳能采集方式划分，太阳能热发电站主要有塔式、槽式和盘式三类。这些电站基本上都是试验性的。例如，日本按照阳光计划建造的一座1MW塔式电站，一座1MW槽式电站，完成了试验工作后即停止运行。美国10MW太阳1号塔式电站，进行一段时间试验运行后及时进行技术总结，很快将它改建为太阳2号电站，并于1996年1月投入运行。

80年代中期，人们对建成的太阳能热发电站进行技术总结后认为，虽然太阳能热发电在技术上可行，但投资过大（美国太阳1号电站投资为1.42亿美元），且降低造价十分困难，所以各国都改变了原来的计划，使太阳能热发电站的建设逐渐冷落下来。例如，美国原计划在1983~1995年建成5~10万kW和10~30万kW太阳能热电站，结果没有实现。

正当人们怀疑太阳能热发电的时候，美国和以色列联合组成的路兹太阳能热发电国际有限公司，自1980年开始进行太阳热发电技术研究，主要开发槽式太阳能热发电系统，5年后奇迹般地进入商品化阶段。该公司从1985年至1991年在美国加州沙漠建成9座槽式太阳能热电站，总装机容量353.8MW。电站的投资由：1号电站的5976美元/kW，降到8号电站的3011美元/kW，发电成本从26.5美分/kWh降到8.9美分/kWh。该公司满怀信心，计划到2000年，在加州建成装机容量达800Mw槽式太阳能热发电站，发电成本降到5~6美分/kWh。遗憾的是，1991年因路兹公司破产而使计划中断。

路兹热电站的成功实践表明，不能简单地否定太阳能热发电技术，而应继续进行研究开发，不断完善，使其早日实现商业化。为此，以色列、德国和美国几家公司进行合作，继续推动太阳能热发电的发展，他们计划在美国内华达州建造两座 80MW 槽式太阳能热电站，两座 100MW 太阳能与燃气轮机联合循环电站。在西班牙和摩洛哥分别建造 135MW 和 18MW 太阳能热电站各一座。

盘式太阳能热发电系统功率较小，一般为 5~50kW，可以单独分散发电，也可以组成较大的发电系统。美国、澳大利亚等国都有一些应用，但规模不大。

研究表明，盘式太阳能热发电系统应用于空间，与光伏发电系统相比，具有气动阻力低、发射质量小和运行费用便宜等优点，美国从 1988 年开始进行可行性研究，计划在近期进行发射试验。

在太阳能低温发电计划中，以色列在死海沿岸先后建造了三座太阳池发电站，第一座功率为 150kW，于 1979 年投入运行。以色列曾计划围绕死海建造一系列太阳池电站，以提供以色列全国三分之一用电需要。美国也曾计划将加州南部萨尔顿海的一部分变为太阳池，建造 80~600 万 kW 太阳池电站。后来，以色列和美国太阳池发电计划均作了改变。

除了以上几种太阳能热发电方式外，1983 年在西班牙建成一座太阳能抽风式热电站；以色列、美国等计划建造太阳能磁流体热发电试验装置；还开展了太阳能海水温差发电研究。适用于小功率的太阳能热发电技术还有太阳能热离子发电和温差发电，它们在特殊场合得到了一些应用。

我国在太阳能热发电领域受经费和技术条件的限制，开展的工作比较少。在“六五”期间建立了一套功率为 1kW 的太阳能塔式热发电模拟装置和一套功率为 1kW 的平板式太阳能低温热发电模拟装置。此外，我国还与美国合作设计并试制成功率率为 5kW 的盘式太阳能发电装置样机。

3. 2 太阳能光伏发电

自从实用性的硅太阳能电池问世以来，世界上很快就开始太阳能光伏发电的应用。发展初期，因太阳能电池价格昂贵，光伏发电主要限于在空间为卫星供电。随着太阳能电池技术提高，价格下降，光伏发电逐渐在地面得到应用，规模也日益扩大。据报道，1998 年，全世界太阳能电池组件生产量达到 157.8MW，是 1992

年 58。2MW 的近 3 倍。近几年国际上光伏发电加速发展，美国计划到 2010 年安装 1000~3000MW 太阳能电池，而日本计划到 2010 年安装 7600MW 太阳电池。

光伏发电不消耗燃料，不受地域限制，规模大小随意，可以独立发电或并网发电，无噪声、无污染，建设周期短，不用架设输电线路，安全可靠，维护简便，可以无人值守……，具有其它发电方式无可比拟的优点。它是大规模利用太阳能的重要技术基础。

从 1958 年美国发射的卫星上首次使用太阳电池开始，至今全世界发射的 4000 余颗卫星，90% 以上采用光伏发电系统供电。所用太阳电池，大部分为硅单晶电池，近来开始采用砷化镓和磷化钢电池。太阳电池方阵组装方式有体装式和帆板式两种，功率小至数瓦，大至上千瓦、几十千瓦。空间光伏发电用的太阳电池要求，转换效率高，重量轻，耐辐照性能好，温度系数小等，今后发展重点是薄膜太阳电池。

在卫星上成功地实现光伏发电后，人们自然会提出建造空间电站的设想，利用空间太阳辐射强、不受昼夜、气候、季节影响的有利条件，在空间将太阳能转换为电能，再用微波或激光传输到地面。70 年代，美国提出建造一座 500 万 kW 空间电站的计划，但经过深入的分析论证，到 1981 年得出结论，认为近期内研制空间电站为时过早，经济上得不偿失，以致后来改变了计划。

光伏发电用于地面之后，因价格贵而首先在一些特殊领域获得应用，如海上导航，牧区电围栏，微波通讯，管道阴极保护等。随着价格的下降，光伏发电逐渐扩大应用领域，目前主要用于以下四个方面：

消费性产品，如非晶硅太阳电池供电的计算器，太阳能钟表，太阳能照明灯具，太阳能收音机、电视机等，这类产品约占世界光伏产品销售量的 14%；

远离电网居民供电系统，包括家庭分散供电和独立光伏电站集中供电，其占世界光伏产品销售量的 35%；

离网工业供电系统，其占世界光伏产品销售量的 33%；

并网光伏发电系统，其占世界光伏产品销售量的 18%。

随着光伏发电规模的扩大，并网发电系统将快速发展。80 年代，一些工业发达国家建设的并网光伏电站规模从 100kW 到 1MW 不等，现在正规划建设 10MW

并网光伏电站。此外，美国、德国、日本等国计划建设的“太阳屋顶”，都采用并网光伏发电系统。

光伏发电在发展中国家也得到了一些应用，但应用重点是小型系统，主要解决无电或严重缺电地区家庭用电的需要。

我国在 1971 年发射的第二颗卫星上首次应用太阳电池，1973 年光伏发电开始在地面应用。1985 年以前，主要应用在航标灯、铁路信号灯、黑光灯、电围栏、小型通信机等特殊领域，也建立了少量光伏发电示范工程。90 年代以来，光伏发电逐渐扩展到通信、交通、石油、气象、国防、农村电气化等许多方面，太阳电池使用量每年以高于 20% 的速率增长，到 1998 年底，我国太阳电池累计用量达 13.2MW。以地区而言，当前我国光伏发电的重点在青海、西藏、新疆、内蒙、甘肃等无电和严重缺电的农牧区。在这些地区已建成 10~100kW 光

伏电站 40 多座，推广家用光伏电源 15 万台，总功率达 2.9MW。

3.3 太阳能水泵

在天气炎热干旱太阳辐射强的时候，正是太阳能水泵大显身手之际。因此，在近代开发利用太阳能早期，人们就十分重视太阳能水泵的研制。1615 年，世界上第一台太阳能动力机就是一部抽水机；1901 年在美国加州建成一台每分钟抽水 5300 升的太阳能水泵。以后，在世界各地又陆续建成一批太阳能水泵，这些水泵都是热动力泵。1975 年光伏水泵面世，批量投入生产，使用数量日益增多，大有取代太阳能热动力水泵之势。

太阳能热动力泵按工作温度划分有低温、中温和高温三类。到 1981 年，全世界已安装太阳能热动力水泵 100 多台，这些水泵主要分布在第三世界国家。80 年代，非洲曾计划建造 5000 台太阳能热动力水泵，印度计划在 1985 年前兴建 2000 座太阳能热动力水泵。美国也计划建造 1000 个太阳能热动力灌溉系统。法国有几家公司生产太阳能热动力水泵，能提供 6~83kW 水泵系列产品，但太阳能热动力水泵系统复杂，制造成本高，广泛应用受到限制。

80 年代以后，联合国开发署、世界银行等国际组织经过论证，确认光伏水泵的先进性、合理性和良好发展前景，从而大大推动了光伏水泵的应用。一些工业发达国家推出了一批光伏水泵产品，其中丹麦的一家公司在世界各地销售了

数千台光伏水泵。目前，全世界已有数万台光伏水泵在各地运行。印度计划在现有 4000 台光伏水泵的基础上，政府给予补贴，再推广安装 50000 台光伏水泵。

我国在 80 年代开展了太阳能热动力水泵的研究，试制成平板集热器型低温太阳能热动力水泵，采用隔膜泵抽水，晴好天气，每天可抽水 3~7 吨，扬程达 18 米。同时，也开展了中温太阳能水泵的研制。在北京还建成由德国提供的风能。太阳能热动力混合式水泵一台，功率为 3kW。在 90 年代，我国开展了光伏水泵的研究，先后试制成百瓦级和千瓦级光伏水泵，并建立了光伏水泵生产企业，能批量生产百瓦级光伏水泵。目前，我国研制的 2.5kW 光伏水泵正在新疆运行。

3.4 太阳能热水

世界上第一台太阳热水器在 100 多年前诞生于美国，它是一种闷晒式热水器。70 年代末，全世界约有 300 万台太阳热水器。80 年代中期以后，工业发达国家太阳热水器年销售量徘徊在数十万 m²，其中美国约 15 万 m²，欧共体 7.5 万 m²。

我国第一台太阳热水器出现在 1958 年。70 年代兴起开发利用太阳能热潮，各地研制成多种热水器样机并有小规模应用，1979 年我国太阳热水器的产量仅之万 m²。1987 年，我国从加拿大引进铜铝复合太阳条带生产线；90 年代，我国建立了全玻璃真空集热管和热管一玻璃真空集热管工业，使我国太阳热水器推广应用上了一个新台阶。据不完全统计，1992 年我国太阳热水器销售量超过 50 万 m²；1997 年达 350 万 m²，其中闷晒式热水器约 90 万 m²，平板热水器约 160 万 m²，真空管热水器 100 万 m²。近来，真空管热水器销量增长更快，平板热水器的销量有下降趋势。目前，我国太阳热水器产销量均居世界首位。

为了进一步扩大太阳热水器的应用，应在以下方面进行努力：将太阳热水器与建筑有机结合，完善太阳热水器功能，提高太阳热水器的可靠性和耐久性，扩大太阳热水器在工农业生产中的应用。

3.5 太阳能建筑

早在本世纪 30 年代，美国就开始太阳房的试验研究，先后建成一批实验太阳房。70 年代，一些工业发达国家都将太阳房列入发展研究计划，到 80 年代世界上建成的太阳房超过万座。90 年代后期，世界上又兴起一股“太阳屋顶”

热，一些国家相继提出“1万屋顶”、“10万屋顶”和“百万屋顶”计划，将太阳能建筑的发展推向一个新阶段。

太阳能建筑基本上有三种形式：（1）被动式，这是一种构造简单、造价低、不需要任何辅助能源的建筑，通过建筑方位合理布置和建筑构件的恰当处理，以自然热交换方式来获得太阳能。70年代以来，在相当长时间内它成为太阳能建筑发展的主流。（2）主动式，这是一种构造较复杂，造价较高，需要用电作为辅助能源的建筑。采暖降温系统由太阳集热器、风机、泵、散热器及贮热器等组成。（3）“零能建筑”，这种建筑由“太阳屋顶”提供全部建筑所需要的能量，一般在屋顶安装2~4kW太阳电池，且与电网并网。当晴好天气阳光充足

时，太阳电池可满足一个家庭全部能量需要，富裕的电能可输送给电网；当天气不好阳光不足时，则由电网供电。有的建筑还装有太阳集热器，为建筑供热。由于目前太阳电池价格较高，普遍推广“零能建筑”还有困难。

我国第一座被动式太阳房建于1977年，地点在甘肃民勤县，1977-1987年间，我国建成各种被动式太阳能采暖房约400栋，建筑面积10万m²。到1996年底，全国建成不同类型被动式太阳房约1.5万栋，建筑面积超过455万m²。

3.6 太阳灶

世界上第一台太阳灶的设计者是法国人穆肖，他在1860年奉法皇之命开发抛物镜太阳灶，供在非洲的法军使用。本世纪以来，不少国家对太阳灶进行了研究，有的还利用热管技术和光学原理研制室内太阳灶，但从总体而言，世界上太阳灶使用量不大。

我国第一台太阳灶于1956年诞生在上海。经过几十年的努力，目前全国太阳灶的保有量达到30余万台，成为世界上推广应用太阳灶最多的国家。

太阳灶基本上可分为热箱式和聚光式两大类：热箱式太阳灶结构简单、成本低、使用方便，但功率有限，温度不高，只适合蒸、焖、烤食物，而且炊事时间长，使用上限制较大。现在绝大多数使用的是聚光式太阳灶，其炊事功率大，温度高，炊事时间短，适用性强。我国在抛物镜聚光太阳灶设计中提出的“偏轴聚光”和“三圆计算作图法”具有独创性，丰富了太阳灶的设计理论，提高了太阳灶的使用性能。

3.7 太阳能干燥

70年代以后，世界上建成一批太阳能干燥装置。到80年代末、国外建成面积超过500m²的太阳能干燥器有7座，其中美国4座，印度2座，阿根廷1座。1978年投入运行的美国加州太阳能葡萄干燥器，是世界上最大的太阳能干燥器，集热器面积达1951m²，有396m²岩石贮热床，每天可干燥6-7吨葡萄。此外，国外也有一些小型太阳能干燥器，如巴西有一种商用小型香蕉干燥器，集热器面积3.5m²，干燥箱体积1m³，干燥500个香蕉两天后即可出售。

70年代以后，我国太阳能干燥器迅速发展，尤其在农村，对许多农副产品开展了太阳能干燥试验。1976—1986年间，各地建成60座左右太阳能干燥器，总采光面积达5000m²，但由于缺乏理论指导，这些干燥器大部分设计不够合理，使用效果较差，有的很快不能使用。经过“六五”科技攻关，我国太阳能干燥的研究和应用水平有了较大提高，尤其建成的多座太阳能干燥示范装置，起到了示范推动作用。目前全国建成的太阳能干燥装置，总采光面积已达15000m²，但由于干燥物料的多样性和干燥工艺不同，农副产品的干燥又有季节性特点，太阳能干燥器在实现产业化和商业化方面困难较大。

3.8 太阳能制冷与空调

1960年，世界上第一套太阳能氨-水吸收式空调系统在美国建成，制冷能力为5冷吨。70年代以后，随着主动式太阳房的发展，太阳能制冷与空调也得到了发展，如日本在1974年竣工的八崎太阳房，装有溴化锂-水太阳能吸收式制冷装置，制冷能力为1.3冷吨，1978年以后日本兴建了80座八崎太阳房。1984-1990年在美国加州建成带贮热装置和辅助能源的三套太阳能吸收式空调系统，其中一套集热面积为149m²，以天然气为辅助能源，制冷能力10冷吨。

70年代以后，我国也开始进行太阳能制冷和空调研究，研制成几台小型实验性制冰机，其中有氨-水和溴化钾-水吸收式制冰机以及固体吸附式制冰机。同时，对太阳能空调也进行了试验研究，先后建成几套小型空调系统。此外，还开展了太阳能除湿式降温和辐射降温试验。1998年，广东江门100kw太阳能空调系统投入运行，采用500m²集热器供热，燃油炉作为辅助热源，两级吸收式溴化钾制冷机制冷，达到了实用要求。1999年，山东乳山100kw太阳能空调系统投入运行，采用热管式真空管集热器供热，目前，家用太阳能吸附式空调样机已研制成功，即将投入商业化生产。

3. 9 太阳能其它利用

(1) 海水淡化

地球上 97% 是海水，淡水仅占 3%，而且分布不均匀，有的地方淡水资源极为缺乏。于是，在 1872 年世界上第一座太阳能蒸馏器在智利诞生了，利用太阳能进行海水淡化，日产淡水 17.7 吨，一直工作到 1910 年。到 1974 年，世界上建造的大型太阳能蒸馏器已有 25 座，其中日产淡水：吨以上的有十几座，最大的一座面积达 8640m²，日产淡水 28.08 吨。80 年代以后，建造大型太阳能海水淡化装置的报道较少。

70 年代，我国在海南歧蜈洲岛和西沙中建岛分别建成蒸发面积 385m²、日产淡水 1 吨和蒸发面积 50m²、日产淡水 0.2 吨太阳能蒸馏器各一座。

(2) 太阳炉

将阳光高倍聚光，在焦斑处可获得高温，最高达 3500℃ 左右。利用这一高温能进行冶金、耐火材料、高温化学反应等实验，且实验环境特别洁净。1921 年，德国科学家设计了一个由抛物面聚光器和透镜组成的太阳炉。1933 年又建造了一座聚光器和定日镜组成的太阳炉。1951 年，美国制成开口直径 3m 的抛物镜太阳炉。1952 年，法国在比利牛斯山上建成世界上第一座大型太阳炉，功率达 50kW，此后，美国、日本也相继建成了一批功率为 60-100kW 的大型太阳炉。70 年代，法国又在比利牛斯山奥德约设计建造了目前世界上最大的太阳炉，输出功率达 1000kW。估计全世界建造的太阳炉有数十座，但 80 年代以后鲜见报道。

我国有两台小型太阳炉，直径分别为 0.95m 和 1.5m，焦斑处温度高于 3000℃，主要用于材料的高温试验。

(3) 太阳光催化治理环境

80 年代初，人们开始研究光催化治理环境，但以应用人工光源中的紫外光为主，效果虽显著，耗能却很大，费用较高。因此，国内外研究者提出将太阳能与保护环境结合，开发太阳光催化降解治理环境污染技术。美国率先进行了实验，他们将被三氯乙烯严重污染的地下水泵出地面，加入 TiO₂ 粉末催化剂，利用槽式抛物面聚光镜会聚阳光，令污水流过设置在焦线上的玻璃管，进行光催化反应，结果使水中三氯乙烯浓度从 180ppb 降到 0.6ppb 以下，而美国饮用水的标准为 6ppb 这是世界上太阳光催化成功治理污染水的典型例子。目前，正在开

展的太阳光催化降解治理环境的项目很多，主要有：空气中有毒物质的光催化去除，废水中有机污染物和金属污染物降解，饮用水的深度处理等。

我国对太阳光催化治理环境也开展了实验研究工作，取得一些成果。

（4）能源植物

为了开辟太阳能利用新途径，1973年美国诺贝尔奖金获得者卡尔文博士，提出种植能源作物设想。他将通过光合作用产生碳氢化合物的植物统称为能源植物。目前全世界已知的能源植物有数千种，它们可以作为石油一样的能源资源进行开发利用。他在美国加州试种了美国香槐（一年生植物），其分泌的汁液与柴油相似，可以提炼成优质燃料。古巴香胶树，高达30余米，在树上钻一个直径约12mm的小孔直至树心，插一根管子即会流出黄色油状液体，一昼夜可收集2025升油，将其放入油箱即可发动柴油发动机。金鼠草是一种草本植物，0.4公顷土地种植的金鼠草，收获后可提炼0.8吨燃料油。

甜高粱是当前世界各国比较关注的一种能源作物，我国也进行了种植，每亩沈农甜杂2号甜高粱，收获后可提取267.4升酒精，而酒精是一种十分优良的代用燃料。

70年代以来，人们对能源植物进行了广泛的选取和研究，希望能找到光合作用效率高、利用转化简便的植物品种，为此人们仍在继续努力。

太阳能利用领域极其广阔，除以上介绍的一些项目外，诸如太阳能汽车、太阳能飞机、太阳能热泵等还很多，同时新的利用技术还在不断涌现，限于篇幅，本文不能一一予以介绍，请读者谅解。

4. 展望

20世纪太阳能科技发展和太阳能利用实践，为21世纪大规模利用太阳能奠定了坚实基础。近来，世界上一些著名分析预测研究机构、跨国公司、太阳能专家和一些国家政府纷纷预测，认为21世纪中叶即2050年前后，太阳能（含风能、生物质能）在世界能源构成中将占50%的份额，那时太阳能将成为世界可持续发展的基础能源。对于这一预测，有人支持，也有人怀疑，意见不完全一致。为了科学地看待这一问题，我们可以从世界矿物能源生产和消费、全球环境保护以及太阳能科技进步三个方面进行一些分析，以便得出比较客观的结论。

世界能源消费量增长一倍，在本世纪初大约需要 50 年，到本世纪中期缩短到 30 年，进入 80 年代大约只要 15 年。全球矿物能源的消费量越来越大，而全球矿物能源贮量却十分有限。全球石油贮量约 1300 亿吨，目前全球石油的年消耗量约 35 亿吨，而亚洲石油的消耗量在激增之中。如果这种趋势不变，则在今后 25 年中将平均年消耗 50 亿吨石油，足以把全部贮量耗尽。即使在此期间有新油田发现，专家估计全球石油贮量也不会超过 2000 亿吨，全球石油资源在三、五十年内将枯竭。今后用什么来代替石油？70 年代“石油危机”以后，曾把主要希望寄托在煤的气化和液化，30 年快过去了，而这方面的收效甚微，复杂的技术和巨大的投资，制约了气化煤和液化煤的广泛使用。

社会进步和经济发展，需要能源的支撑。但是，用增加煤炭消耗来弥补石油不足，是一条以环境为代价的能源发展道路，是完全行不通的。据测定，直接燃烧：吨煤，产生粉尘 3-11kg，二氧化硫 60kg，二氧化氮 3-9kg，还有大量二氧化碳。我国 1995 年排放的烟尘为 1744 万吨，二氧化硫为 2370 万吨，其中燃煤排放的分别占 70% 和 85%。目前，我国每年燃煤排放的碳已达 10 亿吨。煤炭的大量开发利用是造成全球环境恶化的主要原因。根据 1992 年联合国召开的世界环境与发展大会的要求，煤炭的消费不仅不能增加，而应予以限制并逐步减少。

另外，我们可以通过对太阳能利用中最重要的光伏发电进行一些分析，以评估太阳能在下一世纪的发展前景。

以 70 年代不变价计算，近 30 年间，太阳电池的价格下降了数十倍。专家预测，通过扩大生产规模和技术进步，2030 年以后，光伏发电对常规发电开始具有竞争力。2050 年，太阳电池的价格将比现在下降 10 倍，即每瓦 4.5 元左右，每千瓦时的电价约 0.2 元左右。从现在起经过 50 年的发展，那时光伏发电量将占全球总发电量的一半。

以上分析表明，21 世纪全球能源结构必将发生根本性变化。当今占主导地位的石油将逐渐减少直至枯竭，完成其历史使命；煤炭的利用将受到限制，但考虑发展中国家发展经济的需要，在 2030 年前可能还会有所增长，此后将逐渐下降；核能利用，因核安全和核废料处理技术尚未完全解决，若无技术上突破，在今后 50 年内发达国家会逐渐关闭核电站，发展中国家还会新建一些核电站，

二者相抵，总数上不会有什么增加，相反还会有所减少；太阳能和其它可再生能源将替代石油和煤炭，逐渐成为世界能源的主角。

对 2050 年各种一次能源在世界能源构成中所占的比例进行预测，可以得出如下结果：石油 0（或甚微），天然气 13%，煤 20%，核能 10%，水电 5%，太阳能（含风能、生物质能）50%，其它 2%。

21 世纪是人类大规模利用太阳能的世纪，这是不以任何人的意志为转移的历史发展必然结果。

14. 光伏板：与太阳一同升起的希望

1. 环境、资源的两难困局

我国人均用能目前还处于相对低的水平，约每人每年 1000 公斤标准煤（下同），比起美国的人均用能每人每年 1.1 万公斤，日本、德国、俄罗斯等国每人每年用能 5000 公斤—6000 公斤尚有很大差距。

但是，随着社会和技术的发展以及人们对生活水平的不断增加，我国的能耗总量也还将有相当可观的增长。根据有关部门预测，在 2030 年—2050 年间，我国人均用能将达到每人每年 2500 公斤~3 000 公斤，总用能量将达到 45 亿吨，是目前的 3 倍多。

能源需求的巨大增长，使我国的资源与环境都面临着严峻的考验。

根据探明的可采储量，中国传统能源的剩余开采时间为：石油 20 年，天然气 50 年，煤炭 116 年。

我国国内石油产量今后只能基本维持现有水平或略有增加（1.6—2 亿吨/年）。海外合作所能得到的份额大约在 2000 万吨，但需求依旧在增加。2000 年我国已进口原油 7000 万吨，消费石油已达 2.2 亿吨。据有关部门预测，到 2010 年我国的液体燃料年消费量将达到 3.55—3.71 亿吨、2020 年将达到 5.06—5.41 亿吨，到 2050 年还将有所增加。

根据统计，2000 年我国烟尘、二氧化硫排放量分别达到 1165 万吨和 1995 万吨，其中由煤产生的排放量分别占 70%和 90%。酸雨面积占国土面积 40%，造成了极大的经济损失。我国现有以煤为主的能源结构，能源利用效率低，污染排放量大，是造成空气污染的重要因素之一。

温室效应的危害正在成为制约我国经济发展的一个因素。我国二氧化碳年排放总量均在 30 亿吨左右，约占世界总排放量的 13.2%，人均排放量达到每人每年 2.4 吨。尽管人均排放量低于发达国家，但排放总量已经超过了除美国以外的其他发达国家。

我国农村的生活用能仍以秸秆、薪柴和煤炭为主，2000 年这三者加起来占全部农村生活用能的比例高达 88.53%，而沼气仅占 0.40%，液化石油气为 1.09%，天然气为 0.03%，煤气为 0.03%。从某种程度上说，如果农村能源供应和能源结构调整问题不能得到及时解决，势必影响国家实施生态工程建设，尤其是退耕还林工程建设。

从林林总总的资料和数据中我们可以感受到中国在能源领域的压力：一方面是经济发展对能源需求的巨大增长；另一方面是石油、煤炭、天然气等传统能源资源储量的有限性及其开发利用过程中对生态环境的严重危害。

我们怎样才能走出这个两难困局？

2. 太阳能前景

针对我国面临的能源窘境，能源企业和学者们提出了一系列对策。其中，具有清洁、无污染、储量大、可再生等特点的太阳能是人们的关注焦点之一。

据统计，每年中国陆地接收的太阳辐射总量，相当于 2.4 万亿吨标煤，全国总面积 2/3 地区年日照时间都超过 2000 小时，特别是西北一些地区超过 3000 小时。另一方面，随着当前世界光电技术及其应用材料的飞速发展，光电材料成本成倍下降，光电转换率不断提高，这将带来太阳能发电成本的大幅度下降。预计不到 10 年，太阳能发电的成本就会接近并低于煤电，这为中国大力开发太阳能资源提供了可能。

中国能源研究会理事长黄毅诚提出，中国应加速开发无污染、可再生的太阳能资源，力争到 2020 年建成 500 万千瓦的太阳能发电容量，使太阳能成为中国最大的可再生能源。

3. 光伏板 与太阳一同升起的希望

青海省“太阳能光伏电站”光明工程 2002 年 9 月正式启动。据悉，该工程由德国援助机构捐赠 800 万欧元(约合 6000 万元人民币)，国家投资 2.66 亿元，旨在解决青海边远地区无电乡的基本生活用电。

内蒙古太阳能学会认为,在今后很长一段时期内由常规电网覆盖全部西北地区是不现实的,光伏民用产品在我国西北地区具有巨大的潜在市场,它必将取得更大社会效益和可观的经济效益。青海省 10 年光伏市场的发展,将迅速辐射到整个西北六省区。

无锡尚德太阳能电力有限公司介绍,我国太阳能电池市场规模 2001 年达到了 2.5 兆瓦(仅考虑生产)的水平,2003 年随着“光明工程”的带动市场规模猛增到约为 15 兆瓦。目前国际太阳能电池市场年增长率为 35%,2001 年达到了 41%,预计 2002 年将达到 45%;而我国太阳能电池市场启动较晚,2001 年增长率只有 36%,但因为受到政策因素影响较大以及国外产品的大举进入,市场估计非常不准确,2002 年增长率达到了 120%。估计 2003 年我国太阳能电池市场规模将达到 25 兆瓦的水平,包括通讯及工业应用产品、民用及户用系统等。

市场分布总体上讲是偏重西北(包括新、青、宁、甘、蒙、西地区),约占全国市场的 60%,但随着太阳电力系统建筑一体化的发展,经济发达的华东及华南地区对户用系统的需求增长很快,整个太阳发电市场在快速成熟和急剧膨胀之中。

而按行业划分,2002 年太阳能电池市场分布的顺序大体是:通讯、工业应用、户用系统、电站系统、民用产品、军用产品、交通等,以上 7 方面的应用约占到了 80%以上。

5. 无锡尚德 实现跨越式发展

2002 年 10 月,位于无锡新区国家高新技术产业开发区的无锡尚德太阳能电力有限公司多晶硅太阳能电池生产线已建成并陆续投入生产。

该公司由归国博士施正荣带着科技成果回国创办。

公司的建立,采用了现代企业制度。办成了一个股份多元化的民营企业,无锡小天鹅集团、山禾集团、无锡信托投资公司、高新技术风险投资公司和澳大利亚太阳能电力系统有限公司等大企业投资入股,施正荣以专利技术入股占 30% 的股份。

第一期投资 1800 万美元,生产多晶硅片、多晶硅太阳能电池,能量转化率为 13%—15%,大大高于目前国内其他公司的技术水平。该公司具有目前世界上最先进的多晶硅电池制造技术和工艺,配备了从欧美、日本等几十家权威性设

备制造公司引进的最先进制造设备，第一年多晶硅太阳能电池生产能力可达 10 兆瓦，尚德公司 3 年内年生产能力可达 30 兆瓦。

尚德公司的“尚德”牌太阳能电池组件是按照国际标准 IEC61215 的要求进行设计、选材和制造的，其设计精细，外形美观，品质优良，超过世界著名制造商的同类产品。公司生产的“尚德”牌 75W 太阳能电池组件在中国科学院太阳光伏发电系统和风力发电系统检测中心进行了检测，其电性能达世界先进水平。

尚德公司日前正对其组件产品进行环境老化试验，即将通过 IEC61215，美国 UL1703 和欧洲 ESTI 的产品质量认证。

在批量生产的同时，尚德公司还在进行第三代超高效(转化效率为 50%)太阳能电池的研究与开发。

6. 幼稚产业期待保护

太阳能产业将是一个充满希望的产业，可是，我们如何才能让这棵稚嫩的幼苗成长为我国能源市场中的参天大树呢？

太阳电池行业是技术含量高、生产成本低、资金密集型的产业，在这三个方面，我国企业没有一项能够占有优势，我国一贯的劳动力成本优势和原材料优势在太阳电池行业并不能显现。为此，要想扶持国内太阳电池行业的发展，就必须从 WTO“保护新兴和弱小行业”的有关条款中寻找措施，关税和贸易壁垒是必然的选择。

另外，从项目上扶持国内技术先进、素质好、实力强的企业，培育行业领头羊和有希望成为国外竞争对手的“种子选手”，从资金上给予支持，从全行业通盘规划，将太阳电池原材料行业纳入优先发展的行列，积极支持国内企业走出去，在国际市场上锻炼企业、培养人才、开拓市场。

人才培养是重中之重，没有合格的人才只能生产低水平的产品。我国太阳能发电方面的著名专家较少，大学培养的博士生和硕士生都只是在国内现有的低水平上培养的，不能适应国际太阳能快速发展的技术需要。企业与大学联合培养人才是一条快捷的途径。

当记者问及如何看待 2002 年美国太阳能产业全面滑坡现象时，尚德公司行政部邢晓宁经理介绍说，美国太阳能行业的全面滑坡不在于太阳能行业本身，而必须从美国的大经济背景去看待。

2002年美国进入了衰退期晚期，其经济复苏的表象是经济增长率略有增加，而实际上是美国大财团经济的全面停滞，对于美国能源行业尤为突出。安然事件影响的不仅仅是能源本身，作为资金密集型的太阳能电池行业出现了资金的严重收缩从而导致行业的下滑也在情理之中。

但这一切只是暂时现象，随着美国安然事件的淡化和经济的进一步复苏，在新一轮能源危机之后太阳能行业将会以更快的增长速度发展。实际上，2002年全世界并没有因为美国太阳能行业的收缩而放慢发展速度，相反象日本、欧洲等国家却是加快发展的一年；中国太阳能电池项目在这一年一下子增加了许多，如上海航天科技、武汉、深圳等，中国太阳能产业的生产能力也在这一年得到了发展壮大。

15. 光伏水泵系统

引言

“光伏水泵系统”亦称“太阳能光电水泵系统”，其基本原理是利用太阳能电池将太阳能直接转换为电能，然后驱动各类电动机带动水泵从深井、江、河、湖、塘等水源提水。它具有无噪声、全自动（日出而作，日落而停）、高可靠、供水量与蒸发量适配性好（“天大旱，它大干”）等许多优点。联合国国际开发署（UNDP）、世界银行（WB）、亚太经社会（ESCAP）等国际组织先后充分肯定了它的先进性与合理性，目前在这些国际组织的支持下，全世界已有数万台不同规格的光伏水泵在不同地区和国家运行，特别是在亚、非、拉及中东等发展中国家，已为许多贫困地区的人民带来相当可观的经济效益，加速了这些地区的脱贫步伐。由于光伏水泵系统从技术上说是一个比较典型的“光、机、电一体化”系统，它涉及太阳能的采集、变换及电力电子、电机、水机、计算机控制等多个学科的最新技术，因此已被许多国家列为优先发展的高新技术和进一步发展的方向，中东、非洲有不少国家更是期望依藉太阳能水泵及省水微灌、现代化农业等新技术在地下水资源比较充裕的干旱地区把家园改造为绿洲。

光伏水泵与柴油机水泵相比具有相当良好的经济性。世界银行在盛产石油的中东地区（如阿联酋、约旦等国）作出了具有明确结论的经济性比较，就其每立方米的水价而言，光伏水泵的水价与柴油机水泵水价持平的系统功率约在40kW，由于近几年太阳能电池及其它电子控制器件的降价，两者水价持平的功率在

75kw 左右。如果太阳电池的价格下降至 3 美元 / wp，两者水价持平的功率在 150kW-200kW 左右。德国西门子公司基于近年在世界各地安装、试验、销售各种规格光伏水泵经验的基础上，得出的结论是：柴油机水泵初期投资低是其优点，但随着运行年数的增加，其运行维护费用将不断增加，每立方米水的成本将因此而逐年增长。光伏水泵的初期投资偏大是其缺点，但此后由于它的运行费用低和少维护或免维护等特点，其水的成本上升很缓慢，十年以后，柴油机水泵的水成本将是光伏水泵水成本的两倍还多，两者的盈亏平衡点约在三年左右。印度在现有 4000 台光伏水泵的基础上，ZF 给予一定补贴计划再推广安装 50000 台套光伏水泵系统，每个系统的容量在 1-5kW，之间。

1 系统的基本构成

光伏水泵系统大致由四部分组成：光伏阵列，控制器、电机和水泵。

1. 1 光伏阵列

光伏阵列由众多的太阳电池串、并联构成，其作用是直接把太阳能转换为直流形式的电能。目前用于光伏水泵系统的太阳电池多为硅太阳电池，其中包括单晶硅、多晶硅及非晶硅太阳电池。太阳电池的伏安特性曲线如图：所示。它具有强烈的非线性。

太阳电池输出的最大功率

就是它的额定功率。图：中曲线上的大圆黑点表示在相应日射下太阳电池输出最大功率的位置，称“最大功率点”。

光伏阵列的伏安特性曲线具有和单体太阳电池同样的形状，若忽略单体太阳电池生产过程中的差异、组件相互之间的连接电阻，并假设它具有理想的一致性光伏阵列的伏安特性曲线可以看作仅是单体太阳电池伏安特性曲线按串、并联方式放大其坐标的比例尺。

1. 2 控制器

光伏阵列的输出特性曲线具有非线性而且和太阳辐照度、环境温度、阴、晴、雨、雾等气象条件有密切关系，其输出随日照而变化的是直流电量，而作为光伏阵列负载的光伏水泵，它的驱动电机有时是直流电机，有时是交流电机甚至还有其它新型电机，它们同样具有非线性性质。在这种情况下要使光伏水泵系统工作在较理想的工况，而且又，于任何日照，都要发挥光伏阵列输

输出功率的最大潜力，这就要有一个适配器，使电肋负载之间能达至“和、皆、高效、稳定的工作状态。适配器的内容主要是最大功率“点跟踪器、逆变器以及一些保护设施等。

1. 2. 1 最大功率点跟踪器 (MPPT)

由光伏阵列伏安特性曲线可知，光伏阵列在不同太阳辐照度下输出最大功率点位置并不固定，而且当环境温度发生变化时，相应于同一辐照度的最大功率“点位置也将变化。为了实现最大功率“点跟踪以获取当前日照下最多的能量，MPPT 通常做成两种形式，以下分别予以介绍。•恒定电压式最大功率点跟踪器 (CVT 式 MPPT)。

仔细观察图：中表示最大功率输出的圆黑点——最大功率点的位置，它们都坐落在 $U_{max}=\text{const}$ ，的直线附近，特别是日射比较强时离 $U_{max}=\text{const}$ 更近，同时考虑至仗阳电它具有以下温度特优良陷温度升高时，在同一日射条件下其开路电压 U_{OC} 将减小，短路电流 I_{sc} 将伴有微小增大，再考虑到日射高时一般都具有较高环境温度，而日射低时环境温都要低一些的特特点，结合太阳电他的温度特性，它们刚好都有利于使一日内最大功率点的轨迹更逼近于一根垂直线 $U_{max}=\text{const}$ ，这就是说，在工程上允许人们把最大功率，点出现的轨迹近似地处理为一根垂直线 $U_{max}=\text{const}$ ，这就构成 T_{cvT} 式 MPPT 的理论根据。

•真正的 MPPT

C “T 型 MPPT 有其不足之处，主要是因为光伏阵列的开路电压 U_{oc} 、最大功率点电压 U 。受温度的影响较大， U_m 一旦设定，冬、夏会有较大偏离，这将会无，胃地损失相当一部分能量，因此人们在当今微机芯片性能 / 价格)、以及其实时，胜能不断提高的情况下，不少系统已在着手采用。“真正的 MPPT” 技术。

在“真正的 MPPT” 技术中，人们采用了自寻优的概念，实时地测量光伏阵列的输出功率，进行比较后，自动地寻找到最大功率点。不断地寻找，不断地调整，不断地再寻找...，如此周而复始，系统一直处于微 J、的调整之中。这种“真正的 MPPT” 可以自动适应冬、夏较大的温差而毋需人工干预，十分有利于提高系统的全年效率。

1. 2. 2 变频逆变器

光伏阵列通过最大功率点跟踪器以后的输出是直流电压，如果水泵所用驱动

电机是直流电动机，当然就可以在二者电压值相适配的情况下直接连接，电动机将带动水泵旋转扬水，例如美国 Solarjack 公司早年的安静产品就是这样。由于直流电动机的造价一般较高，还需要定期维护或更换其电刷，近若干年来，由于新型调速控制理论及功率电子器件、技术的进步，使交流调速技术有了长足的发展，其效率已逐步赶上直流电动机，而其使用的方便性和牢固性却远远超过直流电动机，因此有刷直流电动机的驱动方式渐呈被淘汰之势，而取而代之的主要是高效率的三相异步电动机及直流无刷电动机，也偶有采用永磁同步电动机或磁阻电动机的。后几种电动机的驱动都要靠专用的变频装置或相应的电力电子驱动电路。：这里以三相异步电动机的驱动为例说明其驱动的基本原理。

交流驱动常分为方波驱动（含阶梯波驱动）及正弦波驱动两大类。一般说功率较小的光伏水泵系统（300W 以下），采用方波驱动的为多，功率较大时为限制其谐波损耗，常采用正弦波驱动。不论采用何种驱动，其基本电路结构都可分为以下四部分，即：

（1）开关电源部分：它的作用是为控制器提供电源。控制器往往需要士 5V 或 +12V 等控制电源，而太阳电池阵列的输出电压在绝大部分情形下是不可能直接为此所用，因此需要一个 DC / DC 变换装置，把阵列的直流电压变换为所需的直流电压，这就是开关电源。

（2）主电路及其驱动电路

作为主电路的三相逆变电路的主要元件为功率电子器件，它们构成了全桥式逆变电路，大容量的电解电容作为储能元件直接跨接在直流侧两端，当逆变电路关断时，太阳电池阵列向电容充电，当逆变电路导通时，电容和太阳电池阵列一同为负载供电。

驱动电路的设计与制作应精心进行，在使用功率 MOSFET 时要可靠地使栅极驱动电路具有良好的性能。

（3）控制电路

目前许多光伏水泵的控制电路已经采用先进的单片微机技术，经过了 MsC-51 系列、MCS96 系列等发展过程，最近更推出了比较令人满意的 8XCI96 系列，其中包括专门用于电机调速的 80C196MC 系列，它除了具有 196 系列的许多共有特点外，还具有特别适合于电动机驱动的特点，通过汇编语言的程序设计，

在本系统中主要完成以下功能。

- 完成系统要求的过流、欠压、低速、打干保护等保护功能，显示故障状态；

- 检测主回路直流侧的电流、电压、计算出太阳能电池阵列的输出功率，完成在变频调速过程中对阵列输出最大功率点的跟踪；

- 按磁链追踪或其它相应的变频调速原理，发送 SPWM 信号。

(4) 保护电路

出于对系统安全运行的考虑，需要设置诸如过电流、过电压、过负荷、过低负荷、欠电压、井水打干、停机后在各种条件下的自启动……许多保护环节，要根据所选用的控制器件、控制电路因地制宜地把它们设置到电路中去。由于光伏水泵在绝大多数情况下都是“日出而作，日落而停”、全自动地工作的，因此必须采用十分可靠的保护措施。

1.3 电机和水泵

光伏水泵系统的一切措施都是为了能稳定、可靠地多出水，或者说最后都要落实在电机、水泵的工作上，它们往往构成一个总成件，这个总成件要求有最大限度的可靠性及高效率。对于光伏水泵而言，电机和水泵的搭配并不象常见的电机和水泵搭配那样“随便”，由于电机的功率等级、电压等级在很大程度上受到太阳能电池阵列的电压等级和功率等级的制约，因此对水泵扬程、流量的要求被反映到电机上时，往往必须在兼顾阵列结构的条件下专门进行设计。出于不同用户的不同要求，光伏水泵用驱动电机有：不同电压等级的传统直流电动机，直流无刷永磁电动机，三相异步电动机，永磁同步电动机，磁阻电动机等。从目前的使用情况看，以三相异步电动机及直流无刷电动机为最多，大功率系统仍以采用高效三相异步电动机为主。在进行电机设计时要充分考虑到光伏水泵的具体运行条件，主要是：变频运行、负载率早晚变化较大等。在这种情况下要力争使电动机全日、全年的总平均效率为最高，它不象普通电动机那样可以认为它是一直处于具有恒定电压的电源带动下工作的。

光伏水泵系统中水泵的选择与设计也甚有特点。根据用户对流量、扬程的不同要求，按经济性、可靠性大致可按以下原则选择泵型：

要求流量小、扬程高的用户，宜选用容积式水泵；要求流量较大，且扬程

也较高的用户，宜选用潜水式电泵；需要流量较大，但扬程却较低的用户，一般宜采用自吸式水泵。

2. 光伏水泵系统的效率及特性

上式中： η_{array} ——光伏阵列的转换效率， η_{invert} ——具有 MPPT 功能的变频逆变器效率， η_{motor} ——驱动的效率， η_{pump} ——水泵效率， η_{coup} ——电机、水泵的机械耦合传动效率。

系统效率 η_{sys} 可以是瞬时系统效率，也可以是小时平均系统效率，日平均系数效率，月平均系统效率，季度平均系统效率，年度平均系统效率等。计算这些效率时要注意在上述定义公式中，分子与分母所选的积分限为相同的小时、日、月、季度或年，而常易混淆的是诸如把日平均效率看成是小时平均效率的算术平均值，或把月平均效率看成是一月内各天日平均效率的平均值。

商品化光伏水泵系统的系统效率，其一般在 1%~6% 的范围内不等。产品的质量参差不齐，更由于系统效率中包含了太阳能电池的效率，仅根据系统效率难以判断逆变器、机泵总成件等主要部件的效率情况，因此市场上通常把太阳能电池的效率排除在外，给出一个“机泵系统效率”，这里“系统”二字的含意是已把 MPPT、变频逆变器的效率考虑在内。从目前世界市场的产品情况看，机泵系统效率相差很大，高的可达 60% 左右，低的仅 10% 左右。当然，功率等级不同、泵型及电动机类型不同都会有不同的效率范围，在保证其可靠性的前提下要认真推敲其一定年限内的性能 / 价格比。

光伏水泵系统的日扬水量受天气（主要是日照）的影响很大，很难给出具体结果，只能根据某一具体时日的具体日照分布给出相应的系统工作状况。

如某一光伏水泵系统，其开始扬水（相应于扬程为某一定值时）的太阳辐照度约是 $420\text{w} / \text{m}^2$ （时间大概是早上 7:50），人们称该“ $420\text{W} / \text{m}^2$ ”为该系统在扬程等于该一定值下的“扬水阈值”。扬水阈值是衡量一个光伏水泵系统工作状况的重要指标，它既取决于光伏水泵系统质量的优劣，也取决于配用太阳能电池阵列容量的大小，同一系统在相同的阵列容量及扬程下，阈值愈小愈好，这意味着水泵早打水，多打水。

为了进一步发展、改进光伏水泵系统的设计、制造及试验，我国已经推出了相应的系统仿真、系统 CAD 及优化配置等软件包。

16. 光伏发电系统中逆变电源的原理与实现

一、前言

目前我国光伏发电系统主要是直流系统,即将太阳电池发出的电能给蓄电池充电,而蓄电池直接给负载供电,如我国西北地区使用较多的太阳能户用照明系统以及远离电网的微波站供电系统(如图1所示)均为直流系统。此类系统结构简单,成本低廉,但由于负载直流电压的不同(如12V、24V、48V、等),很难实现系统的标准化和兼容性,特别是民用电力,由于大多为交流负载,以直流电力供电的光伏电源很难作为商品进入市场。另外,光伏发电最终将实现并网运行,这就必须采用成熟,今后交流光伏发电系统必将成为光伏发电的主流。

二、光伏发电系统对逆变电源的要求

采用交流电力输出的光伏发电系统,由光伏阵列、充放电控制器、蓄电池和逆变电源四部分组成(并网发电系统一般可省去蓄电池),而逆变电源是关键部件。光伏发电系统对逆变电源要求较高:

(1) 要求具有较高的效率。由于目前太阳电池的价格偏高,为了最大限度地利用太阳电池,提高系统效率,必须设法提高逆变电源的效率。

(2) 要求具有较高的可靠性。目前光伏发电系统主要用于边远地区,许多电站无人值守和维护,这就要求逆变电源具有合理的电路结构,严格的元器件筛选,并要求逆变电源具备各种保护功能,如输入直流极性接反保护,交流输出短路保护,过热,过载保护等。

(3) 要求直流输入电压有较宽的适应范围,由于太阳电池的端电压随负载和日照强度而变化,蓄电池虽然对太阳电池的电压具有钳位作用,但由于蓄电池的电压随蓄电池剩余容量和内阻的变化而波动,特别是当蓄电池老化时其端电压的变化范围很大,如12V蓄电池,其端电压可在10V~16V之间变化,这就要求逆变电源必须在较大的直流输入电压范围内保证正常工作,并保证交流输出电压的稳定。

(4) 在中、大容量的光伏发电系统中,逆变电源的输出应为失真度较小的正弦波。这是由于在中、大容量系统中,若采用方波供电,则输出将含有较多的谐波分量,高次谐波将产生附加损耗,许多光伏发电系统的负载为通信或仪表设备,这些设备对电网品质有较高的外,当中、大容量的光伏发电系统并网运行时,为

避免对公共电网的电力污染，也要求逆变电源输出正弦波电流。

三、逆变电源的原理与电路结构

逆变电源将直流电转化为交流，其电路原理如图 3 所示。功率晶体管 T 1、T 3 和 T 2、T 4 交替开通得到交流电力，若直流电压较低，则通过交流变压器升压，即得到标准交流电压和频率。对大容量的逆变电源，由于直流母线电压较高，交流输出一般不需要变压器升压即能达到 220 V，在中、小容量的逆变电源中，由于直流电压较低，如 12 V、24 V，就必须设计升压电路。

中、小容量逆变电源一般有推挽逆变电路、全桥逆变电路和高频升压逆变电路三种其主电路分别如图 3、图 4 和 图 5 所示，图 4 所示的推挽电路，将升压变压器的中性抽头接于正电源，两只功率管交替工作，输出得到交流电力，由于功率晶体管共地边接，驱动及控制电路简单，另外由于变压器具有一定的漏感，可限制短路电流，因而提高了电路的可靠性。其缺点是变压器利用率低，带动感性负载的能力较差。

图 3 所示的全桥逆变电路克服了推挽电路的缺点，功率晶体管 T1、T4 和 T2、T3 反相，T1 和 T2 相位互差 180 度。调节 T1 和 T2 的输出脉冲宽度，输出交流电压的有效值即随之改变。四只功率晶体管的控制信号和输出波形如图 6 所示，由于该电路具有能使 T2 和 T4 共同导通的功能，因而具有续流回路，即使对感性负载，输出电压波形也不会畸变。该电路的缺点是上、下桥臂的功率晶体管不共地，因此必须采用专门驱动电路或采用隔离电源。另外，为防止上、下桥臂发生共同导通，在 T1、T4 及 T2、T3 之间必须设计先关断后导通电路，即必须设置死区时间，其电路结构较复杂。

推挽电路和全桥电路的输出都必须加升压变压器，由于工频升压变压器体积大，效率低，价格也较贵，随着电力电子技术和微电子技术的发展，采用高频升压变换技术实现逆变，可实现高功率密度逆变，这种逆变电路的前级升压电路采用推挽结构，但工作频率均在 20 K H Z 以上，升压变压器采用高频磁芯材料，因而体积小 / 重量轻，高频逆变后经过高频变压器变成高频交流电，又经高频整流滤波电路得到高压直流电（一般均在 300 V 以上）再通过工频逆变电路实现逆变。

采用该电路结构，使逆变电路功率密度大大提高，逆变电源的空载损耗也相

应降低，效率得到提高，该电路的缺点是电路复杂，可靠性比上述两种电路低。

四、逆变电路的控制电路

上述几种逆变电源的主电路均需要有控制电路来实现，一般有方波和正弱波两种控制方式，方波输出的逆变电源电路简单，成本低，但效率低，谐波成份大。正弦波输出是逆变电源的发展趋势，随着微电子技术的发民，有P W M功能的微处理器也已问世，因此正弦波输出的逆变技术已经成熟。

1、方波输出的逆变电源目前多采用脉宽调制集成电路，如S G 3 5 2 5，T L 4 9 4等。实践证明，采用S G 3 5 2 5集成电路，并采用功率场效应管作为开关功率元件，能实现性能价格比较高的逆变电源，由于S G 3 5 2 5具有直接驱动功率场效应管的能力(图7)并具有内部基准源和运算放大器和欠压保护功能，因此其外围电路很简单。

2、正弦波输出的逆变电源控制集成电路

正弦波输出的逆变电源，其控制电路可采用微处理器控制，如INTEL公司生产的80C196MC、摩托罗拉公司生产的MP16以及MI—CROCHIP公司生产的PIC16C73等，这些单片机均具有多路P W M发生器，并可设定上、上桥臂之间的死区时间，采用INTEL公司80C196MC实现正弦波输出的电路如图8所示，80C196MC完成正弦波信号的发生，并检测交流输出电压，实现稳压。

五、逆变电源主电路功率器件的选择

逆变电源的主功率元件的选择至关重要，目前使用较多的功率元件有达林顿功率晶体管(B J T)，功率场效应管(M O S F E T)，绝缘栅晶体管(I G B T)和可关断晶闸管(G T O)等，在小容量低压系统中使用较多的器件为M O S F E T，因为M O S F E T具有较低的通态压降和较高的开关频率，在高压大容量系统中一般均采用I G B T模块，这是因为M O S F E T随着电压的升高其通态电阻也随之增大，而I G B T在中容量系统中占有较大的优势，而在特大容量(1 0 0 K V A以上)系统中，一般均采用G T O作为功率元件。

17. 平板玻璃工业新技术

在平板玻璃原片制造技术上，目前国外还看不出有什么新的、更好的方法能够取代浮法成形工艺，但浮法技术仍将继续完善和提高。

1、超薄技术

对玻璃带施加纵向——横向拉力是生产浮法超薄玻璃的惟一方法。美国专利 4349642, 43548661; 英国专利 101pe13, 1313743; 俄罗斯专利 775997, 367685, 485079 在超浮法线上得到采用。

无色透明优质超薄玻璃是生产 ITO 膜玻璃的重要材料之一, 目前该产品正走向国际国内市场, 产品供不应求。不少国家的玻璃制造商早已看到这个有利的商机, 纷纷将原有的个别生产线改成超薄玻璃生产线。英国皮尔金顿公司将一条较小的浮法线改成在线镀膜超薄玻璃生产线, 可生产 0.4—1.1 毫米的薄玻璃, 板面的平整度极佳, 微波纹起伏只有 30—50 纳米。

2、浮法玻璃退火窑辊道技术新进展。

在退火窑的热端, 不同的方法决定解决辊印所采用的两条途径明显不同。一条是开发一种非常硬的应用于金属辊的陶瓷表面涂层, 它易于清洁并恢复到光滑的抛光表面, 而且能应用于退火窑在线清理设备中。另一条是开发一种能阻止表面附着物形成的辊道包覆材料。目前所用的主要是热惯性低的铝硅酸盐或钙硅酸盐纤维辊道包覆材料。但还要研究解决陶瓷纤维包覆材料内(目前无法避免)的‘渣粒’钢包覆材料提前退化问题。

3、在线镀膜技术

发达国家在浮法线上成功地开发了在线金属化合物热解镀膜技术, 化学汽相沉积镀膜技术、电浮法镀膜技术、低辐射镀膜技术。英国、法国、比利时等国能在线生产玻璃镜。富氧燃烧、喷泉、富氧空气补给、纯氧燃烧助燃、全部纯氧燃烧 5 种形式正成为标准技术, 正不断完善发展下去。

4、一窑两线发展

国际玻璃商为适应市场需求, 节约能源, 控制生产总量, 防止积压, 设计建成了一窑两线(两个品种)的生产方式。美国加迪安公司获悉国际市场的建筑商们仍对压花玻璃有可观的需求量, 公司在美国南卡罗来纳州的浮法玻璃工厂立即进行技术改造使之成为一窑两线, 改造后的 600t / d 级浮法线新增设 100t / d 压花玻璃生产线, 可同时生产浮法玻璃及压花玻璃。美国另一家公司为占领阿拉伯国家对压花玻璃的需求市场, 已在沙特建设 550t / d 级浮法线的同时, 并设计建有 100t / d 级压花玻璃线。日本旭硝子玻璃公司在国内建设一条 500t / d 的浮法

玻璃生产线的同时，也设计建造 100t / d 级压花玻璃生产线。欧洲的玻璃制造商也在改造建设浮法及压延的一赛两线生产线。

5、节能工艺

用严格控制热交换、设备配置的标准化、玻璃带的加宽等方法可以大大提高浮法工艺的生产能力和经济效益。传统工艺规定在锡槽的头部和中部区域加热，在尾部区域强烈冷却。新的观点则要求锡槽中的热交换调节不仅要减小加热功率，而且要减小冷却强度，这样可保持热量平衡。为此而采用更为准确调节锡槽热制度的新方法；例如采用安置在锡槽窥孔口的专用加热器以及可调节选择温度工艺冷却器等。

6、环保技术

玻璃熔窑废气中的硫氧化物 SO_x、氮氧化物 NO_x 和烟尘是污染大气环境的主要有害成分。为了保护大气环境，国际上许多国家相继制定了严格的玻璃熔窑废气排放标准和相应的排污收费标准，建立了较为完善的环保管理体系，对 SO_x、NO_x 和烟尘等有害物质的排放作了严格限制，有关玻璃生产企业积极开发和推广应用新的玻璃熔窑废气治理技术。

1、静电除尘技术：静电除尘器有板状和管状两种。

2、降低硫氧化物排放量的技术：硫氧化物 SO_x 主要指 SO₂ 和 SO₃，可与碱性吸收剂反应而生成硫酸盐和亚硫酸盐。废气脱硫，根据吸收工艺的不同，可以分为湿法、干法和半干法等。

3、降低氮氧化物排放量的技术：氮氧化物 NO_x 主要指 NO 和 NO₂。一次治理措施：
（1）氧助燃技术；（2）分层燃烧技术；（3）采用低的空气过剩系数；（4）选用低氧喷枪。

二次治理措施：（1）3R 技术；（2）选择性催化还原法；（3）非催化选择性还原法。

7. 深加工玻璃新品种

1、利用太阳能发电的平板玻璃

与平板玻璃有关的太阳能发电系统有两类。第一类，是在单体建筑物的屋顶和幕墙上安装的光伏发电系统。它是利用硅光电池、硒光电池、碲光电池等在阳光照射下能产生一定向电动势（p 光伏效应）的半导体元件，拼接粘合在超透明平

板玻璃上成为光电板，将光能转换成电能并经整流、升压后供建筑物内部直接使用。第二类是大面积集热式太阳能发电系统。由以色列索米尔公司开发成功的以太阳能作为热源带动传统的大型蒸汽涡轮发电机发电的新型太阳能技术，就是以数座通体透明的大型玻璃建筑物作为集热装置的。

2、电致变色玻璃窗

近 10 年来，美国、英国、意大利、德国及其他国家就最新的玻璃产品——电致变色玻璃窗进行了深入广泛的研究并获得了令人满意的结果。起初，此种玻璃窗主要是为汽车工业而开发的。最近，人们又开始探讨此种玻璃窗的大规格化及在建筑上的应用。

尽管此种玻璃窗还没有完全实现工业化生产，但具有很好的市场前景。在采用液态氧化还原材料的电致变色玻璃窗方面，提高了固化电解质和离析还原技术。含有固态电致变色层的电致变色玻璃窗，在固态电解质、高于储存层和电致变色膜方面也有了改进。目前，已推出了新型的电致变色玻璃窗，即用户控制型电致变色玻璃窗。

3、信息产业玻璃

CD 玻璃（玻璃光盘）、HDMD（PC 用玻璃磁盘）、STN（超扭曲向列型）液晶显示器玻璃、TFT 薄膜液晶显示器玻璃、PDP 等离子显示板、ELD 场致发光显示板、VFD 真空荧光显示板、TCD 热致变色调光玻璃。DPS 微粒子分极配向玻璃、BM 彩色滤光玻璃。

18. 热壁外延（HWE）在导电玻璃上生长 GaAs 薄膜

引言

目前，太阳电池应用最大的障碍就是成本高，世界商品化生产的太阳电池主要是单晶硅、多晶硅和非晶硅电池。其中非晶硅电池成本较低，但功率衰减严重，性能不够稳定，至今未能很好解决。单晶硅和多晶硅电池的转换效率高、性能稳定、工艺比较成熟，但因所用的单晶硅和多晶硅均为间接带隙材料，对光的吸收系数较低，需要较大的厚度才能有效吸收太阳光，材料的费用相对较高，成本难以大幅度降低。

以国产单晶硅太阳电池在昆明地区（太阳能辐射资源中偏上）发电为例，按系统价 45 元/W_p 计算，寿命 20 年，其发电成本为 1.45 元/kWh，与昆明市电价

0.4 元/kWh 相比，成本仍然过高，加之建成太阳能发电站的初期投资大，这便成为地面推广应用的巨大障碍。

本文主要阐述 GaAs 薄膜太阳能电池的利用前景和利用 HWE 方法在导电玻璃上生长 GaAs 薄膜取得的成果。

1 薄膜太阳能电池的现状

国际上目前相对成熟的多晶薄膜太阳能电池主要有 CdS/CuInSe₂ 和 CdS/CdTe 薄膜太阳能电池。其中前者的实验室光电转换效率达 18%，后者的转换效率达 16%[1]。目前均有小规模的生产。商品太阳能电池的效率一般为 8%—10%。CdS/CuInSe₂ 薄膜太阳能电池一般采用多元真空蒸发工艺制备，工艺较为复杂，成品率不很高。CdS/CdTe 薄膜太阳能电池效率最高的是采用近距离升华

(close-spaced sublimation) 法制备[2]，该太阳能电池存在的主要问题是大规模采用后，Cd 的环境污染需要解决。

2 光伏电池所面临的问题和提出的解决方案

低成本、长寿命光伏电池需解决的关键科学问题：首先是研制能稳定获得高效率且低成本的半导体材料；其次，能用低成本的工艺路线生产这种光伏电池。经研究，我们认为：单晶和多晶薄膜 GaAs 材料加上低成本的光伏电池生产工艺路线能满足这两点要求，这是由于：

a) GaAs 的禁带宽度在 1.424eV (300K) [3]，能与太阳光较好地匹配，相应也就有好的高温工作特性和高的光电转换效率（目前单晶 GaAs 太阳能电池光电转换效率已达到 25%，叠层太阳能电池转换效率达 30%）；

b) GaAs 为直接带隙跃迁半导体材料，吸收系数大，5 μm 的厚度即可吸收 95% 以上的可利用太阳光，因而可以作为薄膜太阳能电池，大幅度降低材料成本。与目前的 GaAs 电池相比，其材料成本可降低 100 倍；

c) 单晶或多晶 GaAs 薄膜电池，其抗辐照性能好、寿命长，稳定性有可靠的保证。

虽然 GaAs 材料的价格昂贵，但对于 GaAs 薄膜太阳能电池，由于 GaAs 层很薄，所以需材料很少，价格并不高。例如制成 GaAs/Si 叠层太阳能电池，组件成本可大

幅度下降，是一种很有希望的廉价太阳电池。美国能源部目前已经将高效 GaAs 叠层太阳电池列为地面应用太阳电池的关键技术之一来进行攻关。

3 GaAs/Glass 的利用前景

对于空间用太阳电池，要求其具有高的效率，轻的重量和高的抗辐射能力。为了获得高效率，III-V 族材料的串连结构如 In_{0.5}Ga_{0.5}P 在 GaAs 或 Ge 衬底上生长的外延层已经被采用。太阳电池用这些 III-V 族半导体材料比用 Si 半导体材料有更好的抗辐射力。为了进一步提高抗辐射能力使用时必需在裸电池表面贴耐辐射的石英玻璃盖片。但总的结果将大大增加太阳电池的总重量。

空间用太阳电池现在已经达到商业应用阶段而不是初期的科学或军用阶段。降低空间用太阳电池的成本就成了最重要的问题。因此空间太阳电池除了上面所提及的要求外还应该是低成本的。然而，目前的 GaAs 单晶半导体材料是很贵的。加之，很厚的衬底通常对于光伏效应是多余的，因为 III-V 族半导体对太阳辐射波长有相对高的吸收系数，几微米的厚度对一个太阳电池就足够了。

直接在掺铈的耐辐射的石英玻璃盖片上生长 III-V 族半导体薄膜电池将有望实现所有的要求。这也推进了下面的情况：不使用造价高的半导体衬底；这种结构成减轻了所用太阳电池的整体。此外，这种积成工艺会大大降低太阳电池板成本。

4 HWE 生长 GaAs 薄膜的意义

目前，国外采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD)、液相外延 (LPE) 和分子束外延 (MBE) 生长技术，已经在 Si 衬底表面制成高质量单晶 GaAs 薄膜，采用多层结构可以进一步提高转换效率，例如 1988 年美国研制成的高效叠层多结太阳电池，转换效率高达 40%，德国夫朗和费实验室制作的叠层 GaAs/Si 太阳电池光电转换效率已达到 36% (AM0, 300K)。此外，利用化学束外延 (CBE) 在低温条件下，已经可以在玻璃衬底上生长 GaAs 多晶薄膜材料。

云南师范大学太阳能研究所则利用热壁外延 (HWE) 的方法在导电玻璃上直接生长 GaAs 薄膜。经电子探针 (EPMA)、X 射线衍射 (XRD)、Raman 散射光谱 (RSS) 和荧光光谱 (PL) 分析其结构特性、电学特性和光学特性，结果表明所制薄膜表面致密均匀、呈绒面结构，晶粒尺寸较大。薄膜的衍射峰符合标准光谱分布、半宽高仅为 80nm，为高质量结晶薄膜，因此采用 HWE 生长的 GaAs 薄膜有

好的结构特征结晶质量，适合作为太阳电池的衬底材料。加之这种方法最大的优点是，设备简单、稳定性高、操作简便，在较低的温度下就可以生长得到 GaAs 薄膜。这样，较之其它方法来看，利用 HWE 来生长 GaAs 薄膜更有利于降低整个太阳电池的成本。因此有望成为今后高效、廉价太阳电池材料的候选材料，具有很好的发展前景。

19. 科普知识： 太阳能光伏知识

1、太阳能电池发电原理：太阳电池是一种对光有响应并能将光能转换成电力的器件。能产生光伏效应的材料有许多种，如：单晶硅，多晶硅，非晶硅，砷化镓，硒锢铜等。它们的发电原理基本相同，现已晶体硅为例描述光发电过程。P 型晶体硅经过掺杂磷可得 N 型硅，形成 P-N 结。

如图 1 所示。

用文字图描述如下：

当光线照射太阳电池表面时，一部分光子被硅材料吸收；光子的能量传递给了硅原子，使电子发生了越迁，成为自由电子在 P-N 结两侧集聚形成了电位差，当外部接通电路时，在该电压的作用下，将会有电流流过外部电路产生一定的输出功率。这个过程的的实质是：光子能量转换成电能的过程。

2、晶体硅太阳能电池的制作过程：“硅”是我们这个星球上储藏最丰富的材料之一。自从上个世纪科学家们发现了晶体硅的半导体特性后，它几乎改变了一切，甚至人类的思维，20 世纪末，我们的生活中处处可见“硅”的身影和作用，晶体硅太阳电池是近 15 年来形成产业化最快的。生产过程大致可分为五个步骤：a) 提纯过程 b) 拉棒过程 c) 切片过程 d) 制电池过程 e) 封装过程。如下图所示：

3、太阳电池的应用：上世纪 60 年代，科学家们就已经将太阳电池应用于空间技术——通信卫星供电，上世纪末，在人类不断自我反省的过程中，对于光伏发电这种如此清洁和直接的能源形式已愈加亲切，不仅在空间应用，在众多领域中也大显身手。如：太阳能庭院灯，太阳能发电户用系统，村寨供电的独立系统，光伏水泵（饮水或灌溉），通信电源，石油输油管道阴极保护，光缆通信泵站电

源,海水淡化系统,城镇中路标、高速公路路标等。在世纪之交前后期间,欧美等先进国家光伏发电并入城市用电系统及边远地区自然村落供电系统纳入发展方向。太阳电池与建筑系统的结合已经形成产业化趋势。光伏电源系统的组成:

a) 直流负载系统

b) 交流负载系统.

4、太阳电池基本性质: a) 光电转换效率 $\eta\%$: 评估太阳电池好坏的重要因素。目前: 实验室 $\eta \approx 24\%$, 产业化: $\eta \approx 15\%$ 。 b) 单体电池电压 V : 0.4V—0.6V 由材料物理特性决定。 c) 填充因子 $FF\%$: 评估太阳电池负载能力的重要因素。

几何意义用 I-V 曲线图来表示:

阴影部分为负载面积, 填充因子的数学表达形式:

$$FF = (I_m * V_m) / (I_{sc} * V_{oc})$$

其中: I_{sc} —短路电流, V_{oc} —开路电压, I_m —最佳工作电流, V_m —最佳工作电压;

d) 标准光强与环境温度 地面: AM1.5 光谱, $1000W/m^2$, $t=25^\circ C$; e) 温度对电池性质的影响。例如: 在标准状况下, AM1.5 光强, $t=25^\circ C$ 某电池板输出功率测得为 $100W_p$, 如果电池温度升高至 $45^\circ C$ 时, 则电池板输出功率就不到 $100W_p$ 。

5. 太阳能“光—电转换”: 一束光照在半导体上和照在金属或绝缘体上效果截然不同。由于金属中自由电子如此之多, 以致光引起的导电性能的变化完全可忽略。绝缘体在很高温度下仍未能激发出更多的电子参加导电。而导电性能介于金属和绝缘体之间的半导体对体内电子的束缚力远小于绝缘体, 可见光的光子能量就可以把它从束缚激发到自由导电状态, 这就是半导体的光电效应。当半导体内局部区域存在电场时, 光生载流子将会积累, 和没有电场时有很大区别, 电场的两侧由于电荷积累将产生光电电压, 这就是光生伏特效应, 简称光伏效应。太阳电池就是利用这种效应制成的。

当太阳光照射到半导体上时, 其中一部分被表面反射掉, 其余部分被半导体吸收或透过。被吸收的光, 当然有一些变成热, 另一些光子则同组成半导体的原子价电子碰撞, 于是产生电子—空穴对。这样, 光能就以产生电子—空穴对的形

式转变为电能、如果半导体内存在 P—n 结，则在 P 型和 n 型交界面两边形成势垒电场，能将电子驱向 n 区，空穴驱向 P 区，从而使得 n 区有过剩的电子，P 区有过剩的空穴，在 P—n 结附近形成与势垒电场方向相反的内电场。光生电场的一部分除抵消势垒电场外，还使 P 型层带正电，n 型层带负电，在 n 区与 p 区之间的薄层产生所谓光生伏打电动势。若分别在 P 型层和 n 型层焊上金属引线，接通负载，则外电路便有电流通过。如此形成的一个个电池元件，把它们串联、并联起来，就能产生一定的电压和电流，输出功率。

制造太阳电池的半导体材料已知的有十几种，因此太阳电池的种类也很多。目前，技术最成熟，并具有商业价值的太阳电池要算硅太阳电池。

所以，将入射太阳光能转换成电能的半导体器件称为太阳能电池。它一般由两种不同导电类型的同质或异质半导体构成。目前，在空间或地面获得应用的只有硅电池，研究得比较成熟的还有砷化镓电池、硫化镉电池。硅太阳能电池是 1954 年由美国皮尔逊等人首次制成，1958 年首次应用在“先锋 1 号”卫星上。1958 年，我国亦开始研究太阳能电池，在 1971 年 3 月发射的科学实验卫星上首次应用，随着硅电池制造成本的逐年降低和技术的日益成熟，太阳能电池必将获得更广泛的应用。

6. 太阳能电池的应用的主要领域：

1. 用户太阳能电源：（1）小型电源 10-100W 不等，用于边远无电地区如高原、海岛、牧区、边防哨所等军民生活用电，如照明、电视、收录机等；（2）3-5KW 家庭屋顶并网发电系统；（3）光伏水泵：解决无电地区的深水井饮用、灌溉。

2. 交通领域：如航标灯、交通/铁路信号灯、JJ 示/标志灯、路灯、高空障碍灯、高速公路/铁路无线电话亭、无人值守道班供电等。

3. 通讯/通信领域：太阳能无人值守微波中继站、光缆维护站、广播/通讯/寻呼电源系统；农村载波电话光伏系统、小型通信机、士兵 GPS 供电等。

4. 石油、海洋、气象领域：石油管道和水库闸门阴极保护太阳能电源系统、石油钻井平台生活及应急电源、海洋检测设备、气象/水文观测设备等。

5. 家庭灯具电源：如庭院灯、路灯、手提灯、野营灯、登山灯、垂钓灯、黑光灯、割胶灯、节能灯等。

6. 光伏电站：10KW-50MW 独立光伏电站、风光（柴）互补电站、各种大型停车厂充电站等。

7. 太阳能建筑：将太阳能发电与建筑材料相结合，使得未来的大型建筑实现电力自给，是未来一大发展方向。

8. 其他领域包括：（1）与汽车配套：太阳能汽车/电动车、电池充电设备、汽车空调、换气扇、冷饮箱等；（2）太阳能制氢加燃料电池的再生发电系统；（3）海水淡化设备供电；（4）卫星、航天器、空间太阳能电站等。

目前美国、欧洲各国特别是德国及日本、印度等都在大力发展太阳电池应用，开始实施的“十万屋顶”计划、“百万屋顶”计划等，极大地推动了光伏市场的发展，前途十分光明。

7. 什么是太阳能电池？有哪些分类？

太阳能电池是通过光电效应或者光化学效应直接把光能转化成电能的装置。以光电效应工作的薄膜式太阳能电池为主流，而以光化学效应工作的式太阳能民池则还处于萌芽阶段。太阳 光照在半导体 p-n 结上，形成新的空穴由-电子对。在 p-n 结电场的作用下，空穴由 n 区流向 p 区，电子由 p 区流向 n 区，接通电路后就形成电流。这就是光电效应太阳能电池的工作原理。太阳能电池按结晶状态可分为结晶系薄式和非结晶系膜式(以下表示为 a-)两大类，而前者又分为单结晶形和多结晶形。

按材料可分类硅薄膜形、化合物半导体薄膜形和有机薄膜形，百化合物半导体薄膜形又分为非结晶形(a-Si:H, a-Si:H:F, a-SixGel-x:H 等)、IIIIV 族(GaAs, InP)、II VI族(cds 系)和磷化锌(Zn3P2)等。

8. 太阳能电池：

太阳能电池是利用电池将光的能量直接转变成电能，太阳光是宇宙取之不尽，用之不竭的天然能源，又具安全、方便及无污染的特性，故太阳能再生能源的开发利用有其必要性。

太阳能电池的种类：太阳能电池的种类有单晶硅及非晶硅、多晶硅三大类，而目前市场应用上大多为单晶硅及非晶硅。（1）单晶硅太阳电池，单晶硅电池最普遍，多用於发电厂、充电系统、道路照明系统及交通号志等，所发电力与电压范围广，转换效率高，使用年限长，世界主要大厂，如德国西门子、

英国石油公司及日本夏普公司均以生产此类单晶硅太阳能电池为主，市场占有率约五成，单晶硅电池效率从 11%~24%，太空级（蒸镀式）晶片从 16%~24%，当然效率愈高其价格也就愈贵。（2）多晶硅太阳电池，多晶硅电池的效率较单晶硅低，但因制程步骤较简单，成本亦低廉，较单晶硅电池便宜 20%，因此一些低功率的电力应用系统均采用多晶硅太阳电池。

9. 太阳光发电和太阳热发电：

地球所接受的太阳能功率，平均每平方米为 1353 千瓦，这就是所谓的“太阳常数”。也就是说，太阳每秒钟照射到地球上的能量约为 500 万吨煤当量。就是这些能量比目前全世界人类的能耗量大 3.5 万倍。虽然很久以来，人们在不同程度地利用着其能量，最近，热水器的直接利用，空调、太阳能电池的电力供给以及太阳能住房等方面都有了很大发展。很自然的想法是向太阳要电能，但怎样有效的利用太阳所恩赐的能量，使其成为下世纪的一大可利用能源，是新能源开发中的一个重要课题。

太阳能转换为电能有两种基本途径：一种是把太阳辐射能转换为热能，即“太阳热发电”；另一种是通过光电器件将太阳光直接转换为电能，即“太阳光发电”。太阳热发电，全世界以以色列的技术最为先进。吸取加州的技术，巴西、印度、摩洛哥正在计划进行设备的建设，世界银行已开始提供资金给开发中的国家。入射到地球表面的太阳能是广泛而分散的，要充分收集并使之发挥热能效益，就必须采取一种一种能把太阳光发射并集中在一起，变成热能的系统。一种方法是采取一种能把太阳光发射并集中集中加热，转换为高温水蒸气，以蒸汽涡轮机变换为电。也可以采用抛物面型的聚光镜将太阳热集中，使用计算机让聚光镜追随太阳转动。后者的热效率很高，将引擎放置在焦点的技术发展的可能性最大。

除了太阳热发电技术外，目前人类社会也在大力开发太阳光技术。太阳辐射的光子带有能量，当光子照射半导体材料时，光能便转换为电能，这个现象叫“光生伏打效应”。太阳电池就是利用光生伏打效应制成的一种光电器件。太阳电池与普通的化学电池（干电池、蓄电池）完全不同，是一种物理性质电源。虽然太阳光一照射太阳电池就能发电，但它与一般的发电机大相径庭，它无旋转和磨损，能静悄悄地发电。

10. 太阳能电源的研究设计:

水情遥测系统采集数据测量站点不少处于交通不便、无电网供电的地方。为设计一点二址的水情遥测系统中,对其中的一站点电源设计选用太阳能对蓄电池进行补充的电源方案。

首先,数据采集仪器应采用低功耗的。

其次,选择的太阳能发电板和蓄电池应是经济、可靠性的。既要防止太阳能发电板在阴雨期容量不够,达不到测量目的,又要避免容量过大,造成浪费。

一、关于硅太阳能发电板容量

硅太阳能发电板容量是指平板式太阳能板发电功率 W_P 。太阳能发电功率量值取决于负载 24 h 所消耗的电力 $H = WH$, 由负载额定电源与负载 24 h 所消耗的电力,决定了负载 24 h 消耗的容量 $P = AH$, 再考虑到平均每天日照时数及阴雨天造成的影响,计算出太阳能电池阵列工作电流 $I_P = A$ 。

由负载额定电源,选取蓄电池公称电压,由蓄电池公称电压来确定蓄电池串联个数及蓄电池浮充电压 $V_F = V$, 再考虑到太阳能电池因温度升高而引起的温升电压 $V_T = V$ 及反充二极管 P-N 结的压降 $V_D = V$ 所造成的影响,则可计算出太阳能电池阵列的工作电压 $V_P = V$, 由太阳能电池阵列工作电源 $I_P = A$ 与工作电压 $V_P = V$, 便可决定平板式太阳能板发电功率 $W_P = W$, 从而设计出太阳能板容量,由设计出的容量 W_P 与太阳能电池阵列工作电压 V_P , 确定硅电池平板的串联块数与并联组数。

太阳能电池阵列的具体设计步骤如下:

1. 计算负载 24 h 消耗容量 P :

$$P = H / V$$

V —— 负载额定电源

2. 选定每天日照时数 $T = H$ 。

3. 计算太阳能阵列工作电流。

$$I_P = P (1 + Q) / T$$

Q —— 按阴雨期富余系数,

$$Q = 0.21 \sim 1.00$$

4. 确定蓄电池浮充电压 V_F 。

镉镍 G N 和铅酸 C S 蓄电池的单体浮充电压分别为 1.4 ~ 1.6 V 和 2.2 V。

5. 太阳能电池温度补偿电压 V T。

$$V T = 2.1 / 430 (T - 25) V F$$

6. 计算太阳能电池阵列工作电压 V P。

$$V P = V F + V D + V T$$

其中 V D = 0.5 ~ 0.7

约等于 V F

7. 太阳能电池阵列输出功率 W P (平板式太阳能电板)。

$$W P = I P \times U P$$

8. 根据 V P、W P 在硅电池平板组合系列表格, 确定标准规格的串联块数和并联组数。

二、关于蓄电池的容量计算

蓄电池的容量由下列因素决定:

1. 蓄电池单独工作天数。在特殊气候条件下, 蓄电池允许放电达到蓄电池所剩容量占正常额定容量的 20%。

2. 蓄电池每天放电量。对于日负载稳定且要求不高的场合, 日放电周期深度可限制在蓄电池所剩容量占额定容量的 80%。

3. 蓄电池要有足够的容量, 以保证不会因过充电所造成的失水。一般在选蓄电池容量时, 只要蓄电池容量大于太阳能发电板峰值电流的 2.5 倍, 则蓄电池在充电时就不会造成失水。

4. 蓄电池自身漏掉的电能, 随着电池使用时间的增长及电池温度的升高, 自放电率会增加。对于新的电池自放电率通常小于容量的 5%, 但对于旧的质量不好的电池, 自放电率可增至每月 10% ~ 15%。

在水情遥测系统中, 连续阴雨天的长短决定了蓄电池的容量, 由遥测设备在连续阴雨天中所消耗能量 (安时数 加上 20% 因子, 再加上 10% 电池自放电能 (安时数)) 便可计算出蓄电池的容量源。

按照两种容量方案的计算, 作者计算完成了太阳能电源的设计:

1. 测站的主要参数:

每隔 5 m i n 发射一次数据，发射时间 2 s e c ；

发射机输入电压 D C 1 3 . 8 V ， 输出电流 5 A ；

当地日照时数 7 ~ 8 h 。

2 . 测站蓄电池容量经计算得出为 3 8 A H 。

3 . 测站太阳能电池容量阵列输出功率 W P W 为 2 5 ~ 3 5 w 。

综合以上结果，太阳能电源设计值为：

蓄电池：采用铅酸蓄电池，容量 3 8 A H ，采用 2 个容量 2 0 A H 并联形式；
太阳能电池阵列：输出功率 2 5 ~ 3 5 W ，采用标准块板输出容量 2 5 ~ 3 8 W ，
一块正好。

三、太阳能电源安装使用中注意的问题

1 . 阵列板选择安装在周围无高大建筑物、树木、电线杆等无遮挡太阳光和避风处。

2 . 太阳能电池阵列板配套的蓄电池在第一次使用时，要先充电到额定容量，不可过充或过放。

3 . 注意定期的维护工作。此电源系统经济可靠，安装方便，利于维护，在实践中取得了满意的效果。

11. 地面太阳电池发电系统：太阳电池发电系统（又称光伏发电系统），按其使用场所不同，可分为空间应用和地面应用两大类。在地面可以作为独立的电源使用，也可以与风力发电机或柴油机等组成混合发电系统，还可以与电网联接，向电网输送电力。目前应用比较广泛的光伏发电系统主要是作为地面独立电源使用。

通常的独立光伏发电系统主要由太阳电池方阵、蓄电池、控制器以及阻塞二极管组成，其作用分别如下：

太阳电池方阵 方阵的作用是将太阳辐射能直接转换成电能，供给负载使用。一般由若干太阳电池组件按一定方式连接，再配上适当的支架及接线盒组成。

蓄电池组 蓄电池组是太阳电池方阵的储能装置，其作用是将方阵在有日照时发出的多余电能贮存起来，在晚间或阴雨天供负载使用。在光伏发电系统中，蓄电池处于浮充放电状态，夏天日照量大，除了供给负载用电外，还对蓄电池充电；在冬天日照量少，这部分贮存的电能逐步放出，在这种季节性循环的基础上

还要加上小得多的日循环,白天方阵给蓄电池充电,(同时方阵还要给负载用电),晚上则负载用电全部由蓄电池供给。因此,要求蓄电池的自放电要小,而且充电效率要高,同时还要考虑价格和使用是否方便等因素。常用的蓄电池有铅酸蓄电池和硅胶蓄电池,要求较高的场合也有价格比较昂贵的镍镉蓄电池。

控制器 在不同类型的光伏发电系统中控制器各不相同,其功能多少及复杂程度差别很大,需根据发电系统的要求及重要程度来确定。控制器主要由电子元器件、仪表、继电器、开关等组成。在简单的太阳电池,蓄电池系统中,控制器的作用是保护蓄电池,避免过充,过放。若光伏电站并网供电,控制器则需要有自动监测、控制、调节、转换等多种功能。如果负载用的是交流电,则在负载和蓄电池间还应配备逆变器,逆变器的作用就是将方阵和蓄电池提供的低压直流电逆变成 220 伏交流电,供给负载使用。

阻塞二极管 也称作为反充二极管或隔离二极管,其作用是利用二极管的单向导电性阻止无日照时蓄电池通过太阳电池方阵放电。对阻塞二极管的要求是工作电流必须大于方阵的最大输出电流,反向耐压要高于蓄电池组的电压。在方阵工作时,阻塞二极管两端有一定的电压降,对硅二极管通常为 $0.6 \sim 0.8$;肖特基或锗管 0.3V 左右。

12. 太阳能利用技术:人类直接利用太阳能有三大技术领域,即光热转换、光电转换和光化学转换,此外,还有储能技术。

太阳能化学转换包括:光合作用、光电化学作用、光敏化学作用及光分解反应,目前该技术领域尚处在实验研究阶段。

太阳光电转换,主要是各种规格类型的太阳电池板和供电系统。

太阳电池是把太阳光直接转换成电能的一种器件。

太阳电池的光电效率约 $10 - 14\%$,其产品类型主要有单晶硅、多晶硅和非晶硅。国内产品(指光电装置全部费用)价格约 $60 - 80$ 元/峰瓦。

太阳电池的应用范围很广。例如人造卫星、无人气象站、通讯站、电视中继站、太阳钟、电围杆、黑光灯、航标灯、铁路信号灯等。

太阳光热转换技术的产品最多。例如热水器、开水器、干燥器、采暖和制冷、温室与太阳房、太阳灶和高温炉、海水淡化装置、水泵、热力发电装置及太阳能医疗器具。

13. 光伏发电的发展历史和现状：自从 1954 年第一块实用光伏电池问世以来，太阳光伏发电取得了长足的进步。但比计算机和光纤通讯的发展要慢得多。其原因可能是人们对信息的追求特别强烈，而常规能源还能满足人类对能源的需求。1973 年的石油危机和 90 年代的环境污染问题大大促进了太阳光伏发电的发展。其发展过程简列如下：

- 1893 年 法国科学家贝克勒尔发现“光生伏打效应”，即“光伏效应”。
- 1876 年 亚当斯等在金属和硒片上发现固态光伏效应。
- 1883 年 制成第一个“硒光电池”，用作敏感器件。
- 1930 年 肖特基提出 Cu_2O 势垒的“光伏效应”理论。同年，朗格首次提出用“光伏效应”制造“太阳电池”，使太阳能变成电能。
- 1931 年 布鲁诺将铜化合物和硒银电极浸入电解液，在阳光下启动了一个电动机。
- 1932 年 奥杜博特和斯托拉制成第一块“硫化镉”太阳电池。
- 1941 年 奥尔在硅上发现光伏效应。
- 1954 年 恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室，首次制成了实用的单晶太阳电池，效率为 6%。同年，韦克尔首次发现了砷化镓有光伏效应，并在玻璃上沉积硫化镉薄膜，制成了第一块薄膜太阳电池。
- 1955 年 吉尼和罗非斯基进行材料的光电转换效率优化设计。同年，第一个光电航标灯问世。美国 RCA 研究砷化镓太阳电池。
- 1957 年 硅太阳电池效率达 8%。
- 1958 年 太阳电池首次在空间应用，装备美国先锋 1 号卫星电源。
- 1959 年 第一个多晶硅太阳电池问世，效率达 5%。
- 1960 年 硅太阳电池首次实现并网运行。
- 1962 年 砷化镓太阳电池光电转换效率达 13%。
- 1969 年 薄膜硫化镉太阳电池效率达 8%。
- 1972 年 罗非斯基研制出紫光电池，效率达 16%。
- 1972 年 美国宇航公司背场电池问世。
- 1973 年 砷化镓太阳电池效率达 15%。
- 1974 年 COMSAT 研究所提出无反射绒面电池，硅太阳电池效率达 18%。

- 1975年 非晶硅太阳电池问世。同年，带硅电池效率达 6%~%。
- 1976年 多晶硅太阳电池效率达 10%。
- 1978年 美国建成 100kWp 太阳地面光伏电站。
- 1980年 单晶硅太阳电池效率达 20%，砷化镓电池达 22.5%，多晶硅电池达 14.5%，硫化镉电池达 9.15%。
- 1983年 美国建成 1MWp 光伏电站；冶金硅（外延）电池效率达 11.8%。
- 1986年 美国建成 6.5MWp 光伏电站。
- 1990年 德国提出“2000 个光伏屋顶计划”，每个家庭的屋顶装 3~5kWp 光伏电池。
- 1995年 高效聚光砷化镓太阳电池效率达 32%。
- 1997年 美国提出“克林顿总统百万太阳能屋顶计划”，在 2010 年以前为 100 万户，每户安装 3~5kWp。光伏电池。有太阳时光伏屋顶向电网供电，电表反转；无太阳时电网向家庭供电，电表正转。家庭只需交“净电费”。
- 1997年 日本“新阳光计划”提出到 2010 年生产 43 亿 Wp 光伏电池。
- 1997年 欧洲联盟计划到 2010 年生产 37 亿 Wp 光伏电池。
- 1998年 单晶硅光伏电池效率达 25%。荷兰 ZF 提出“荷兰百万个太阳光伏屋顶计划”，到 2020 年完成。

表 8-1 世界光伏电池总产量（1990-2000）

年份国家(地区)	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
美国	14.8	17.1	18.1	22.4	25.6	32.4	41.0	53.1	58.2	62.4	74.8
日本	16.8	19.9	18.6	18.7	17.5	19.5	20.5	34.0	47.5	86.0	128.7
欧洲	10.2	13.4	16.4	16.5	21.6	20.6	29.3	28.5	35.8	39.7	60.7
其它	4.7	5.0	4.8	4.4	6.0	7.5	8.5	9.4	16.3	19.2	23.5
总计	46.5	55.4	57.9	62.0	70.7	81.0	99.3	125	157.4	207.3	287.7

表 8-2 几种主要光伏电池效率发展状况(%)

年份	单晶硅光伏电池	非晶硅光伏电池	硒铟铜电池	砷化镓电池	DC/AC 逆变器效率
----	---------	---------	-------	-------	-------------

实验室 商业化 实验室 中批量 大批量 实验室 中批量 大批量 实验室 中批
 大批量

单电池 组件 中批量 大批量 单电池 组件 组件 单电池 组件 组件 单电池 组
 件 组件

1991 23 17.0 15.0 13 9 6 4 13.0 9.0 12.5 6.0 919498

1995 24 21.5 15.3 14 10 8 6 17.1 10.2 15.8 8.4 6

2000 25 22.0 18.0 15 13 10 10 20.0 13.0 10 18.0 10.0 9

表 8-3 光伏发电的光伏电的价格、组件效率，系统寿命和成本变化情况

年份 光伏电的价格(美分/kWh) 组件效率% 光伏系统寿命 a 光伏系统成本(美
 元/Wp)

1991 40~75 5~14 5~10 10~20

1995 25~50 7~17 10~20 7~15

2000 12~20 10~20 >20 3~7

2010~2030 <6 15~20 >30 1~1.5

表 8.1—8.3 表明，自 1996 年以来，世界光伏发电高速发展。表现在几种
 主要太阳能电池效率不断提高，总产量年增幅保持在 30%~40%，1998 年已达
 200MWp/a；应用范围越来越广，尤其是光伏技术的屋顶计划，为光伏发电展现了
 无限光明的前途。1998 年在维也纳第二届全球光伏技术大会上，会议主席施密
 特教授指出：“光伏将在 21 世纪上半纪取代原子能而成为全球能源，唯一的问
 题是 2030 年还是 2050 年最终实现”。如果施密特教授的预言得以实现，则太阳
 能世纪将在 21 世纪到来。

20. 科普童话：太阳公公发电

太阳公公慷慨地把他的光和热洒到地球上。有一棵小树，接受了太阳的礼物，长
 成了参天大树。一天，“轰隆隆”一片洪水排山倒海而来，这棵树和整片树林被
 埋到海底泥沙里了，在那里睡了好多好多年。等他醒来，发现海水没有了，自己
 已经变了样：浑身漆黑，绿衣裳早已不知到哪儿去了他变成了煤！

煤伤心地哭了：“呜呜，我怎么变成这副丑样子了！”

一天，这座山忽然变得热闹起来。煤听到了“轰轰”声和人的说话声。

“快出来吧！”矿工对他说，“我们要让你发电呢！”

于是，煤从地底下被挖出来了。

煤来到发电厂，果然发出电来。电灯亮了，机器转动了，人们都一个劲地夸他。煤觉得自己挺了不起，十分得意，就对太阳、风和海水说：“喂，朋友们，咱们比比谁的本领大，好吗？”

海水说：“比就比呗，我有数不尽的财宝。鱼虾在我的怀抱里生长；海中的盐、碘、钾、铀等矿物也多得很呢。”

风儿说：“我能推动帆船前进，还能帮助人们耕云播雨，调节气温。”

太阳也说：“我能给地球带来光和热。没有我，地球上的白天就变得和黑夜一样……”

煤慌忙打断他们的话说：“不算不算，咱们光讲一个：谁能使电灯亮起来。”

说着煤跳进炉里，烧得通红，放出大量的热，把锅炉里的水化成蒸气，推动汽轮发电机，使电灯发出亮光。

风和海水也显显自己的本领。“呼呼”风狂吼怒叫，挥舞着自己的大巴掌，把电线杆上的灯泡吹得摇来晃去，可是电灯并不亮；“哗哗”海水掀起十几米高的巨浪，把灯塔上的灯泡冲刷得没有一点儿灰尘，可是电灯也没亮。

风、海水都失败了，羞得说不出话来。海水赶紧拉上了天蓝色的面纱，风儿悄悄地躲了起来。

他们越想越不服气，经过商量，决定去请科学家帮助。

当科学家驾船行驶在海上时，海水用力推着他的船儿，请求道：“您也让我发电吧！”

科学家笑呵呵地答道：“我已经把礼物给你准备好了，瞧，这不是吗？我现在到海上来，就是要检查它好使不好使。”

可不是，海面上漂着一条没有底的“船”。这船上有一样东西，就像倒放的打气筒。它的活塞接在浮标上。科学家告诉海水，这是送给他的宝贝波力发电装置。海水掀起波浪，推动浮标，一会儿向上，一会儿落下。浮标带动活塞上下运动，压缩着空气，于是，一股股气流从喷嘴里喷了出来，推动汽轮机，带动了发电机。电灯亮了起来。

煤呆在炉子里，得知海水也能发电时，脸变得更红了，身子也烧得更瘦了。他自言自语说：“不管怎样，风是没法发电的，因为他是个不驯服的浪荡儿。”

风的确是个贪玩的孩子，从早到晚都在外面游逛，当他从陆地吹到海上时，看到了波力发电站。他气呼呼地推开了科学家的窗子，对科学家说：“您偏心眼！只帮助海水发电，为什么不帮我？”风觉得很委屈，呜呜呜地哭了。

科学家忙说：“别哭，别哭。你看山上那个大风车，就是我送给你的礼物。”

风朝远处的山头看去，那儿果然有一座玻璃钢制的大风车，安在高高的铁塔上，闪闪发光。

风又撒娇地嚷着：“不要，不要！谁要大风车！这个玩艺儿几百年前就已经有了，我曾推着它给人抽过水磨过面，它哪会发电！”

科学家告诉他：“这种风车跟古代的风车不同，它能发电。不信你试试！”

风半信半疑地推着风车的叶片，风车飞快地转动起来，带动发电机发电，电灯亮了。

煤怎么也不相信风能发电。他蹦出炉膛，见到远处高耸着的风力发电站，正气鼓鼓地发牢骚，忽然听到一个和蔼的声音说：“孩子，不要不服气！”

煤抬起头，发现和他说话的是太阳。他反问道：“孩子？谁是你的孩子？”

太阳笑眯了眼：“你是我的孩子，忘了吗？煤的能量，是从我这里得到并贮藏起来的。”

煤摇摇头说：“怎么可能呢！”

太阳告诉他，亿万年前，大森林里的树木，正是吸收了太阳的能量进行光合作用，才长大的。后来树木变成了煤，实际上是把太阳的能量贮存起来。说到底，煤发出的热量，是亿万年前太阳和能量转换来的。

听到这儿，煤眼珠一转说：“可是现在，你太阳能点亮电灯吗？”

“当然能喽！”又一个陌生的声音插了进来。原来是穿白大褂的科学家，他带着煤来到太阳能发电站。

这儿，集热塔高高地耸立着，聚光镜就像一个大炒菜锅。太阳把光照在上面，聚集起来，他的热量使锅里的水化成高温蒸气，推动汽轮机发电——这儿的电灯也亮了。

太阳又把他那金色的光辉煌照在一块块闪闪发亮的薄片上。这是科学家研究出来的硅太阳能电池。阳光照在上面，硅电池就发出了电，连在电池上的灯泡也亮起来了。

太阳耐心地问煤：“孩子，你都看到了么？”

煤低下了头：“太阳公公发电，比我简便得多也干净得多。还有海水和风，也不比我差呢！”

海水和风听到这话，也都高兴起来，他们手拉手大声嚷着：“其实我们也都是由于太阳照射着地球才出现的，太阳也是我们能量的源泉啊！”

大家一齐抬头看太阳。太阳眨眨眼，笑啦！

21. 太阳能电池的分类

太阳能光伏电池（简称光伏电池）用于把太阳的光能直接转化为电能。目前地面光伏系统大量使用的是以硅为基底的硅太阳能电池，可分为单晶硅、多晶硅、非晶硅太阳能电池。在能量转换效率和使用寿命等综合性能方面，单晶硅和多晶硅电池优于非晶硅电池。多晶硅比单晶硅转换效率略低，但价格更便宜。

按照应用需求，太阳能电池经过一定的组合，达到一定的额定输出功率和输出的电压的一组光伏电池，叫光伏组件。根据光伏电站大小和规模，由光伏组件可组成各种大小不同的阵列。

最早问世的太阳电池是单晶硅太阳电池。硅是地球上极丰富的一种元素，几乎遍地都有硅的存在，可说是取之不尽。用硅来制造太阳电池，原料可谓不缺。但是提炼它却不容易，所以人们在生产单晶硅太阳电池的同时，又研究了多晶硅太阳电池和非晶硅太阳电池，至今商业规模生产的太阳电池，还没有跳出硅的系列。其实可供制造太阳电池的半导体材料很多，随着材料工业的发展、太阳电池的品种将越来越多。目前已进行研究和试制的太阳电池，除硅系列外，还有硫化镉、砷化镓、铜铟硒等许多类型，举不胜举，这里仅选几种较常见的太阳电池作介绍。

单晶硅太阳电池：

单晶硅太阳电池是当前开发最快的一种太阳电池，它的结构和生产工艺已定

型，产品已广泛用于空间和地面。这种太阳电池以高纯的单晶硅棒为原料，纯度要求 99.999%。为了降低生产成本，现在地面应用的太阳电池等采用太阳能级的单晶硅棒，材料性能指标有所放宽。有的也可使用半导体器件加工的头尾料和废次单晶硅材料，经过复拉制成太阳电池专用的单晶硅棒。

单晶硅太阳电池的单体片制成后，经过抽查检验，即可按所需要的规格组装成太阳电池组件(太阳电池板)，用串联和并联的方法构成一定的输出电压和电流。

多晶硅太阳电池：

目前太阳电池使用的多晶硅材料，多半是含有大量单晶颗粒的集合体，或用废次单晶硅材料和冶金级硅材料熔化浇铸而成，然后注入石墨铸模中，待慢慢凝固冷却后，即得多晶硅锭。这种硅锭可铸成立方体，以便切片加工成方形太阳电池片，可提高材料利用率和方便组装。多晶硅太阳电池的制作工艺与单晶硅太阳电池差不多，其光电转换效率约 12 %左右，稍低于单晶硅太阳电池，但其材料制造简便，节约电耗，总的生产成本较低，因此得到大量发展。

非晶硅太阳电池：

非晶硅太阳电池是 1976 年出现的新型薄膜式太阳电池，它与单晶硅和多晶硅太阳电池的制作方法完全不同，硅材料消耗很少，电耗更低，非常吸引人。

非晶硅太阳电池的结构各有不同，其中有一种较好的结构叫 PiN 电池，它是在衬底上先沉积一层掺磷的 N 型非晶硅，再沉积一层未掺杂的 i 层，然后再沉积一层掺硼的 P 型非晶硅，最后用电子束蒸发一层减反射膜，并蒸镀银电极。此种制作工艺，可以采用一连串沉积室，在生产中构成连续程序，以实现大批量生产。同时，非晶硅太阳电池很薄，可以制成叠层式，或采用集成电路的方法制造，在一个平面上，用适当的掩模工艺，一次制作多个串联电池，以获得较高的电压。现在日本生产的非晶硅串联太阳电池可达 2.4 伏。非晶硅太阳电池存在的问题是光电转换率偏低，且不够稳定，所以尚未大量用作大型太阳能电源，多半用于如袖珍式电子计算器、电子钟表及复印机等方面。

多元化合物太阳电池：

多元化合物太阳电池指不是用单一元素半导体材料制成的太阳电池。现在各国研究的品种繁多，虽然大多数尚未工业化生产，但预示着光电转换的满园春色。

主要有硫化镉太阳电池、砷化镓太阳电池、铜铟硒太阳电池几种。

聚光太阳电池：

聚光太阳电池是降低太阳电池利用总成本的一种措施。它通过聚光器而使较大面积的阳光聚在一个较小的范围内，形成“焦斑”或“焦带”，并将太阳电池置于“焦斑”或“焦带”上，以增加光强，克服太阳辐射能流密度低的缺陷，从而获得更多的电能输出。通常聚光器的倍率大于几十，其结构可采用反射式或透镜式。聚光器的跟踪一般用光电自动跟踪。散热方式可以是气冷或水冷，有的与热水器结合，既获得电能，又得到热水。

用于聚光太阳电池的单体，与普通太阳电池略有不同，因需耐高倍率的太阳辐射，特别是在较高温度下的光电转换性能要得到保证，故在半导体材料选择、电池结构和栅线设计等方面都要进行一些特殊考虑。最理想的材料是砷化镓，其次是单晶硅材料。在电池结构方面，普通太阳电池多用平面结构，而聚光太阳电池常采用垂直结构，以减少串联电阻的影响。同时，聚光电池的栅线也较密，典型的聚光电池的栅线约占电池面积的10%，以适应大电流密度的需要。