

中央广播电视大学教材

光伏电池原理 与工艺

GUANGFU DIANCHI YUANLI
YU GONGYI

罗玉峰 主编

 中央广播电视大学出版社

中央广播电视大学教材

光伏电池原理与工艺

罗玉峰 主编

中央广播电视大学出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏电池原理与工艺/罗玉峰主编. —北京: 中央广播电视大学出版社, 2011. 8

中央广播电视大学教材

ISBN 978 - 7 - 304 - 05190 - 7

I. ①光… II. ①罗… III. ①光电池—广播电视大学—教材 IV. ①TM914

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 148848 号

版权所有, 翻印必究。

中央广播电视大学教材

光伏电池原理与工艺

罗玉峰 主编

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 营销中心 010-58840200

总编室 010-68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 杜建伟

版式设计: 何智杰

责任编辑: 王国华

责任版式: 张利萍

责任印制: 赵联生

责任校对: 王 亚

印刷: 北京云浩印刷有限责任公司

印数: 0001~3000

版本: 2011 年 8 月第 1 版

2011 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 13.5

字数: 300 千字 彩插: 2

书号: ISBN 978 - 7 - 304 - 05190 - 7

定价: 22.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

光伏发电技术及应用专业系列
教材编写委员会

主任	沈建华	江西广播电视大学
	罗玉峰	新余学院
副主任	钟志贤	江西广播电视大学
	谷良	中央广播电视大学
委员	陈江鸿	江西广播电视大学
	廖卫兵	新余学院
	曾宪宁	江西广播电视大学
	邹运明	江西广播电视大学
	黄纯斌	江西广播电视大学
	陈丽	江西广播电视大学
秘书长	陈丽	江西广播电视大学

前 言

太阳能是取之不尽、用之不竭的无污染清洁能源，在人类的发展中起着举足轻重的作用。太阳能光伏产业是 21 世纪最具竞争力的朝阳产业之一。科学的发展和技术的竞争最终还是靠人才。太阳能光伏产业刚刚起步，技术人才缺乏，培养人才是当务之急。为了产业的发展和人才的培养，编写优良的光伏教材具有重大的意义。

光伏电池是利用光伏效应等作用制成的半导体光电子器件，它直接将光能转换成电能。本书共 6 章，包括光伏电池与太阳辐射，晶体结构、晶体缺陷，pn 结及光伏效应，光伏电池的效率及影响因素，光伏电池工艺，其他太阳电池等内容。主要从太阳光的分布、载流子的统计、光伏电池的工作原理及电池的制备技术等方面综合阐述，涉及载流子定向分流的电工原理、载流子电动力学的运动规律和光子非平衡介入方式等范畴，三者融合给出定性的光伏电子学能量转换的数学形式。同时本书尽可能介绍了目前民用的、以半导体为主体材料的各种光伏电池。本书的难度不是很大，容易学习，适合作为大、中专院校相关专业教材和供光伏产业的技术人员阅读。

本书由罗玉峰任主编。第 1 章、第 2 章由朱桂新编写；第 3 章、第 4 章由吴闰生编写，第 5 章、第 6 章由王昌中编写。何伟、廖佐昇、刘波做了实验部分，光伏晶硅电池生产流程、工艺与主要设备图解，光伏电池应用产品（彩图）等内容的收集和编写工作。

由于我们水平有限、经验不足、时间仓促，书中难免会有疏漏之处，请广大读者批评指正。

编 者
2011 年 4 月

目 录

第 1 章 光伏电池与太阳辐射	(1)
1.1 光伏电池发展概况	(2)
1.1.1 世界光伏电池发展	(2)
1.1.2 中国光伏电池发展	(3)
1.2 太阳电池材料及制造工艺	(4)
1.3 光伏发电系统的应用和光伏发电现状	(8)
1.4 太阳辐射	(11)
1.4.1 太阳	(11)
1.4.2 地球绕太阳运行规律和太阳角度计算	(14)
1.4.3 太阳常数和太阳辐射光谱	(18)
1.4.4 大气层对太阳辐射的影响	(20)
1.5 水平面上太阳辐射量的计算与倾斜面上太阳 辐射量的估算	(26)
1.5.1 标准晴天水平面上辐射量的计算	(26)
1.5.2 工程中常用的计算倾斜面上太阳辐射 的方法	(27)
1.6 世界和中国太阳能资源分布	(28)
1.6.1 世界太阳能资源分布	(28)
1.6.2 我国太阳能资源分布	(29)
1.6.3 我国日照时数分布	(29)
第 2 章 晶体结构、晶体缺陷	(33)
2.1 晶体的结构及其特征	(35)
2.2 空间点阵	(36)
2.2.1 结点	(37)
2.2.2 晶体结构的周期性	(37)
2.2.3 晶格 布拉维点阵	(37)
2.3 晶格的周期性	(37)
2.3.1 原胞和晶胞	(38)

2.3.2	晶体结构	(38)
2.3.3	几种典型的晶体结构	(40)
2.4	晶列与晶面	(42)
2.4.1	晶列及其表示	(42)
2.4.2	晶面及其表示	(43)
2.5	倒格子	(46)
2.5.1	倒格子基矢定义	(46)
2.5.2	倒格子的性质	(46)
2.6	布里渊区	(48)
2.6.1	一维晶格的布里渊区	(48)
2.6.2	二维正方格子的布里渊区	(48)
2.6.3	体心立方晶格第一布里渊区	(49)
2.6.4	面心立方晶格第一布里渊区	(50)
2.7	晶体的对称性	(51)
2.8	晶系	(54)
2.9	缺陷的类型	(56)
2.9.1	点缺陷	(57)
2.9.2	线缺陷	(61)
2.9.3	面缺陷	(63)
2.10	位错的滑移与性质	(63)
2.10.1	刃型位错的滑移过程和机理	(64)
2.10.2	螺旋位错与晶体生长	(64)
2.11	热缺陷的统计平衡理论	(65)
2.12	能带理论	(66)
2.12.1	原子中的电子能级与固体中的电子能带	(66)
2.12.2	导体、半导体、绝缘体的能带	(68)
第3章	pn 结及光伏效应	(72)
3.1	pn 结理论基础	(73)
3.1.1	几个常用函数	(73)
3.1.2	载流子浓度	(74)
3.2	本征半导体	(76)
3.3	n、p 型半导体	(77)
3.3.1	n 型半导体的形成, 电中性条件	(77)
3.3.2	n 型半导体的费米能级及能带	(79)

3.3.3	p 型半导体的形成, 电中性条件	(80)
3.3.4	p 型半导体的费米能级及能带	(82)
3.4	热平衡 pn 结	(83)
3.4.1	pn 结的形成	(83)
3.4.2	pn 结中电子和空穴的输运方程	(84)
3.4.3	pn 结的能带和静电势	(85)
3.5	非平衡 pn 结	(87)
3.5.1	正向偏压下的 pn 结	(88)
3.5.2	反向偏压下的 pn 结	(90)
3.6	光照情况下的 pn 结	(92)
第 4 章	光伏电池的效率及影响因素	(96)
4.1	太阳电池的等效电路及重要参数	(97)
4.1.1	等效电路	(97)
4.1.2	输出特性	(98)
4.1.3	最大功率点	(99)
4.1.4	短路电流	(100)
4.1.5	开路电压	(101)
4.1.6	太阳电池伏安特性曲线	(102)
4.1.7	填充因子	(102)
4.1.8	转换效率	(103)
4.1.9	太阳电池的光谱响应	(103)
4.2	太阳电池的特性及其影响因素	(104)
4.2.1	太阳电池片厚度对电池性能的影响	(104)
4.2.2	温度和光强度对电池性能的影响	(105)
4.2.3	辐照对电池性能的影响	(108)
4.3	光伏电池的应用、效率损耗分析和应对措施	(108)
4.3.1	光伏电池的应用	(108)
4.3.2	电池的效率损耗分析	(110)
4.3.3	提高太阳电池效率的途径	(111)
4.4	太阳电池测量条件和测量原理	(112)
4.4.1	测量条件	(112)
4.4.2	测量项目	(113)
4.4.3	测量原理	(113)
4.4.4	阳光下测量	(114)

4.4.5	非晶硅电池的测量	(114)
第5章	光伏电池工艺	(119)
5.1	硅片的生产	(120)
5.1.1	多晶硅片的生产	(120)
5.1.2	单晶硅片的生产	(121)
5.2	硅太阳能电池工艺	(124)
5.2.1	选料	(124)
5.2.2	硅片清洗	(124)
5.2.3	硅片表面腐蚀	(125)
5.2.4	制绒	(126)
5.2.5	制备 pn 结	(129)
5.2.6	去磷硅玻璃	(134)
5.2.7	氧化及表面钝化	(135)
5.2.8	去除周边 pn 结	(137)
5.2.9	沉积减反射膜	(138)
5.2.10	制备电极	(141)
5.3	测试	(146)
5.3.1	阳极氧化测结深	(146)
5.3.2	四探针测量方块电阻	(147)
5.3.3	少子寿命的测试	(149)
第6章	其他太阳电池	(153)
6.1	半导体异质结太阳电池	(154)
6.1.1	半导体异质结太阳电池的工作原理	(155)
6.1.2	砷化镓太阳电池	(156)
6.1.3	碲化镉太阳电池	(159)
6.1.4	硫化亚铜 - 硫化镉太阳电池	(160)
6.2	非晶硅薄膜太阳电池	(163)
6.2.1	非晶硅材料的性质	(163)
6.2.2	非晶硅薄膜太阳电池的工作原理	(164)
6.2.3	非晶硅薄膜太阳电池的结构	(165)
6.3	微晶硅薄膜太阳电池	(166)
6.3.1	微晶硅太阳电池的结构及工作原理	(166)
6.3.2	微晶硅电池的陷光效应	(167)

6.4 铜铟镓硒薄膜太阳电池	(167)
6.4.1 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$ 材料的性质	(167)
6.4.2 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$ 电池结构	(167)
6.4.3 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}$ 薄膜材料的制备	(168)
6.5 染料敏化太阳电池	(169)
6.5.1 电池结构	(169)
6.5.2 染料敏化太阳电池的工作原理	(170)
6.5.3 染料敏化太阳电池的制备工艺	(170)
6.6 肖特基势垒太阳电池及反型层太阳电池	(171)
6.6.1 肖特基势垒太阳电池	(171)
6.6.2 金属-绝缘层-半导体结构	(177)
附录 1 光伏电池原理与工艺实验	(182)
实验一 四探针法测量半导体材料的电阻率	(182)
实验二 半导体 pn 结的物理特性及弱电流测量实验	(184)
实验三 太阳电池主要特性测试实验	(189)
附录 2 光伏晶硅电池生产流程、工艺与主要设备图解	(193)
附录 3 主要参数符号表	(199)
附录 4 常用物理常数和能量表达变换表	(201)
附录 5 几种常用光伏电池材料物理性质表	(202)
参考文献	(203)
光伏电池应用产品 (彩图)	(205)

第 1 章

光伏电池与太阳辐射

学习目标

熟练掌握：到达地球表面的太阳辐射计算；已知某地水平面上的太阳辐射情况，估算倾斜面上的太阳辐射量。

掌握：光伏电池材料、光伏发电系统。

了解：太阳能电池发展概况、生产工艺、太阳能资源分布。

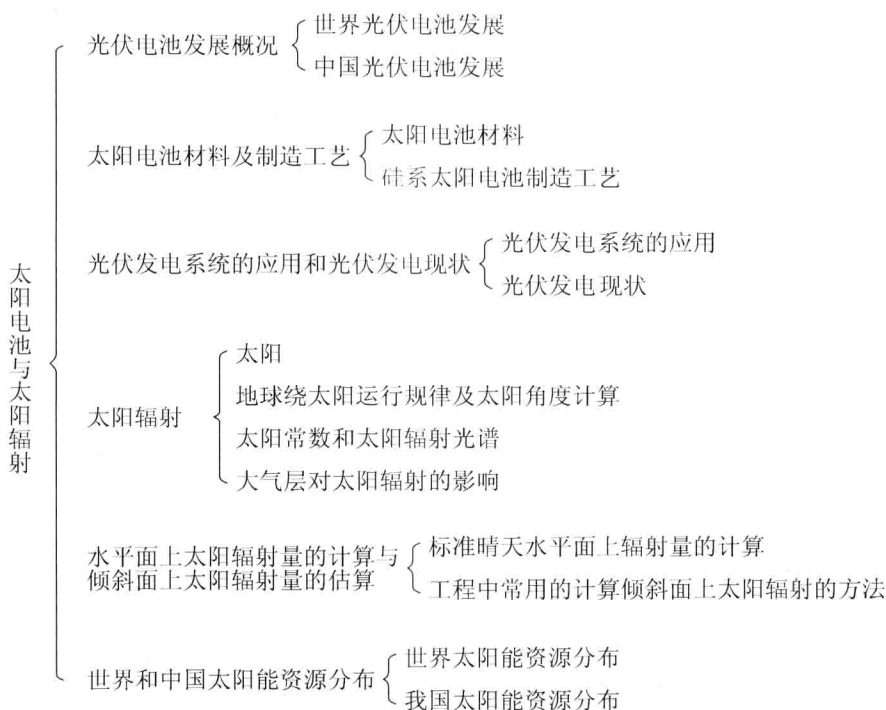
学习重点

到达地球表面的太阳辐射计算、估算某地倾斜面上太阳辐射量。

关键词

光伏电池、光伏发电系统、太阳辐射、直接辐射、散射辐射、辐照度、太阳能资源、辐射量计算

本章知识结构图



1.1 光伏电池发展概况

1.1.1 世界光伏电池发展

太阳能光伏发电最核心的器件是太阳电池（也称光伏电池，太阳能电池），它的发展历史已超过了160年。从它的发展历史来看，随着基础研究和技术的进步，太阳电池取得了长足的发展，但是，太阳电池的基本结构和基本原理的变化都不大。总的来说，太阳电池发展大约经历了以下几个发展阶段。

第一阶段从1839年到1953年。早在1839年，法国实验物理学家贝克勒尔（Bequerel）就发现光照能使半导体材料产生电位差。这种现象称为“光生伏打效应”，简称“光伏效应”。1877年亚当斯（Adams）和戴依（Day）研究了硒（Se）的光伏效应，并制作第一片硒太阳电池。1883年美国的菲特（Fritts）阐述了第一块硒太阳电池的工作原理。1904年霍尔瓦克斯（Hallwachs）发现铜与氧化亚铜结合在一起具有光敏特性。1930年朗（Lang）研

究了氧化亚铜/铜太阳电池，发表论文“新型光伏电池”；肖特基（Schottky）发表论文“新型氧化亚铜光电池”。1932年奥多伯特（Audobert）和斯道拉（Stora）发现硫化镉（CdS）的光伏现象。1933年格隆达尔（Grondahl）发表论文“铜-氧化亚铜整流器和光电池”。1951年生长出pn结，实现制备单晶锗电池。1953年韦恩（Wayne）州立大学的屈维奇（Trivich）博士完成基于太阳光谱的具有不同带隙宽度的各类材料光电转换效率的第一个理论计算。

第二阶段从1954年到1984年。1954年美国科学家沙班（Chapin）、富勒（Fuller）和皮尔森（Pearson）制成了实用的单晶硅太阳电池，效率达到6%。1955年效率为2%的商业太阳电池产品问世。1957年单晶硅电池效率达到8%。1958年美国制成n/p型单晶硅光伏电池，单晶硅电池效率达到9%；第一个光伏电池供电的卫星“先锋一号”发射。1959年可商业化的单晶硅电池效率达到10%，并通过用网栅电极来显著减小光伏电池串联电阻；卫星“探险家六号”发射，共用9600片太阳电池阵列，每片 2 cm^2 ，共20W。1960年单晶硅电池效率达到14%。1963年光伏电池组件问世，日本在一个灯塔安装242W光伏电池阵列，是当时世界最大的光伏电池阵列。1973年美国特拉华（Delaware）大学建成世界第一个光伏住宅。1977年制成世界上第一个非晶硅（a-Si）太阳电池。1984年面积为 929 cm^2 的商品化非晶硅太阳电池组件问世。

第三阶段从1985年到现在。1985年澳大利亚新南威尔士（New South Wales）大学的格林（Green）研制出的单晶硅的太阳电池效率达到20%。1991年瑞士格兰泽尔（Gratzel）教授研制的纳米 TiO_2 染料敏化太阳电池效率达到7%。1999年美国国家可再生能源实验室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）的孔特雷拉斯（Contreras）等报道的铜铟硒（CIS）太阳电池效率达到18.8%。2000年Wu、Dhere、Aibin等报道的碲化镉（CdTe）太阳电池效率达到16.4%。2003年德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所（Fraunhofer ISE）研制的LFC（laser-fired-contact）晶体硅太阳电池效率达到20%。2004年德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所研制的多晶硅太阳电池效率达到20.3%。2007年，斯派克（Spectrolab）研制的砷化镓多结太阳电池转换效率达到40.7%。

1.1.2 中国光伏电池发展

1958年我国开始研制太阳电池。1959年中国科学院半导体研究所研制成功第一片具有实用价值的太阳电池。1971年3月在我国发射的第二颗人造卫星——科学实验卫星实践一号上首次应用太阳电池。1979年我国开始利用半导体工业废次硅材料生产单晶硅太阳电池。1980年到1990年期间我国引进国外太阳电池关键设备、成套生产线和技术。2006年，我国的太阳电池组件产量在 10 MW/a 以上，我国成为世界重要的光伏工业基地之一，初步形成一个以光伏工业为源头的光伏产业链。

1.2 太阳能电池材料及制造工艺

1. 太阳能电池材料

迄今为止，晶体硅仍然是太阳能发电的主要材料。后来的发展主要是薄膜电池的研发，如非晶硅太阳能电池、铜铟镓硒太阳能电池、碲化镉太阳能电池和染料敏化纳米晶太阳能电池等。为了大幅度降低太阳能电池的成本，光伏界先后开发出非晶硅薄膜电池、碲化镉电池、铜铟硒电池等。特别是非晶硅电池，20世纪80年代初一问世，很快实现了商业化生产。非晶硅电池效率低、工作不稳定（光衰减）。碲化镉电池性能稳定，但资源有限且镉毒性大。铜铟镓硒电池的实验室效率较高，最近达到18%，但工艺问题没有根本解决，至今仍停留在实验室和中试阶段。

(1) 硅系太阳能电池

硅系太阳能电池主要包括单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、非晶硅太阳能电池。其中单晶硅太阳能电池转换效率最高。高性能单晶硅电池是建立在高质量单晶硅材料和相关的加工工艺基础上的，一般都采用表面织构化、发射区钝化、分区掺杂等技术，提高转化效率主要依靠单晶硅表面微结构处理和分区掺杂工艺。

由于受单晶硅材料价格及烦琐的电池制造工艺影响，单晶硅电池成本价格较高，要想大幅度降低其成本是非常困难的。为了节省材料和降低成本，现在发展了薄膜太阳能电池，其中多晶硅薄膜太阳能电池和非晶硅薄膜太阳能电池就是典型代表。

多晶硅薄膜太阳能电池的出现主要是为了降低成本，其优点是制造设备比较简单，制造过程简单、省电，节约硅材料，对材料质量要求也较低。由于受材质和晶界的影响，多晶硅薄膜电池效率较低。电池工艺主要采用吸杂、钝化、背场等技术。另外，采用薄片硅技术以避免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。

晶体硅电池效率不断提高，技术不断改进，加上晶硅无毒，材料资源丰富，多晶硅薄膜电池被开发出来。多晶硅薄膜电池既具有晶硅电池的高效、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。各种化学气相沉积，包括等离子增强化学气相沉积（plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD）、快速加热化学气相沉积（rapid thermal chemical vapor deposition, RTCVD）、催化化学气相沉积法（catalytic chemical vapor deposition, Cat-CVD）、热丝化学气相沉积（hot-wire-assisted chemical vapor deposition, HWCVD）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成果。例如，日本采用 PECVD 技术在 550 °C 以下和玻璃衬底上制备出的多晶硅薄膜电池，总厚度约 2 μm，效率达到 10%；德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所制造的多晶硅薄膜电池，硅膜经过区熔再结晶（zone-melt recrystallized, ZMR），电池效率在 9.3% ~ 11%。北京市太阳能研究所 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电池， 1 cm^2 电池效率在大气质量（air mass, AM）1.5 条件下达到 13.6%。

澳大利亚新南威尔士大学在 1994 年提出一种多层多晶硅薄膜电池的概念和技术，最近报道已经生产出 $30\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 的中试电池组件。薄膜采用化学气相沉积（chemical vapor deposition, CVD）工艺沉积，衬底为玻璃，通过激光刻槽和化学镀实现接触、互连和集成。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。

非晶硅薄膜太阳电池是 20 世纪 70 年代中期才发展起来的一种新型薄膜太阳电池。这种电池与传统晶体硅太阳电池相比，具有成本相对较低、制造工艺简单等优点，因而受到人们的重视。非晶硅薄膜太阳电池转换效率已从 1976 年的 1% ~ 2% 提高到稳定的 12% ~ 14%。非晶硅具有较高的光吸收系数，特别是在 $0.3 \sim 0.75\ \mu\text{m}$ 的可见光波段，它的吸收系数比单晶硅要高出一个数量级，用很薄的非晶硅膜（约 $1\ \mu\text{m}$ 厚）就能吸收 90% 有用的太阳能，这是非晶硅薄膜太阳电池价格低的最主要因素。制备非晶硅的工艺和设备简单、沉积温度低、时间短，适用大批生产。由于非晶硅没有晶体所要求的周期性原子排列，可以不考虑制备晶体所必须考虑的材料与衬底间的晶格失配问题。因而它几乎可以沉积在任何衬底上，并且易于实现大面积生产。但是，非晶硅有两个致命缺点：一是工作性能不稳定，寿命短，在光的不断照射下会发生光致衰减效应，即斯特厄布勒-若恩斯基（Staebler-Wronski）效应（简称 S-W 效应），光电转化效率会下降到原来的 25%；二是它的光电转化效率比晶体硅太阳电池低，非晶硅的光电转化效率一直没有超过 10%。

（2）多元化合物薄膜太阳电池

多元化合物薄膜太阳电池材料主要包括砷化镓、硫化镉、铜铟硒薄膜电池。硫化镉、碲化镉多晶硅薄膜电池的效率较非晶硅薄膜太阳电池效率高，成本较单晶硅电池低，并且也易于大规模生产。但由于碲在地球上储量有限，此类电池不可能大规模使用。

砷化镓及铜铟硒薄膜电池具有较高的转换效率，砷化镓薄膜太阳电池目前最高转换效率记录为 24.5%。砷化镓属于 III-V 族化合物半导体材料，其能隙为 1.4 eV，正好为高吸收率太阳光的值，因此，它是很理想的电池材料。砷化镓等 III-V 族化合物薄膜电池的制备主要采用金属有机气相外延（metalorganic vapor phase epitaxy, MOVPE）和液相外延（liquid phase epitaxy, LPE）技术。但是，砷化镓材料的价格相对较高，因而限制了砷化镓电池的大规模使用。

其他 III-V 族化合物如锑化镓（GaSb）、镓铟磷（GaInP）等电池材料也研发出来。德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所首次制备的镓铟磷电池转换效率为 14.7%。另外，该研究所还采用堆叠结构制备砷化镓/锑化镓电池，该电池是将两个独立的电池堆叠在一起，砷化镓作为上电池，下电池用的是锑化镓，所得到的电池效率达到 31.1%。

铜铟镓硒（或称铜铟硒）材料的能隙为 1.1 eV，适于太阳光的光电转换。铜铟镓硒薄膜电池的转换效率在 20 世纪 80 年代最初为 8%，到目前的最高纪录为 19.2%。铜铟镓硒作为太阳能电池的半导体材料，具有价格低廉、性能良好、制造工艺简单等优点。唯

一的问题是材料的储量少，由于铜和硒都是比较稀有的元素，因此这类电池的发展必然受到限制。

碲化镉是 II-VI 族化合物，它是一种直接带隙材料，禁带宽度为 1.45 eV。由于碲化镉是直接带隙材料，其光吸收系数极大，厚度 1 μm 的薄膜就可以吸收能量大于其禁带宽度的太阳辐射的 99%，所以这就降低了对材料扩散长度的要求，且其光谱响应与太阳能光谱十分吻合，它是十分理想的太阳电池材料，已成为公认的高效、稳定、廉价的薄膜太阳电池材料。碲化镉薄膜太阳电池转换效率理论值为 29%。碲化镉薄膜太阳电池的主要优点是相对转换效率高、成本低。但碲化镉薄膜电池也有致命的缺点，碲天然储藏量较少，所以无法大规模使用此类太阳能电池。

(3) 染料敏化纳米晶薄膜太阳电池

20 世纪 60 年代，科学家发现染料吸附在半导体上，在一定条件下能产生电流，这种现象成为光电化学电池的基础。染料敏化太阳电池与传统硅太阳电池原理不同，二氧化钛属于宽带隙半导体（带隙宽度 3.2 eV），具有较高的热稳定性和光化学稳定性，不能被可见光激发。但将合适的染料吸附到这种半导体的表面上，借助于染料对可见光的强吸收，可以将宽带隙半导体拓宽到可见区，这种现象称为半导体的敏化作用，载有染料的半导体称为染料敏化半导体电极。20 世纪 70—90 年代，科学家们研究了各种染料敏化剂与半导体纳米晶光敏化作用，这类电极只有表面吸附单层染料，光电转换效率小于 1%。直到 1991 年，瑞士洛桑高等工业学院研究小组将高比表面积的纳米晶多孔二氧化钛膜作半导体电极引入到染料敏化电极的研究当中，这种高比表面积的纳米晶多孔二氧化钛组成海绵式的多孔网状结构，使得它的总表面积远远大于其几何面积，可以增大 1 000 ~ 2 000 倍，能有效地吸收阳光，这使得染料敏化光电池的光电能量转换率有了很大提高，其光电能量转换率可达 7.1%，入射光子电流转换效率大于 80%。

纳米晶二氧化钛太阳电池的优点较多：一是它廉价的成本和简单的工艺。其光电效率接近 10%，制作成本仅为硅太阳电池的 1/10 ~ 1/5，寿命能达到 20 年以上。二是纳米晶二氧化钛太阳电池对环境危害小。三是效率转换基本上不受温度影响。四是光的利用效率高，对光线的入射角度不敏感，可充分利用折射光和反射光。

纳米晶二氧化钛太阳电池虽然有光明的前景，但对它的研究仍在起步阶段，还有较多难以克服的缺陷使其不能被广泛应用。

2. 硅系太阳电池制造工艺

由硅矿制备成太阳电池，需要经过非常复杂的工艺程序，大体制备过程为：硅矿、冶金级硅、多晶硅、单晶硅棒（多晶硅锭）、硅片、电池片、电池组件。其中主要制作工序为多晶硅制备、提纯、硅片切割和电池片制作、电池组件制作五个阶段。

从冶金级硅提炼出太阳能级多晶硅是整个产业链的核心技术所在，它制约着光伏产业链的发展，这缘于两个因素：一是提炼晶体硅的工艺成本和技术；二是生产多晶硅流程中的高耗能、高污染的环境成本。

(1) 多晶硅制备

① 改良西门子法

西门子公司开发的在硅芯发热体上沉积硅的工艺技术，称西门子法。在此基础上，实现了闭路循环，形成了改良西门子法。改良西门子法是目前生产多晶硅最为成熟、投资风险最小、最容易扩建的工艺，国内外现有的多晶硅厂大多采用此法生产太阳能级与电子级多晶硅，占当今世界生产总量的70%~80%，电力成本约占总成本的70%。这种方法是目前的主流工艺技术。

该方法利用 Cl_2 和 H_2 合成 HCl ， HCl 和工业硅粉在一定的温度下合成 SiHCl_3 ，然后对 SiHCl_3 进行分离精馏提纯，提纯后的 SiHCl_3 在氢还原炉内进行化学气相沉积反应得到高纯多晶硅。

② 流化床法

该方法是以 SiCl_4 、 H_2 、 HCl 和工业硅为原料，在高温高压流化床内生成 SiHCl_3 ，使 SiHCl_3 再进一步发生歧化加氢反应生成 SiH_2Cl_2 ，继而生成硅烷气。制得的硅烷气通入加有小颗粒硅粉的流化床反应炉内进行连续热分解反应，生成粒状多晶硅产品。

③ 冶金法

日本开发了由冶金级硅生产太阳能级多晶硅的方法。采用纯度较高的工业硅进行水平区熔单向凝固成硅锭，除去硅锭中的金属、硼、磷和碳杂质后再清洗，在熔解炉内直接生成太阳能级多晶硅。美国是世界上第一个采用冶金法大规模生产出多晶硅材料的国家。

近年来涌现出多种专门用于太阳能级多晶硅生产的低成本新技术工艺，如气-液沉积法、区域熔化提纯法、无氯技术、碳热还原反应法、铝热还原法，以及常压碘化学气相传输净化法等。目前，太阳能级多晶硅制备技术与工艺主要掌握在美国、日本、德国以及挪威等国家手中，形成技术封锁和垄断。

(2) 提纯

单晶硅棒生产最常用的工艺就是直拉法。在这个过程中，多晶硅料放入石英坩埚中，经加温后缓慢熔化，浸入一根具有一定晶向的籽晶，经过缩颈、放肩、转肩、等径、收尾生长和冷却过程，制成一根单晶。多晶硅锭生产最常用的工艺是铸锭法。在这个过程中，多晶硅放入石英坩埚中，经过加热、熔化、长晶、退火和冷却，最后制成一个多晶硅锭。

(3) 硅片切割

把单晶硅棒或多晶硅锭切割成硅片，目前基本上采用的是多线切割技术。将硅棒或硅锭经表面整形、定向、切割、研磨、腐蚀、抛光、清洗等工艺，加工成符合特定要求的硅片。目前，国际上部分厂家量产的硅片厚度可以达到 $170\ \mu\text{m}$ ，硅片的利用率已经提高到32%以上。

(4) 电池片制作

拉棒切片的下一个环节就是生产太阳能电池。制造太阳能晶硅电池需要经过很多工艺，其中包括硅片清洗、表面制绒、扩散制结、去磷硅玻璃、等离子刻蚀、镀减反射膜和丝网印刷等。