

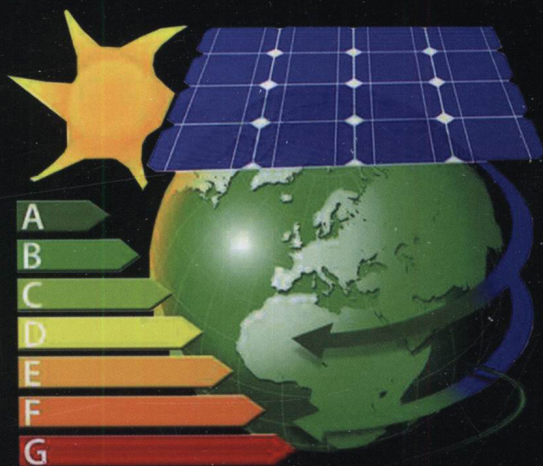
段光复 段伦 © 编著

薄膜太阳能电池 及其 光伏电站

BOMOTAIYANGDIANCHI

JIQI

GUANGFU DIANZHAN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

薄膜太阳电池及其光伏电站

段光复 段 伦 编著



机械工业出版社

本书是作者多年从事光伏事业的经验总结,介绍了薄膜太阳电池及其光伏电站,主要由上篇、中篇、下篇三部分组成,共19章。上篇从第三章至第十章共8章,介绍了非晶硅、铜铟镓硒、砷化镓、碲化镉四大薄膜电池的工作原理、设计、制造工艺及设备、检测技术及设备、所用各种原材料;中篇从第十一章至第十六章共6章,介绍了适用于海拔3000m的光伏电站的大型并网逆变器、薄膜太阳电池光伏电站、各种储存光伏电能的方法、太空光伏电站、智能电网和电能质量;下篇从第十七章至第十九章共3章,介绍了10MW沙漠电站实例、光伏建筑一体化及分布式发电。

薄膜太阳电池及其光伏电站的建设,其技术上升的空间还很大,其核心技术还需要进行艰苦的研发和不断的完善,作者提出了研发方向及可能实现的路径。

光伏产业的发展要依靠自我进步,从而降低成本,降到与火电相近的程度,作者也介绍了降低成本的途径。

作者力求把薄膜太阳电池的理论说透,实践道明,让广大读者不但知其然,还知其所以然,凡涉及的太阳电池及其光伏电站专业名词及概念,均可在书中找到注解,从而引导具有大专及以上文化人士对薄膜太阳电池快速地从不熟悉到精通。

本书面向从事薄膜太阳电池产业的研发者、设计者、技术人员、商人、官员、大专院校师生以及热爱光伏事业的人群。

图书在版编目(CIP)数据

薄膜太阳电池及其光伏电站/段光复,段伦编著. —北京:机械工业出版社,2013

ISBN 978-7-111-41872-6

I. ①薄… II. ①段…②段… III. ①薄膜太阳能电池②光伏电站
IV. ①TM914.4②TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第053721号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:曲彩云 责任编辑:曲彩云 王琪 张利萍

版式设计:霍永明 责任校对:刘志文

封面设计:赵颖喆 责任印制:张楠

中国农业出版社印刷厂印刷

2013年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·38.25印张·948千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-41872-6

定价:98.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

能源是人类社会生存和发展最重要的物质基础。能源有常规能源与新能源之分。常规能源如煤炭、石油、天然气，长期以来支撑和推动着人类社会的发展，但是常规能源有两大致命缺陷：一是近百年的大规模开采和使用，使它们日益枯竭，数量急剧减少，据统计，全世界煤炭可用 220 年，油气可用 60 年。因为常规能源是不可再生的，其供应紧张，导致国家与国家之间、地区与地区之间产生政治纠纷，甚至引起局部的冲突和战争。二是常规能源会产生温室效应，使地球变暖，《京都议定书》以法规的形式限制温室气体排放，并以支付履约费的形式，对超排国家进行处罚。新能源有太阳能、风能、核能、地热能、氢气等，按类别可分为太阳能、风力发电、生物质能、生物柴油、燃料乙醇、新能源汽车、燃料电池、氢能、垃圾发电、地热能、二甲醚、可燃冰、页岩气等，太阳能是其中的骄子。太阳辐射是分布广大的自然资源，方便就地开发利用。人们根据太阳辐射的特点，研制出了太阳电池。太阳电池是将太阳辐射的能量直接转换成电能的器件，它的特点是省去了将太阳光能先转换成热量再转换为电能的中间过程，只要有阳光照射，就可直接发电，其特点是：不需要燃料，没有振动，没有噪声，不会污染环境和破坏生态平衡，无人值守。

太阳电池按其所用材料分有晶硅太阳电池、薄膜太阳电池等，如图 0-1 所示；按其结构分为固定式、跟踪式、聚光式。本书只谈薄膜太阳电池。

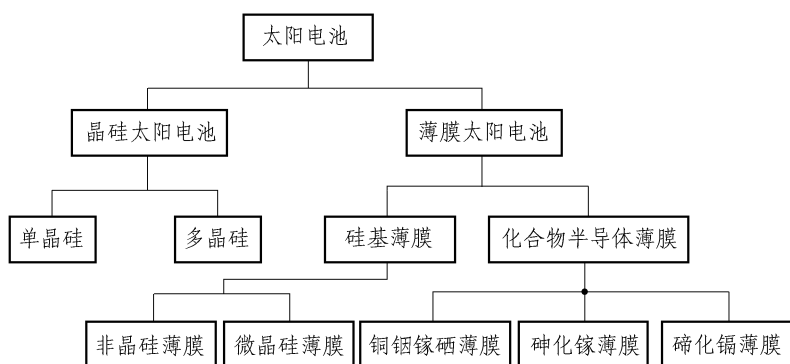


图 0-1 太阳电池

薄膜太阳电池与晶硅太阳电池相比，各有千秋：薄膜太阳电池易于大规模生产，可以柔性化；铜铟镓硒（CIGS）薄膜太阳电池抗辐射性强，而晶硅太阳电池抗辐射能力较弱；非晶硅薄膜太阳电池厚度小于 $1\mu\text{m}$ 就能充分吸收太阳光能，而多晶硅太阳电池需要 $25\mu\text{m}$ 吸收太阳光能，还要 $150\mu\text{m}$ 作为支撑体。薄膜太阳电池的特性是基于大量生产后的成本降低，成本竞争优势是长期的。其次，与晶硅太阳电池比较，非晶硅薄膜太阳电池的温度转换系数低，即转换效率较不受气温影响，且受照度影响也较小，即在低照度下仍可维持较佳的转换效率。理论及实践证明，在装设相同功率的发电机组情况下，非晶硅薄膜的年度总发电量比

传统晶硅高出约 10%。薄膜太阳能电池还有一个重要的优点是适合作与建筑结合的光伏发电组件：双层玻璃封装刚性的薄膜太阳能电池组件，可以根据需要，制作成不同的透光率，可以部分代替玻璃幕墙，而不锈钢和聚合物衬底的柔性薄膜太阳能电池适用于建筑屋顶等需要造型的部分。它既具有漂亮的外观，又能发电，其透明导电薄膜还能很好地阻挡外部红外线的进入和防止内部热能散失。城市土地的稀缺性，决定了薄膜太阳能电池具有更广阔的发展前景。太阳能电池正走在不断进取、不断完善的过程中。

从长远角度考虑，薄膜太阳能光伏产业是一个具有前瞻性与可持续发展的行业。太阳能是各国政府大力支持的产业，金融危机后，是各国政府扩大投资、找寻成长产业推动需求、带动其他产业成长的重要行业，各国政府持续延长再生能源补助案。薄膜太阳能技术最主要的竞争优势则是在成本。薄膜材料需要的反应温度低，可以在玻璃、不锈钢板、陶瓷板、柔性塑料片上淀积，易于大面积生产。目前，在平板显示领域，基于大面积有源矩阵驱动的 TFT-LCD 工艺已十分成熟，从 5 代线（基板规格为 $1.1\text{m} \times 1.3\text{m}$ ）起步，到 8.5 代（基板规格为 $2.2\text{m} \times 2.6\text{m}$ ）生产线，2009 年中国已有京东方科技集团股份有限公司、上海广电信息产业股份有限公司、昆山龙腾光电有限公司三家厂商的三条 5 代 TFT-LCD 面板生产线实现量产。

太阳能电池发电需要阳光，安装电池板需要场地，兼有这两者，才能得到收益。对于大面积运用太阳能电池来说，我国西北地区光照资源丰富，阳光充足，且是广阔的沙漠地带，有沙漠面积 108万 km^2 ，是理想的太阳能产业基地。

由于太阳能电池的优越性，全球进军太阳能电池的热浪，一浪高过一浪，许多国家无不争先恐后。在过去 5 年中（2007~2011 年），世界太阳能电池市场以平均每年 40% 的幅度增长。国际太阳能产业界预计，未来 3~5 年该市场将迎来爆发性增长。预计到 2050 年，世界能源供给中太阳能将占 40%，石油仅占 5%。

太阳能电站的建设成本目前还是很高的，尤其是沙漠光伏电站的建设投入很大，不是小资本能进入的，只有在政府优惠政策的扶持下，才能带来投资商的积极性，光伏事业也才能发展壮大。我国政府的态度是明朗和坚决的，扶持的力度是较大的。

事情总是两方面的，一方面太阳能是丰富、洁净、廉价，取之不尽、用之不竭，持续不断、使用最方便、适用范围最广泛的能源；但另一方面，太阳光转为电能依赖阳光照射，而四季变化、昼夜、阴晴、向背等，会造成阳光周期性、间歇性、随时性、区域性不均衡的缺点，接入电网后，会造成电网扰动，给敏感用户带来设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱，严重时造成系统硬件损坏、工作瘫痪等；再者，电池多数是串联或串并联组合使用，很难保证每个单体的特性一致。因此，要保证光伏电能的质量，就要克服这些缺陷，目前的办法有三个：一是采用适合于并网型光伏电站的逆变器；二是将白天发的电能储存起来，供夜晚使用；三是建立太空电站，从根本上解决阳光周期性、间歇性、随时性、区域性不均衡的缺点。本书对这三方面都作了介绍，介绍了优良的并网型、适用于海拔 3000m 的光伏电站的大型逆变器；还介绍了各种储存光伏电能的方法以及太空电站。能源转换不可避免地会发生巨大变革，今后人类从太阳取得的能源，要比现在世界上使用的全部能源大若干个数量级，但是发电不稳定、效率高不等的缺陷，终是目前光伏电站正常使用中的难题。因此，光伏电站的储能及太空电站的成功建设将是光伏事业完善成熟的标志。

太阳能电池的知识集光学、材料学、物理学、电化学、电子学、电工学、机械学、光电子

半导体、电子电力、现代电力系统和现代控制理论于一体，光伏产业有丰富的学术研究和基础理论，又与巨大的经济、政治和社会效益紧密结合。

希望本书能成为光伏产业科技进步的推进器。国家的扶持会年年递减，光伏产业的发展要依靠自我进步，从而降低成本，降到与火电相近的程度。本书介绍了降低成本的途径；介绍了污染的防治，太阳能电池在制造过程中可能带来的污染现象是不容忽视的；介绍了晶体学方面的知识，要认清薄膜太阳能电池，就要认清薄膜是如何成形、结晶、长大的，存在哪些缺陷，这些缺陷将如何克服，因此晶体学方面的知识是必不可少的；介绍了薄膜太阳能电池的原理、设计、制造、运用、成本，介绍如何给不同的基体，如玻璃、不锈钢、塑料贴上薄膜，力求把薄膜太阳能电池说透，但是有关薄膜太阳能电池的理论介绍仅以知其然、知其所以然为界，不作进一步的拓深，以免冲淡撰写本书的本意。

本书有三个特征：

(1) 全力贯彻相关法律法规。

(2) 实用性强，着重实际运用和工程设计。

(3) 内容全面。基本原理和基本概念清晰、准确、全面，理论与实践相得益彰，以精炼的篇幅介绍了薄膜太阳能电池产业链的全过程，快速训练光伏人才。太阳能电池及其光伏电站内容深奥，要有相当的基础知识才能掌握这一门技术。为解决这一问题，本书作了探索，凡本书涉及的专业名词及概念，均可在本书找到注解，只要具备大专水平均可通过本书进入太阳能技术领域，自我修炼，可达到运用自如的水平。

本书介绍了近年来薄膜太阳能电池取得的最新研究成果，力求总结近年来薄膜太阳能电池发展的最新成就，从而为光明、美好、灿烂的新世界做贡献。

本书可作为从事薄膜太阳能电池行业的技术人员、工人的学习培训资料，也可作为大专院校新能源专业师生的参考书，供大专院校物理、动力与能源、材料、太阳能、光电子信息等专业的师生参考；可供风险投资人员、政府官员、涉足太阳能的人员开拓视野，还可提供给欲投资薄膜太阳能电池行业的商家，作为分析可行性研究报告的参考资料。本书囊括了必需的基础知识，从而使这项高深技术能为具有一般大专文化的人员所看懂。

太阳能政策、技术、市场发展得很快，本书不断地修改补充仍不能如意，往往又有新内容涌现而来不及更新，出版时会与现实有些距离，这是很遗憾又无奈的事。

本书编写过程中得到同行提供实验数据、参观实验室的帮助，在此表示感谢。由于本人水平有限，欠缺之处、疏漏之处甚至错误都在所难免，恳请广大读者批评指正，不吝赐教。

本书写作中得到薄膜电池应用专家彭立斌先生的指导，在编写中得到彭兰平女士的帮助，在此表示诚挚的感谢。

最后，本人对参考文献的作者表示衷心的感谢。

段光复 段伦

谨以本书献给教育我成长的段显斋、段咫斋兄弟。

——段光复

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 薄膜太阳能电池现状	1
第二节 国内外薄膜太阳能电池制造现状	9
第三节 薄膜太阳能电池的发展方向	20

第四节 我国发展太阳能的政策	22
第二章 太阳辐射能的接收	30
第一节 太阳及日地运动	30
第二节 太阳辐射	50

上篇 薄膜太阳能电池

第三章 薄膜太阳能电池的基础知识	62
第一节 术语及基本概念	62
第二节 薄膜	86
第三节 薄膜生产工艺	90
第四节 真空	93
第四章 非晶硅薄膜太阳能电池	107
第一节 非晶硅薄膜太阳能电池的性能	107
第二节 单结、双结、三结非晶硅太阳能电池	108
第三节 非晶硅薄膜太阳能电池的制备	111
第四节 非晶硅薄膜材料的光学特性	115
第五节 单结非晶锗硅合金薄膜太阳能电池	121
第五章 CIGS 薄膜太阳能电池	123
第一节 CIGS 太阳能电池的性能	123
第二节 CIGS 太阳能电池的制备	125
第三节 CIGS 太阳能电池材料的特性	128
第四节 CIGS 太阳能电池的物理、光学、电学特性	130
第五节 CIGS 太阳能电池的类别	132
第六节 CIGS 太阳能电池的制造成本	134
第七节 CIGS 太阳能电池的发展方向	135
第六章 GaAs 薄膜太阳能电池	137
第一节 GaAs 太阳能电池的性能	137
第二节 单结、双结、三结 GaAs 太阳能电池	139
第三节 GaAs 太阳能电池的制备	141
第七章 CdTe 薄膜太阳能电池	146

第一节 CdTe 太阳能电池的性能	146
第二节 CdTe 太阳能电池的制备	147
第三节 CdTe 太阳能电池的成本	154
第四节 镉对环境的影响	155
第五节 CdTe 太阳能电池的前景展望	157
第八章 薄膜太阳能电池的制造设备	158
第一节 薄膜沉积设备	158
第二节 层压设备	177
第三节 激光刻膜机	179
第九章 薄膜太阳能电池材料	181
第一节 衬底用材	181
第二节 各种半导体材料	189
第三节 太阳能电池组件密封胶	228
第四节 气体导电浆料及靶材	235
第五节 接线盒	246
第六节 光伏电缆	246
第七节 太阳能电池工业用水	248
第十章 薄膜太阳能电池的检测技术及设备	249
第一节 太阳能电池测量条件	249
第二节 太阳能电池测量仪器	252
第三节 太阳能电池性能参数的测量	258
第四节 太阳能电池组件的测量	262
第五节 多结叠层太阳能电池的测量	265
第六节 空间太阳能电池的测试	266
第七节 取证	271

中篇 薄膜太阳能电池光伏电站

第十一章 光伏并网逆变器	273
第一节 光伏并网逆变器概况	273

第二节 最大功率点跟踪 (MPPT)	274
第三节 正弦波脉宽调制 (SPWM) 技术	280

第四节 逆变桥	286	第四节 太空运输	395
第五节 光伏并网逆变器的技术要求和 试验方法	299	第五节 测控系统	408
第六节 国外光伏并网逆变器状况	311	第六节 温控系统	412
第七节 国内光伏并网逆变器状况	316	第七节 GPS 及北斗星导航系统	415
第十二章 太阳能电池的支架及支架 基础	321	第八节 10GW 太空电站的建设	429
第一节 工程地质	321	第九节 世界太空电站建设现状	435
第二节 支架基础	329	第十五章 智能电网	436
第三节 支架	332	第一节 智能电网的定义及特征	436
第四节 沙漠电站用水	337	第二节 智能电网的建设	441
第五节 恶劣气候的应对	340	第三节 智能电网的意义	444
第十三章 储能	342	第四节 国内外智能电网的建设	446
第一节 储能概况	342	第五节 智能电网技术	455
第二节 各种储能技术	345	第六节 智能电网设备	460
第十四章 太空光伏电站	354	第十六章 电能质量	469
第一节 太空光伏电站基础知识	355	第一节 电能质量的概念	469
第二节 太空环境及空间碎片防治	372	第二节 电能质量的改善	475
第三节 卫星轨道及太空行走	388	第三节 电能质量监测	485
		第四节 电能质量监测设备	486
		第五节 国外解决电能质量案例	491

下篇 实际运用

第十七章 10MWp 沙漠光伏电站	494	第五节 BIPV 的施工	557
第一节 工程设计基础	494	第六节 BIPV 的效益	558
第二节 太阳能电池阵列的设计	501	第七节 BIPV 的检测与调试	559
第三节 电气一次设计	505	第八节 BIPV 存在的问题	561
第四节 电气二次设计	513	第九节 BIPV 的发展趋势	562
第五节 总平面布置及土建设计	518	第十九章 分布式发电	563
第六节 太阳能电池支架及支架基础的 设计	520	第一节 分布式发电概况	563
第七节 给水排水设计	522	第二节 分布式发电及光伏发电技术	569
第八节 采暖通风设计	523	第三节 分布式发电管理	576
第九节 防风沙设计及电池板清洁	525	第四节 分布式发电存在的问题	577
第十节 工程消防设计	526	附录	579
第十一节 施工组织设计	528	附录 A 太阳能电池标准	579
第十二节 环境保护	532	附录 B 太阳能光伏产业“十二五”发展 规划	591
第十三节 工程效益	534	附录 C 防孤岛效应保护方案的选取	598
第十八章 光伏建筑一体化 (BIPV)	537	附录 D 并网光伏发电专用逆变器技术 参数	599
第一节 BIPV 概述	537	附录 E 逆变器设计、制造相关标准	600
第二节 国内外 BIPV 现状	540	参考文献	602
第三节 BIPV 的技术要求	548		
第四节 BIPV 的设计	550		

第一章 概述

第一节 薄膜太阳电池现状

目前已产业化及正在研制的薄膜太阳电池有硅基薄膜太阳电池、铜铟镓硒（CIGS）薄膜太阳电池、碲化镉（CdTe）薄膜太阳电池、砷化镓（GaAs）太阳电池等七种。

一、硅基薄膜太阳电池

硅基薄膜太阳电池是非晶硅电池、非晶硅/微晶硅双叠层薄膜太阳电池非晶硅叠层、微晶叠层的薄膜电池，转化率可以达到9%。硅基薄膜电池是在玻璃、金属或塑料等衬底上沉积很薄的光电材料制成的，对硅的消耗量很少，薄膜电池平均消耗的硅仅为传统晶体硅太阳电池硅消耗量的1/200。由于硅基薄膜太阳电池在降低成本方面存在巨大潜力，所以引起了研究单位、企业界及各国政府的普遍重视，从而促进了硅基薄膜太阳电池突飞猛进的发展。

1. 非晶硅电池的特点与用途

(1) 非晶硅电池的特点

- 1) 用 a-SiC 或 $\mu\text{C-SiC}$ 代替 a-Si 做窗口层，以改善电池的短波光谱响应。
- 2) 采用梯度界面层，以改善异质界面的输运特性。
- 3) 采用 $\mu\text{C-Si}$ 做 n 层，减少串联电阻。
- 4) 用绒面 SiO 代替平面 ITO，并采用多层背反射电极，以减少反射和透射损失，提高短路电流。
- 5) 采用激光切割技术，实现了电池的集成化。
- 6) 采用叠层电池结构，以扩展电池的光谱响应范围，提高转换效率。
- 7) 采用分室连续沉积技术，以消除反应气体的交叉污染，提高电池的性能和重复性等。

所有这些技术的采用，使硅基薄膜电池的效率达到 13.7%。

(2) 非晶硅电池的用途

1) 第一个非晶硅太阳电池于 1976 年研制出来，1980 年就实现了商品化。如日本三洋电气公司 1980 年利用硅基薄膜太阳电池率先制成计算器，随后便实现了工业化生产，并把产品打入世界市场。由于非晶硅材料优越的短波响应特性，使其在计算器、手表等荧光下工作的低功耗电子产品中占据很大优势。随着硅基薄膜电池效率的不断提高，其应用的领域也不断扩大，从计算器、手表等弱光下应用扩大到各种消费品及功率应用领域，如太阳能收音机、太阳帽、庭院灯、微波中继站、航空航海信号灯、气象监测、光伏水泵及户用独立电源等。

2) 薄膜具有弱光性。光伏建筑一体化应用的玻璃幕墙一般是垂直的，这样的光照角度必然影响其对光子的吸收，从而影响晶体硅的转换率。非晶硅太阳电池有光就可以发电，适用于商用建筑的屋顶、楼宇立面等。

3) 非晶硅薄膜电池在 25℃ 以上只有微弱衰减, 特别适合用于高温、荒漠地区建设电站。

2. 非晶硅材料在光照时存在 S-W 效应及其改进

1) 非晶硅材料在光照时存在 S-W 效应, 即光致衰退现象。此外, 非晶硅材料带隙较宽 (带隙为 1.7eV), 使得材料本身对太阳辐射光谱的长波区域不敏感, 这样一来就限制了非晶硅太阳能电池的转换效率, 难以吸收波长 700nm 以上的光, 限制了其对太阳光的利用率。

2) S-W 效应的改进。微晶硅材料被认为是一种非晶与微晶硅颗粒组成的混合相材料, 其带隙调变可以通过制备过程中的氢稀释比调整实现, 最低可接近单晶硅的 1.1eV, 因此, 微晶硅材料制备不会带来额外的工艺复杂性, 与现有的非晶硅技术兼容性更好。而且微晶硅材料稳定性高, 微晶硅电池基本无衰退, 采用非晶硅/微晶硅叠层电池相对于非晶硅电池而言, 具有两方面优点: ①拓宽电池长波光谱响应, 提高太阳光的利用率; ②降低了较不稳定的非晶硅顶电池厚度, 有利于提高整体稳定性。因此, 国际公认非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池是硅薄膜电池的下一代技术, 是实现高效、低成本薄膜太阳能电池的重要技术途径, 是薄膜电池新的产业化发展方向。非晶硅的衰减在前期 (比如前 3 个月) 很快, 一旦稳定之后, 稳定性比晶硅要高而且非晶硅电池生产企业都会按照快速衰减之后的功率来销售。

3. 与晶硅电池比较

1) 非晶硅薄膜电池具有弱光效应, 在早、晚及阴天等弱光条件下, 仍可产生电能, 因此在同样地理和气象条件下, 全年发电量比晶体硅电池高出 10% ~ 15%。

2) 晶硅电池在温度超过 25℃ 的情况下, 发电功率会急剧衰减, 而非晶硅薄膜电池在 25℃ 以上只有微弱衰减, 当室外温度超过 50℃ 时, 晶硅电池的发电功率会呈现大幅衰减, 而非晶硅薄膜电池的热衰减则非常低, 所以非晶硅薄膜电池的特性适合用于高温、荒漠地区建设电站。

3) 薄膜和晶硅组件每生产 100W 电池组件, 晶硅电池要消耗 50W 工业用电, 而薄膜电池仅需 8 ~ 9W, 薄膜电池生产耗电仅为晶硅电池的 16%, 全面节能效果更好。

4) 晶硅电池在生产过程中会有大量有害气体排放, 而非晶硅薄膜电池生产中只有等离子增强化学气相沉积法 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD) 环节会产生少量尾气, 经焚烧炉处理就能阻止有害气体向大气排放。

5) 薄膜电池生产流程短, 只有 4h, 而晶体硅电池涉及几十个环节, 时间长且成本高。

6) 薄膜电池与晶体硅电池相比, 最大也是最核心的优势是成本。要使光伏发电真正成为能源体系的组成部分, 必须要大幅度地降低成本, 薄膜太阳能电池在降低成本方面具有很大的优势:

① 硅材料储量丰富 (硅是地球上储量第二大元素), 而且无毒、无污染, 是人们研究最多、技术最成熟的材料。

② 耗材少、制造成本低。硅基薄膜电池的厚度小于 1 μm , 不足晶体硅电池厚度的 1/100, 这便大大降低了材料成本; 硅基薄膜电池采用低温工艺技术 (200℃), 这不仅可节能降耗, 而且便于采用玻璃、塑料等廉价衬底。

③ 硅基薄膜采用气体的辉光效应分解沉积而成, 通过改变反应气体组分可方便地生长各种硅基薄膜材料, 实现 PIN 和各种叠层结构的电池, 节省了许多工序。

④ 便于实现大面积、全自动化连续生产。非晶硅薄膜电池发电量大、成本低, 就是占地面积大一些。

4. 效率的提高

目前非晶硅单层薄膜的光电转化效率为 6%，光致衰退率可以控制在初始效率值的 25% 左右。也就是说，刚制备的电池组件的效率为 8%，经过几个月的日照之后，其效率达到 6% 左右，并最终稳定在这个值。这种特性可以为当前的消费者所接受。非晶硅/微晶硅双叠层太阳电池可以达到 8.5% 的稳定效率，光致衰退更小。解决光致衰退问题的途径就是制备叠层太阳电池，叠层太阳电池是在制备的 P、I、N 层单结太阳电池上再沉积一个或多个 PIN 子电池制得的。

1) 它把不同禁带宽度的材料组合在一起，提高了光谱的响应范围。

2) 顶电池的 I 层较薄，光照产生的电场强度变化不大，保证 I 层中的光生载流子抽出。

3) 叠层太阳电池各子电池是串联在一起的，底电池产生的载流子约为单电池的一半，光致衰退效应减弱。

美国应用材料公司拥有硅基薄膜全套技术和装备、微晶硅双结叠层技术，初期光电转换率达到 8.5%，高于目前非晶硅单结技术 6% 的转换率，该技术成本为多晶硅、单晶硅电池的 40%~50%，硅膜厚度不到 2 μm ，耗用硅材料为多晶硅的 1%，最新产品 5.7 m^2 的硅基薄膜太阳电池，成为 2010 年全球单块面积最大的薄膜太阳电池。

非晶硅薄膜电池转换率低的问题，经过共同协作和努力能在近几年有大的突破。

5. 设备投资大

薄膜太阳电池生产线的价格是多晶硅太阳电池生产线的 3 倍多，而其中一些设备的价格是多晶硅太阳电池生产设备的 10 倍，初期设备投资很大，美国的应用材料公司、瑞士的欧瑞康以及日本的爱发科，这 3 家企业设备制造量较大。世界顶级半导体设备制造商有美国的应用材料公司、瑞典的 Oerlikon 公司、日本的日本真空公司、德国的莱宝真空公司、美国的 EPV 公司等。这些公司可以提供成套的非晶硅或者非晶硅/微晶硅双叠层太阳电池制造设备以及相匹配的生产制造工艺。美国的 UnitedSolar 公司、日本的 Kenaka 公司和三菱公司、德国的 Schott 公司等都已推出非晶硅薄膜太阳电池的生产线。

2009 年 8 月，留美博士钱学煜等人在上海成立理想能源公司，用一年多的时间，完成了 PECVD 首台机的研发、中试、下线，并申请了 10 多项核心技术专利。该设备采用了创新的超高频射频技术、精密的真空和温度控制技术、快速的自动传输技术以及多腔多片的反应腔系统等，大大提高了产能，其产品性能优于国际一流设备，但价格远低于同等的进口设备。国外进口一台这样的设备要两三亿元人民币，自己生产的大概只需一亿元左右。一台设备年产能约有 15MW，三台设备便可组成一条年产能近 50MW 的生产线。

6. 非晶硅薄膜电池的寿命

非晶硅薄膜电池从开发成功至今已近 50 年，非晶硅薄膜电池 25 年的使用寿命也为实践所证明。美国科罗拉公司在洛杉矶建设的一处非晶硅薄膜电池电站就已经正常运行了 17 年。欧洲 TV（德国技术监督协会）和美国 UL（保险商实验所）等认证机构对非晶硅薄膜电池进行了苛刻的模拟试验，也证明了薄膜电池具有 25 年使用寿命，且衰减率达到设计要求。可以说，25 年是一个被实践证明、被科学检测证明的时限。另外，德国慕尼黑再保险公司对强生非晶硅薄膜电池实行 20 年品质承保，这也可以说明非晶硅薄膜电池是一个相当成熟的产品。

目前非晶硅薄膜太阳电池的国际龙头厂商为美国的 UnitedSolarOvonic 和日本的 Kaneka。

当初因多晶硅原料缺乏，才转而投入薄膜太阳能的生产，现在多晶硅缺料的问题正在缓解，价格也大幅下降，这势必冲击各类薄膜电池在成本上的优势。其次，有资料显示，薄膜太阳能电池的设备投资几乎是晶体硅电池设备投资额的 10 倍，投资回报周期也比后者长得多，筹资难度本就不低，受到金融危机影响，筹资难度将更趋增高。另外，非晶硅电池在技术上依然存在转换效率相对较低且有衰减、实际量产后的质量控制不易以及市场认知度相对较低等问题。现在市场竞争才刚开始，各路企业出现未跑先喘的大有人在。

二、铜铟镓硒（CIGS）薄膜太阳能电池

铜铟镓硒薄膜太阳能电池（简称 CIGS 太阳电池）具有性能稳定、抗辐射能力强的特点，光电转换效率目前是各种薄膜太阳电池之首，接近于目前市场主流产品多晶硅太阳电池的转换效率，成本是多晶硅太阳电池的 1/3，是最有发展前景的薄膜太阳电池之一。20 世纪 80 年代，美国波音公司开创了多元素金属共蒸发方法制备铜铟镓硒薄膜材料，使这类太阳电池光电转换效率最先突破 10%，并将它放入太空进行考核验证，确立了该类电池开发应用的前景，1994 年又取得 CIGS 太阳电池光电转换效率 14.9% 的世界纪录（小面积单体电池）。随后德国斯图加特大学、瑞典乌普萨拉大学、日本东京工业大学等高校研制的 CIGS 太阳电池，其转换效率也纷纷超过了 17%。1999 年，美国国家可再生能源实验室（NREL）将世界纪录提高到 18.8%，2002 年达到 19.2%，2010 年公布的数据已达到 19.9%（面积为 0.4cm^2 ）。但是，小面积电池（ 1cm^2 左右）效率再高也不能作为产品应用于实际中去，研究人员从单纯追求高效率 CIGS 太阳电池的研究，转向研究大面积集成太阳电池组件（采用集成工艺技术将单体电池内部级联串接，构成高电压大面积太阳电池板）以及产业化技术。“溅射后硒化技术”比较容易实现均匀的大面积铜铟镓硒薄膜，可大大地提高吸收层制备的重复性。20 世纪 90 年代，Shell Solar 公司就已制备出 3830cm^2 铜铟镓硒电池组件，效率达 11.2%，1999 年达到 12.3%，被称为铜铟镓硒电池工业化最成熟的技术。2001 年开发了薄膜材料快速升温热处理技术，使后硒化工艺由 70min 降到十几分钟，不但提高了生产效率，而且使 100cm^2 面积电池组件的最高效率达到 14.7%。2003 年 $60\text{cm} \times 90\text{cm}$ 面积组件的最高效率达到 13.1%，输出功率为 65W，基于三步共蒸发工艺制备的 CIGS 太阳电池的效率已达 19.99%，是所有薄膜太阳电池中最高的。

在传统的 CIGS 太阳电池中，由于含有很少的重金属镉元素，使其不能成为真正的无污染“绿色”电池。选用无镉材料来替代缓冲层 CdS 薄膜是发展 CIGS 太阳电池的必然趋势。日本松下公司和 Showa Shell Skiyu 公司由 $\text{Zn}(\text{O}, \text{S}, \text{OH})_x$ 材料替代硫化镉过渡层取得巨大成功，他们研制的无镉 CIGS 太阳电池转换效率达到 18.6%，并用于中试线生产工艺，所制备的集成组件也都实现了无镉，目前所用的无镉缓冲层包括 ZnS 、 ZnSe 、 $(\text{Zn}, \text{Mg})\text{O}$ 、 $\text{In}(\text{OH})_3$ 、 In_2S_3 、 In_2Se_3 、 In_2ZnSe_3 、 SnO_2 、 SnS_2 等。由美国能源部国家光伏中心（NCPV）与日本新能源和工业技术开发机构（NEDO）合作研制的无镉 CIGS 太阳电池效率达到 18.6%，面积为 3456cm^2 的组件效率达到 13.4%，二者均创造了无镉 CIGS 太阳电池效率的世界纪录，真正成为绿色高效薄膜太阳电池，被国际上称为下一代的廉价太阳电池，其无论是在地面阳光发电还是在空间微小卫星动力电源的应用上都具有广阔的市场前景，很多公司投入巨资置身于 CIGS 产业，有德国的 Wuerth（伍尔特）、Surlfulcell，美国的 Global Solar Energy，日本的 Honda（本田）、Showa Solar Shell。电池组件商品进入市场的企业有德国的 WürthSolar、Solibro，美国的 GlobalSolar、Miasole，日本的 Hond、ShowaShell 等公司。我国台

湾企业新能公司投资 7000 万欧元与德国 Centrotherm 公司合作开发 30MW CIGS 电池生产线，以溅射后硒法制备电池的面积为 $1.1\text{m} \times 1.4\text{m}$ ；我国台湾镓德、绿阳光电等公司自主开发，均已制备出不同面积的玻璃衬底 CIGS 组件，正在进行量产化开发。2010 年全球产能超过 760MW，显示了良好的发展势头。

南开大学以国家“十五”、“863”计划为依托，建设 0.3MW 中试线，制备出 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 、效率为 7% 的集成组件样品。2008 年 2 月，山东孚日光伏科技有限公司宣布与德国的 Johanna 公司合作，独家引进了我国首条 CIGSSe（铜铟镓硫硒化合物）商业化生产线，2010 年量产效率达 10%。2010 年日本厂商昭和壳牌石油（ShowaShell）投入超过 9 亿美元，建造 CIGS 太阳能电池厂，产能为 1GW_p。

CIGS 太阳能电池具有敏感的元素配比和复杂的多层结构。由于这种电池使用 4 种材料，因此要有准确的化学计量比，控制其晶相结构，控制成膜后的光学和电学特性，才能达到最好的光电效应，而要做到这一点很难，尤其是在大规模生产状态下很好地控制大面积产品的成分均匀性、重复性、稳定性和一致性，增强层间的附着力问题成为制约这种电池发展的关键所在。

另一个问题是，由于该种电池的原材料 In 和 Ga 都属于稀有金属材料，地球含量较低，这就导致在将来大规模生产后原材料的供应将成为一种隐忧。

三、碲化镉（CdTe）薄膜太阳能电池

CdTe 薄膜太阳能电池技术，是薄膜电池中历史最久、被密集探讨最多的一种技术。CdTe 是直接能隙半导体，其能隙宽度与太阳光谱有很好的匹配，而且它的能隙较宽，在较高的环境温度下也能正常工作，具有很好的抗辐射性能。此外，CdTe 太阳能电池由多晶的薄膜所构成，制备工艺相对简单。CdTe 太阳能电池应用前景非常广阔，尤其适用于高原及荒漠电站，外太空、深空间电源，以及用作聚光电池。国际上 CdTe 薄膜太阳能电池的研究和制造十分活跃，美国国家可再生能源实验室（NREL）的小面积 CdTe 电池的最高效率记录为 16.5%。该技术的特点是采用 $\text{CdSnO}_4/\text{ZnSnO}_4$ 复合膜作为透明前电极。这种复合型明导电膜在退火后， CdSnO_4 有很高的电导率， ZnSnO_4 有恰当的电导率，而在这两层之间可形成很薄的过渡层。另外一个典型的技术路线是采用 $\text{Te}/\text{W}_2\text{Te}_3$ 作为背接触层，欧洲的多个研究小组采用该技术，如德国 ANTEC 公司、西班牙 CIEMAT 公司、瑞士 ETH 大学、比利时 Gent 大学、德国 ISFH 公司、意大利 Parma 大学、意大利 SSE 公司、英国 Loughborough 大学、瑞士 Solaronix 公司、德国 DieterBonnet 中心、德国达姆斯塔德技术大学、英国巴斯大学等，他们制备的小面积电池的最高转换效率在 10% ~ 13% 之间。十多年来，众多研究机构对 CdTe 电池的污染问题进行了研究，认为在 CdTe 电池的生产过程中，镉污染容易控制，不会影响人体健康。即使遇到火灾，熔融的电池中释放的镉对环境的污染也很微小，而且在同样的发电量下，CdTe 电池的重金属排放当量是最低的。因此，在重视环保的美国和德国等发达国家，CdTe 太阳能电池研究和产业化技术一直得到很好的发展。美国的 FirstSolar 公司是全球最大的 CdTe 太阳能电池制造商，他们自主开发的蒸汽输运法，使 CdTe 薄膜电池生产线产能达到每年 100MW。CdTe 薄膜太阳能电池原材料成本较低，规模化生产使得 CdTe 太阳能电池的成本不断下降，从 2005 年的 1.59 美元/W 降为 1.19 美元/W。截至 2009 年，FirstSolar 公司的生产成本已经从 2008 年的 93 美分/W 降至 84 美分/W。另外，该公司计划到 2014 年要将成本进一步降至 0.52 ~ 0.63 美元/W，与此同时要将转换效率升至 12.5%，是目前所有太阳能电池中生产

成本最低的。FirstSolar 公司除了在美国建有 90MW 的生产线、在德国建有 120MW 生产线，还在马来西亚和新加坡分别建有 240MW 和 120MW 的生产线。完成 2010 年的扩产计划后，其产能达到 1.2GW，转换效率达 10%。另一家已量产 CdTe 薄膜太阳电池的厂家为德国 AntecSolar，产能为 4MW_p。除了 FirstSolar 和 AntecSolar 外，美国的 PrimestarSolar 跟 NREL 和美国能源部 (DOE) 合作，也投入 CdTe 薄膜太阳电池的生产，其生产技术较为简洁，主要为磁控溅射或近空间升华技术，产品重复性和一致性很好，电池效率目前为 7% ~ 8%，并且可以较为容易地提高到 10% 以上。德国的 ANTEC 公司有 8MW 的自动化生产线，生产面积为 1.2m × 0.6m 的 CdTe 电池组件，平均效率为 6% ~ 7%。

我国的 CdTe 薄膜电池产业化技术也取得了一定的进步，但研究工作起步较晚。2001 年，四川大学太阳能组研制出了面积为 0.52cm² 的 CdTe 太阳电池，转换效率达 11.6%。这项成果为我国 CdTe 太阳电池的发展做出了开创性的贡献，荣获中国高校技术发明二等奖。“十五”期间，小面积电池制造技术有了进一步提高，该组制备的电池效率达到 13.38%，再次创造出我国 CdTe 太阳电池的转换效率记录，接近国际领先水平，并开发了中试生产线关键设备，建立了全部由我国生产的设备构成的 0.3MW 中试生产线，在该中试线上研制了面积为 30cm × 40cm 的串联集成组件，转换效率达 8.25%，已超出德国水平，使我国成为继美国、德国之后世界上第三个能生产 CdTe 太阳电池的国家，奠定了我国建立兆瓦级 CdTe 电池生产线的基础。

但是，关键原料 Te 的天然贮藏量有限，会限制 CdTe 薄膜太阳电池的发展，因此 CdTe 薄膜太阳电池可以在一定规模下，在晶体硅电池价格居高不下、高纯硅材料产能不够的情况下起到一个缓冲作用，真正大规模地生产并占有较大的市场份额是值得怀疑的。当硅基薄膜太阳电池克服了技术瓶颈高速发展之后，CdTe 电池将会停滞下来。

四、砷化镓 (GaAs) 太阳电池

GaAs 属于 III-V 族化合物半导体材料，其能隙为 1.4eV，正好为高吸收率太阳光的值，因此是很理想的电池材料。GaAs 的转换率一般为 25% 左右，其主要应用在太空，转换率最高可以达到 35% 以上，并且具有抗辐射的特性。一般说来，热能对 GaAs 的影响不大，GaAs 等 III-V 族化合物薄膜电池的制备主要采用金属有机化合物化学气相沉积 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 法和液相外延 (Liquid Phase Epitaxis, LPE) 技术，其中 MOCVD 方法制备 GaAs 薄膜电池受衬底位错、反应压力、III-V 比率、总流量等诸多参数的影响。1998 年德国费莱堡太阳能系统研究所制得的 GaAs 太阳电池的转换效率为 24.2%，为欧洲纪录。另外，该研究所还采用堆叠结构制备 GaAs、Ga_{0.5}Bi_{0.5} 电池，该电池是将两个独立的电池堆叠在一起，GaAs 作为上电池，下电池用的是 Ga_{0.5}Bi_{0.5}，所得到的电池效率达到 31.1%。在此之前的世界纪录是波音全资子公司 Spectrolab 在 2009 年 8 月生产出的一款实验电池，聚光条件下转换率达到 41.6%。太阳电池转换效率最新的世界纪录是 42.3%，这是 2010 年 10 月 6 日美国 Spire 半导体公司宣布的最新成果。该公司研发的三结 GaAs 太阳电池的峰值效率达到了 42.3%，聚光条件相当于 406 个太阳砷化镓。

五、柔性衬底薄膜太阳电池

1. 柔性衬底薄膜太阳电池的特点

柔性衬底薄膜太阳电池是指在柔性材料 (如不锈钢、聚酯膜) 上制作的电池，以美国 uni-solar 公司采用不锈钢作衬底为例，不锈钢的厚度仅为 127μm，且具有极好的柔软

性，可以任意卷曲、裁剪、粘贴，即使弯成很小的半径，作数百次卷曲，电池性能也不会发生变化。而以高分子聚合物聚酰亚胺为柔性衬底制备的非晶硅太阳电池，器件总厚度约 $100\mu\text{m}$ （含封装层），功率质量比达到 500W/kg 以上，比不锈钢衬底非晶硅电池高出近十倍，是世界上最轻的太阳电池。从制备工艺上看，由于此结构电池采用卷对卷（roll to roll）工艺制造，便于大面积连续生产，降低成本的潜力很大，具有很强的竞争力。

2. 柔性衬底薄膜太阳电池的结构

柔性衬底太阳电池可采用单结或多结结构。单结结构因其稳定性差、效率低已较少采用，而稳定性好、效率高的多结、叠层太阳电池是柔性衬底太阳电池的发展方向，目前多采用三结太阳电池结构。三结太阳电池中，每一个电池都是由三个半导体结相互叠加而成的：底电池吸收红光；中间电池吸收绿光；顶电池吸收蓝光。对阳光光谱的宽范围响应是提高电池效率的关键。美国 uni-solar 公司的不锈钢衬底、三结非晶硅锗太阳电池结构，其小面积电池效率目前达到 14.6%。

柔性衬底薄膜太阳电池与平板式晶体硅、玻璃衬底的薄膜电池等硬衬底电池相比，其最大的特点是质量轻、可折叠、不易破碎，并具有较高的功率质量比（ $>500\text{W/kg}$ ），故能够安装在流线型汽车的顶部、房屋等建筑物的楼顶与外墙面以及对地观测的平流层飞艇表面，应用前景广阔。

我国柔性衬底薄膜电池的研究进展较慢。哈尔滨 chrona 公司在 20 世纪 90 年代中期曾研制出柔性聚酰亚胺衬底上的非晶硅单结薄膜电池，电池初始效率为 4.63%，功率质量比为 231.5W/kg ，但此后进展不大。近年来南开大学在柔性衬底非晶硅薄膜电池方面的研究取得了一定的进展，他们在 0.115cm^2 的聚酰亚胺衬底上获得单结薄膜电池的初始效率为 4.84%，功率质量比为 341W/kg 。柔性衬底电池的产业化方面，天津津能电池有限公司建有 6MW 非晶硅柔性电池生产线，30MW 生产线已经开始了项目论证；新疆天富光伏光显有限公司在建 1MW 非晶硅柔性电池生产线，未来准备建立 8MW 生产线。这两家公司由于设备及技术从国外进口，预计电池成本偏高。总的来说，国内在柔性衬底方面的研究还处于刚刚起步的阶段，和国外的差距较大。

柔性 CIGS 薄膜太阳电池多沉积于金属箔（不锈钢、金属钛等）或高分子聚合物（多为聚酰亚胺）薄膜基底上，具有质轻、可卷曲折叠、不怕摔碰、抗辐射能力强等特点，而且允许以卷带方式连续化沉积，其材料成本和生产成本具有更大的下降空间，无论是军事还是民用，都具有广阔的市场前景和巨大的需求背景。美国 NREL 和日本松下电器公司在不锈钢衬底上制备的 CIGS 电池效率均超过 17.5%，美国环球太阳能（Global Solar）公司 0.4MW 中试线 [1ft（1ft = 0.3048m）宽、卷到卷技术]，生产不锈钢衬底电池小面积效率为 12.5%，德国 HMI 研究所采用共蒸发法在钛箔衬底上制备 CIGS 薄膜电池效率为 16.2%。聚酰亚胺薄膜（PI）是发展高功率质量比的轻质柔性太阳电池首选衬底材料。目前，由瑞士联邦技术研究院研制的 PI 衬底小面积铜铟硒电池效率达到 13.0%，是目前 PI 衬底太阳电池的世界纪录。德国 HMI 研究所、ZSW 中心和美国特拉华大学能源转换学院（IEC）等机构制备的 PI 衬底 CIGS 电池效率达到了 10% ~ 12%。

六、染料敏化太阳电池

自从染料敏化太阳电池在实验室研究取得突破以来，引起企业界人士的极大关注。从专

利公布生效开始, 即有澳大利亚、瑞士和德国等 7 家公司购买了专利使用权, 并投入大量人力和物力进行产业化和实用化研究。我国在染料敏化太阳电池的基础研究和产业化研究上都与世界研究水平相接近。在国家自然科学基金的大力支持下, 我国的高校和科研机构的研究人员广开思路, 在基础研究上取得了很好的成绩。在国家 863 计划探索性项目的支持下, 开展了各种电解质材料和电池结构的研究, 并提出各种创新性的结构和思想, 如福州大学魏明灯博士提出的染料敏化太阳电池与储能结合的思想, 中国科学院物理所孟庆波博士提出的环境友好的复合电解质, 清华大学林红博士提出的新型高效低成本叠层柔性薄膜太阳电池等, 都是对染料敏化太阳电池各项关键技术和材料提出的新思路和方法。国家重点基础研究计划和纳米专项 (973 项目) 先后三次对染料敏化太阳电池进行立项, 中国科学院知识创新工程也把染料敏化太阳电池项目作为重要方向, 重点解决目前染料敏化太阳电池所遇到的关键问题, 并先后在基础科学问题和关键技术问题上取得突破。中国科学院等离子体物理研究所早在 1994 年就开始对染料敏化太阳电池进行研究和开发, 并取得了相当的科研成果。特别是在科技部“十五”和“十一五”973 项目的支持下, 小面积太阳电池的实验室光电转换效率最高达 9%, 大面积电池组件 (40cm × 60cm) 光电转换效率达 5.7%, 为目前国际较好的研究成果之一。在染料合成技术、纳米半导体薄膜研究、电池密封和电极研制上也取得一定的成果, 设计合成了多种新型染料光敏化剂, 并研究其吸附性能和空间效应对敏化性能的影响, 综合了各项关键技术, 制备出 15cm × 20cm 的太阳电池组件, 在室内 1 个太阳光照时效率为 6.3%。中国科学院长春应用化学研究所在新型染料研究和离子液态电解质上取得突破, 实现自主研发染料 C101, 效率达到 11%, 基于混合离子液态电解质电池的效率达到 8.2%, 从而在该领域具有一定的影响。另外, 北京大学、清华大学、复旦大学、浙江大学、南京大学、吉林大学、武汉大学、天津大学、东南大学、华侨大学、河北科技大学、华南理工大学、华东理工大学等先后在染料敏化剂、纳米薄膜修饰和电池光电转换效率上取得了较好的结果。

在 1992 ~ 1999 年期间, 以德国光伏研究所 (INAP) 和澳大利亚 STA (后并入 STI, 现并入 Dyesol 公司) 为典型的产业化研究机构进行了产业化前期的探索性研究。2001 年 5 月 2 日, 通过多年的实践, STI 建立了世界上首条染料敏化太阳电池中试线。STI 与中国科学院等离子体物理研究所合作生产的产品在 2001 年苏州 APEC 展览会上首次亮相, 赢得国际同行的赞赏。2003 年完成 200m² 染料敏化太阳电池显示屋顶, 集中体现了未来工业化的前景。2004 年底, 中国科学院等离子体物理研究所建立了 500W 染料敏化太阳电池示范系统, 并保持长期有效的运行, 为今后实现产业化打下了基础。

七、IBM 廉价高效薄膜太阳电池

IBM 公司材料科学家大卫·米兹及其研究团队在《先进材料》上发表了一份研究报告, 宣告 IBM 成功研制出一款价格低廉、在成本上拥有绝对优势, 但却拥有超高光电转换率的多元化合物薄膜太阳电池, 该薄膜太阳电池的光电转换率达 9.6%。这个数据并非实验室的一家之言, 而是经由美国能源部正式测试并予以公布的。值得注意的是, 此前用同样材料 (不含铜、镓或镉的相关化合物) 制成的薄膜电池光电转换率仅为 6.7%。IBM 新款薄膜电池的原料是铜、锌、锡、硒和硫黄 5 种原料的组合, 全部都是相对常见、价格低廉的原材料。对于 IBM 的新型薄膜电池, 从表面看, 米兹的研究团队仅仅是替换了常规多元化合物薄膜电池中的几个原材料, 但其精妙之处在于独特的制作工艺。常规的薄膜电池在制造

过程中，涉及在真空状态下的汽化喷涂和沉积，而这需要耗费大量的能量来实现；米兹和同事则大多是在液体和粒子的混合状态下进行操作，比如铜和锡是液态，而锌是粒子状态，这在电池制造过程中将大幅降低浸渍、喷涂和隙缝浇注的成本。这种技术还处于实验室阶段，尚未经过实践检验，并且实验室里的光伏电池在“实战”中效率总会打折扣，以单晶硅太阳电池为例，它在实验室里的最高光电转换率达到了 24.7%，但在量产后的实际应用中却降到了 15% 左右。因此，这种新型薄膜电池量产后的效率是多少，尚要拭目以待。

从转换效率和材料的来源角度讲，今后发展的重点仍是硅太阳电池，特别是多晶硅和非晶硅薄膜电池。由于多晶硅和非晶硅薄膜电池具有较高的转换效率和相对较低的成本，将最终取代单晶硅电池，成为市场的主导产品。提高转换效率和降低成本是太阳电池制备中考虑的两个主要因素，对于目前的硅系太阳电池，要想再进一步提高转换效率是比较困难的。因此，今后研究的重点除继续开发新的电池材料外应集中在如何降低成本上来，现有的高转换效率的太阳电池是在高质量的硅片上制成的，这是制造硅太阳电池最费钱的部分。因此，在如何保证转换效率仍较高的情况下来降低衬底的成本就显得尤为重要，也是今后太阳电池发展亟需解决的问题。近来国外曾采用某些技术制得硅条带作为多晶硅薄膜太阳电池的基片，以达到降低成本的目的，效果还是比较理想的。

综合比较几种薄膜电池的技术及其优缺点，在进行薄膜电池投资或研究时，应着重考虑以下两点：第一，原材料拥有量。当一种太阳电池作为替代型能源产品时，其应用规模将是巨大的，因此必须考虑其所用原材料在地球上的拥有量，以及电池工艺中的单位原材料使用量。从这个角度考虑，硅太阳电池将最终成为胜出的产品，硅在地球中的含量占到 26%，仅次于氧，为地球上储量第二位的元素。因此，没有一种薄膜电池在长远来看可以和硅基薄膜电池相比，不论 CIGS 还是 CdTe 电池，其基本原材料中都含有储量不足的稀有金属，前景不容乐观。即使是新兴的像纳米染料二氧化钛太阳电池也因大量使用钛这种稀有元素而增加了对其原材料供应的忧虑。第二，技术进步的风险。目前各种薄膜电池都处在刚刚进入市场的阶段，前期一些厂家和研究单位为了开发技术和设备投入了巨大的人力和资金，因此新技术的设备制造成本和工艺成本都很高，使得薄膜电池生产线的价格居高不下，更为关键的是薄膜电池目前的技术进步很快，在电池厂商花巨资购买了昂贵的薄膜电池制造设备之后，在较短的时间内就有新技术出现，因此旧有设备就很可能遭到淘汰。这就使得薄膜电池设备的折旧过高，影响了薄膜太阳电池成本的降低。再有就是我国薄膜电池厂商的技术实力很弱，没有薄膜电池技术更新的能力，因此在新技术和新设备出现之后，厂家无力跟上技术进步，将面临重新购买新设备或者被淘汰出局的局面。

第二节 国内外薄膜太阳电池制造现状

一、国内薄膜太阳电池制造厂商

国内进入薄膜太阳电池产业的制造厂商很多，不断有人进入，有人退出，资料也不断更新，收集的也不全。表 1-1 为国内主要非晶硅薄膜太阳电池制造厂商。

我国薄膜企业众多，这里重点介绍十几家有代表性企业的状况，勾勒出我国薄膜太阳电池行业的外貌。