

文章编号: 1673 - 9620 (2008) 03 - 0069 - 05

# 太阳能电池研究的现状与发展前景<sup>\*</sup>

谢建生, 李金华

(江苏工业学院 数理学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 太阳能电池的利用可为人类社会提供可再生的清洁能源。综述了太阳能电池的研究现状, 从材料、工艺与转换效率等方面讨论了它们的优势和不足之处, 并对太阳能电池的发展趋势进行了预测。

**关键词:** 太阳能电池; 材料; 转换效率

**中图分类号:** TB 43; TN 213

**文献标识码:** A

## Status Quo of the Research on Solar Cells and its Development Trends

XIE Jian - sheng, LI Jin - hua

(School of Mathematics and Physics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The application of solar cells has offered human society renewable clean energy. The status quo of the research on solar cells was reviewed in this paper. The types of solar cells, including silicon solar cells, thin film solar cells, organic solar cells and nanocrystalline photovoltaic solar cells, were summarized. The advantage and disadvantage of different types of solar cells were discussed in various aspects such as materials, technics and conversion efficiency. At last the development trends of solar cells were predicated.

**Key words:** solar cells; material; transition efficiency

目前人类的主要能源(石油、煤炭、天然气)的储存量是有限的, 这使人们认识到寻求新的可再生的能源的迫切性; 同时由于传统能源燃烧时产生的各种废气对人类的生存环境具有很大的损坏作用, 也使人们逐渐认识到无污染能源的重要性。无污染能源主要有风力、水力、太阳能等, 由于风力和水力的利用受地理环境和天气情况的限制比较大, 而太阳能具有取之不尽、用之不竭、无污染、使用方便等优点。太阳每小时辐射到地球上的能量相当于地球一年需要的能量<sup>[1]</sup>, 有希望逐渐成为人类能源的重要组成部分。

## 1 太阳能电池的历史与发展

利用光电转换效应将太阳能转化为电能的太阳能电池一直是国内外研究的热点。光伏效应最早于 1839 年由 Becquerel 发现, 并由 Fritt 在 1883 年造出了世界上第一只硒光生伏特电池。经过几十年的发展, 1941 年, Ohl 提出了硅 p - n 结光伏器件<sup>[2]</sup>。这也是现代太阳能电池的雏形。在此基础上, 美国贝尔实验室于 1954 年制造出第一只具有实用意义的硅扩散 p - n 结太阳能电池<sup>[3]</sup>。从此, 太阳能电池进入实用阶段。上世纪 60 年代供空间应用的电池设计成熟, 70 年代初, 硅电池的转换效率大大提高, 太阳能电池开始应用于地面。1972 年, 背电场电池 (BSF)<sup>[4]</sup> 被设计出来, 这种电池

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007 - 12 - 19

作者简介: 谢建生 (1960 - ), 男, 江苏常州人, 副教授, 主要从事信息功能薄膜的研究。

在电池背面进行高掺杂,使得背面出现了同质同型结,称为高低结。高低结大大改善了背面的少子复合并减少了背接触欧姆电阻,使得电池效率明显改观。同时出现了“浅结”设计<sup>[5]</sup>和绒面结构,前者提高了光生载流子的收集,后者降低了入射光的反射损失,大大促进了光生电流的增加,显著提高了电池的性能。1985年后,随着热氧化层钝化技术和吸杂技术的应用,电池效率得到很大的提高。利用这些设计和工艺制造的钝化发射极电池(PE-SO)效率突破20%<sup>[6]</sup>。澳大利亚新南威尔士大学研制出效率达23%的钝化发射极和背面电池(PERC)<sup>[7]</sup>,以及效率为24.4%的钝化发射极和背面局域扩散电池(PERL)<sup>[8]</sup>。单晶硅、多晶硅太阳能电池已经在小规模器件上得到商业应用,如房顶上的太阳能板、便携式计算器、抽水泵等,这些太阳能电池能量收集效率已达到24%,接近于理论计算值的上限27.8%。80年代到90年代,由于各国政府的重视,太阳能电池进入高速发展。80年代后期,随着太阳能电池成本不断下降,世界光伏产品得到了快速的发展。20世纪80年代,世界光伏电池产量的平均年增长率为15%,整个90年代平均年增长率为20%<sup>[9]</sup>。1981年,世界太阳能电池的产量为6 MW,1994年达到70 MW,到1998年已达到157.4 MW,这期间的平均增长速度为25%。在日本和德国,由于政府的补贴,过去10多年太阳能市场以平均31%的速度迅猛增长<sup>[1]</sup>。根据美国世界观察所的报告预测,太阳能电池产业将与通讯行业一起成为发展最快的产业,到21世纪中叶,光伏发电量将占到世界总发电量的1/5。

## 2 太阳能电池的研究现状

目前,太阳能电池的种类十分多。由材料分类可分为4类:硅太阳能电池;多元化合物薄膜太阳能电池;有机物太阳能电池;纳米晶太阳能电池。综合考虑材料的价格、对环境的影响以及转换效率等因素,以硅为原材料的电池是太阳能电池中最重要的成员。

目前研究和应用最广泛的太阳能电池主要是单晶硅、多晶硅和非晶硅电池。硅太阳能电池中以单晶硅太阳能电池转换效率最高,技术也最为成熟。单晶硅电池已十分成熟,效率高,寿命长,在大规模应用和工业生产中,单晶硅太阳能电池占据主导地位。单晶硅电池的最高效率已达到24.4%<sup>[7]</sup>,

而多晶硅电池的效率也已达到19.8%<sup>[10]</sup>。但是硅电池生产工艺比较复杂,需要高温(400~2000)和高真空条件,这导致其制造成本较高;同时其成熟的技术使光电转换效率已基本达到极限值,而且其材料本身不利于降低成本。开发太阳能电池的两个关键是:提高转换效率和降低成本。由于非晶硅薄膜成本低,便于大量生产,受到普遍重视并得到迅速发展。目前非晶硅太阳能电池的研究取得两大进展:3叠层结构非晶硅太阳能电池转换效率达到13%,创下新的记录;3叠层太阳能电池年生产能力达5 MW。非晶硅太阳能电池由于具有较高的转换效率和较低的成本及质量轻等特点,有着极大的潜力。但同时由于它的稳定性不高,直接影响了它的实际应用。如果能进一步解决稳定性问题及提高转换率,那么,非晶硅电池将得到极大的发展,并有可能成为太阳能电池未来的主流发展方向,成为太阳能电池的主要发展产品之一。

多元化合物薄膜太阳能电池主要有砷化镓(GaAs)电池、碲化镉(CdTe)电池、硫化镉(CdS)电池和铜铟硒(CuInSe<sub>2</sub>)薄膜电池。砷化镓及铜铟硒薄膜电池由于具有较高的转换效率受到人们的普遍重视。GaAs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,是很理想的电池材料。除GaAs外,其它Ⅲ-V族化合物如GaSb、GaInP等电池材料也得到了开发。1998年德国费莱堡太阳能系统研究所制得的GaAs太阳能电池转换效率为24.2%,首次制备的GaInP电池转换效率为14.7%。另外,该研究所还采用堆叠结构制备GaAs, GaSb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GaSb电池,所得到的电池效率达到31.1%。最近, S. M. Hubbard<sup>[11]</sup>等人在GaAs太阳电池中引入GaP张应变补偿层,使转换效率得到提高,而暗电流降低。铜铟硒简称CIS。CIS材料的能隙为1.1 eV,适于太阳光的光电转换。另外, CIS薄膜太阳电池不存在光致衰退问题。因此, CIS用作高转换效率薄膜太阳能电池材料也引起了人们的注目。常规制备CIS薄膜的方法有真空蒸发法、电沉积法和溅射合金层硒化法等。目前,高转换效率的CIS薄膜电池一般都是采用多元素共蒸发法制备CIS吸收层的。美国可再生能源实验室采用多元素共蒸发法制备的CIGS薄膜电池的转化效率已

经达到 19.2%, 是 CIS 薄膜太阳能电池中的最高纪录。但多元素共蒸发法的缺点是重复性不好, 而且难以保证大面积上薄膜成分的均匀性。Bhattacharya<sup>[12]</sup>在 1983 年报道用一步电沉积法制备 CIS 薄膜, 其原理是通过电镀的方法一次性将铜、镉、硒等组元沉积到阴极衬底上。电沉积法以能满足低成本和大面积均匀的要求而受到重视, Guillemon<sup>[13]</sup>等人用电沉积法制备铜镉硒电池的转换效率最高超过 10%。溅射合金层硒化法是在基底上溅射沉积铜镉合金层结构, 然后在 HSe 或 Se 的气氛中硒化, 从而制备出 CIS 薄膜。最近, Schmitt<sup>[14]</sup>等人提出射频溅射法直接制备 CIS 薄膜, 从而可以省略硒化工艺。这样既简化了制备过程, 又能保证大面积薄膜的均匀性。通过研究 CIS 薄膜电池的转换效率将达到 20%, 相当于多晶硅太阳能电池。CIS 作为太阳能电池的半导体材料, 具有价格低廉、性能良好和工艺简单等优点, 将成为今后发展太阳能电池的一个重要方向, 被国际上称为下一代的廉价太阳能电池。唯一的问题是材料的来源, 由于镉和硒都是比较稀有的元素, 因此, 这类电池的发展又必然受到限制。采用 CuInGaSe 多元复合薄膜, 也可生产高效太阳能电池。在多元化合物薄膜太阳能电池中, 由于 GaAs 电池的原料价格昂贵, 且不易制备; 而 CdTe 电池含有危险的重金属元素, 对环境保护不利, 并不是晶体硅太阳能电池最理想的替代。

1977 年, Heeger<sup>[15]</sup>等人发现聚乙炔用  $I_2$ 、 $AsF_5$  掺杂后电导率从  $10^{-6} \text{ cm}^{-1}$  增加到  $10^{-2} \sim 10^3 \text{ cm}^{-1}$ , 增幅达 8~9 个数量级, 传统意义上的绝缘体竟然表现出导体和半导体的许多光电性质。这引起了科学界的极大震动。从共轭导电高分子材料的电致发光被发现以后, 这类材料被用于制造高效的发光二极管。共轭导电聚合物在一定程度上同时具有无机半导体的光电特性和金属的导电性以及聚合物优良的柔韧性和可加工性, 可以在室温下配制成溶液, 通过旋转涂膜、喷涂等方法成膜在玻璃衬底上, 这大大降低了制造成本, 使得低成本太阳电池的研究开发成为可能。以聚合物代替无机材料是太阳能电池制造的方向。其原理是利用不同氧化还原型聚合物的不同氧化还原电势, 在导电材料(电极)表面进行多层复合, 制成类似无机 p-n 结的单向导电装置。其中一个电极的内层由还原电位较低的聚合物修饰, 外层聚合物的还原电位较高, 电子转移方向只能由内层向外层转移; 另一个

电极的修饰正好相反, 并且第一个电极上两种聚合物的还原电位均高于后者的两种聚合物的还原电位。当两个修饰电极放入含有光敏化剂的电解液中时。光敏化剂吸光后产生的电子转移到还原电位较低的电极上, 还原电位较低电极上积累的电子不能向外层聚合物转移, 只能通过外电路从还原电位较高的电极回到电解液, 因此外电路中有光电流产生。由于有机材料柔性好, 成本低, 对大规模利用太阳能, 提供廉价电能具有重要意义。聚合物太阳能电池除具有原料价格低廉、生产工艺简单特点外, 最显著的优势是可以采用涂布、印刷等方式大面积制备, 并可以利用弹性衬底制成柔韧性好的产品, 这使聚合物太阳能电池的应用范围有可能从便携式计算器、手机等小规模器件扩展到大面积的探测器、大面积低功率表面可弯曲的能量收集器件上。虽然目前聚合物太阳能电池转换效率比较低, 存在载流子迁移率比较低、高的体电阻及耐久性差的问题, 但如果在性能上取得进一步的突破, 将其能量转换效率提高到接近无机材料的商品太阳能电池的水平, 就有可能在生产实践中得到广泛的应用。但以有机材料制备的太阳能电池使用寿命和效率都不能和无机材料特别是硅电池相比。有机薄膜太阳能电池使用塑料等质轻柔软的材料为基板, 因此人们对它的实用化期待很高。研究人员表示, 通过进一步研究, 有望开发出转换率达 20%、可投入实际使用的有机薄膜太阳能电池。有机太阳能电池在特定条件下光电转换率已达 10%。使用有机材料的太阳能发电系统前景也比较可观。该太阳能发电系统比其它太阳能发电系统更有利于环保。Schon 等<sup>[16]</sup>报道了通过在有机光电二极管中进行有机材料的分子掺杂可以提高光电转换效率, 这种由掺杂的并五苯构成的薄膜器件的出现对高效太阳能电池的生产是一个巨大的推动, 化合物半导体光电池 2004 年产量已接近 50 MW。

人们在新工艺、新材料、电池薄膜化等方面的探索中, 纳米  $TiO_2$  晶体化学能太阳电池受到国内外科学家的重视, 1991 年瑞士的 Gratzel 教授等人<sup>[17]</sup>制备了  $TiO_2$  纳米多孔膜半导体太阳电池, 转换效率达到 7.1%~7.9%。纳米晶化学太阳电池(简称 NPC 电池)是由一种在禁带半导体材料修饰、组装到另一种大能隙半导体材料上形成的, 窄禁带半导体材料采用过渡金属 Ru 以及 Os 等的有机化合物敏化染料, 大能隙半导体材料为纳米多晶  $TiO_2$  并制成电极, 此外 NPC 电池还选用适当

的氧化-还原电解质。纳米晶  $\text{TiO}_2$  工作原理是：染料分子吸收太阳光能跃迁到激发态，激发态不稳定，电子快速注入到紧邻的  $\text{TiO}_2$  导带，染料中失去的电子则很快从电解质中得到补偿，进入  $\text{TiO}_2$  导带中的电子最终进入导电膜，然后通过外回路产生光电流。纳米晶  $\text{TiO}_2$  太阳能电池的优点在于它廉价的成本和简单的工艺及稳定的性能。其光电效率稳定在 10 % 以上，制作成本仅为硅太阳能电池的  $1/5 \sim 1/10$ 。寿命能达到 20 年以上。Muakoshi 等人以纳米二氧化钛颗粒表面合成导电聚合物聚吡咯作为正负极间电荷输运的传导介质，建立了一种固态光电池，Gratzel 等用一种有机空穴导电材料代替液态电解质，结合吸附染料的纳米二氧化钛薄膜制成固态光电池，其单色光电转换效率达到 33 %，使染料敏化纳米薄膜太阳能电池的研究向实际应用迈出了一大步。

美国国家可再生能源实验室发现：纳米晶体硅每吸收一个高能太阳光光子便能产生 2~3 个电子，额外的电子来自蓝光和紫外光的光子，这两种光线的能量比太阳光谱中其它光线高得多。大多数太阳能电池都把这额外的能量浪费了。小的纳米晶体（量子点）具有量子力学效应，能将这些能量转化为电能。通过产生多个电子，由纳米晶体硅制成的太阳能电池理论上可以把 40 % 以上的能量转化为电能。而目前太阳电池板的转化效率最多为 20 %（理论上限 27.8 %）。借助反射镜、透镜聚集太阳光，效率可达 40 %，而纳米晶体硅电池则可升至 60 %。因此对于光电材料的发展，纳米晶体硅极具应用潜力。

纳米晶  $\text{TiO}_2$ 、纳米晶硅和聚合物修饰电极太阳能电池的研究刚刚起步，技术还不成熟，还处于探索阶段，短时间内不可能替代硅系太阳能电池。

除了在太阳能电池材料方面的研究外，另外对太阳能电池的电极<sup>[18]</sup>，以及为充分利用太阳能而设计的减反射膜等方面也都展开了广泛的研究。

### 3 太阳能电池的发展前景

目前对某一种光电池材料，能利用的光能只是与其能带隙对应的光谱段。所以，对单晶硅，能量转化效率的理论极限为 27.8 %。太阳光中有大量的低能长波光子，目前的太阳能电池无法有效地将其转换成高能短波光子，降低了太阳能电池的效率。德国马普聚合物研究所和索尼材料科学实验室的专家通过大量试验，找到了两种新物质，即乙基

卟啉白金薄膜和二苯蒽，解决了阳光中低能长波光子向高能短波光子的转换。这两种，被称为“光子传递者”的物质具有不同的特性，一种作为吸收长波光子的“接收器分子”，另一种作为发射短波光子的“发射器分子”。首先由“接收器分子”接收太阳光中的低能光子，然后将能量传递给“发射器分子”，由其以高能短波光子形式输出。用它们的组合结构可以得到高效率光电转换。这为太阳能全光谱利用结构的研究提供了很好的开端。

太阳能是人类取之不尽用之不竭的可再生能源。也是清洁能源，不产生任何的环境污染。在太阳能的有效利用中，大太阳能光电利用是近些年来发展最快，最具活力的研究领域。提高转换效率和降低成本是太阳能电池制备中考虑的两个主要因素，对于目前的硅系太阳能电池，要想再进一步提高转换效率是比较困难的。因此，今后研究的重点除了开发新的电池材料外，应集中到如何降低成本上来，现有的高效率电池是在高质量的硅片上制成的，是最费钱的部分。因此，在保证转换效率较高的情况下降低硅片的成本就显得尤为重要，也是今后太阳能电池发展急需解决的问题。

最近 Science 报道了美国科学家利用类似电视天线一样的阵列上的天线获得了太阳光中的红外光子<sup>[19]</sup>，朝着实现把热转变为电流的太阳电池迈出了一大步。自从多结太阳电池结构<sup>[20]</sup>设计制造出来以后，太阳能电池的转换效率大为提高。美国国家再生能源实验室的科学家在 2007 年制造的三结太阳电池的转换效率达到 40.8 %。Delaware 大学的科学家们更是创造了太阳电池转换效率达到 42.8 % 的新的世界纪录，并有信心实现美国国防部高等研究计划局（Darpa）设定的 VHESC（Very-High efficiency solar cells）项目的 50 % 目标<sup>[21]</sup>。

在新的世纪，可持续发展已成为世界第一大主题。太阳能对可持续发展的重要战略意义使得各国竞相发展光伏技术，促使光伏技术在近几年得到快速发展。德国政府联合埃及、阿尔及利亚和约旦的能源部门，在 2006 年完成的对于欧洲各种能源发展前景的规划 TRANS-CSP（concentration solar power）计划，是发展可再生能源方面雄心最大的规划，在太阳能方面的目标是到 2050 年前，要在中东和北非建设多个 CSP 电站，总装机容量 102 GW，占欧洲电力 15 %。我国《可再生能源法》在 2006 年 1 月 1 日正式生效，太阳能、水能，风能，地热等可再生能源作为十一五期间国家能源

的重点发展方向, 将在政策、税收等享有优惠。同时, 《可再生能源法》中明确指出, 到 2020 年, 我国可再生能源的构成比例要占到 10 % 以上, 其中的第 17 条还明确要求房地产开发企业应在建筑物的设计和施工中, 为太阳能的利用提供必备条件。太阳能利用发展迅速, 全世界产量从 1996 年的 100 MW 已发展到 2004 年的 1 132 MW。目前, 全球燃料价格上涨, 而太阳能发电系统的价格却迅速下降。这为利用太阳能进一步提供了有利条件。

### 参考文献:

- [1] Oliver Morton, Carina Dennis. Silicon valley sunrise [J]. Nature, 2006443: 19 - 22.
- [2] Ohl R. Light sensitive device [P]. US: 2402662, 1946 - 06 - 25.
- [3] Chapin D M, Fuller C S, Pearson G L. A new silicon p - n junction photocell for converting solar radiation into electrical power [J]. Appl Phys, 1954, 25: 676 - 677.
- [4] Mandelkorn J, Lamneck J H. Simplified fabrication of back surface electric field silicon cells and novel characteristics of such cells [A]. 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conf [C]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1972. 66 - 71.
- [5] Lindmayer J, Allison J. An improved silicon solar cell - the violet cell [A], 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conf [C]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1972. 83 - 84.
- [6] Blakers A W, Green M A. 20 % efficiency silicon solar cells [J]. Applied Physics Letter, 1986, 48: 215.
- [7] Zhao Jianhua, Wang Aihua, Pietro P, et al. 24 % efficient perl silicon solar cell: Recent improvements in high efficiency silicon cell research [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1996, 41 - 42: 87 - 99.
- [8] Green M A, Blakers A W, Zhao J, et al. Characterization of 23 - percent efficient silicon solar cells [J]. IEEE Trans ED, 1990, 37 (2): 331 - 336.
- [9] 童忠良, 张淑谦, 杨京京. 新能源材料与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 113.
- [10] Zhao Jianhua, Wang Aihua, Martin A Green, et al. 19.8 % efficient "honeycomb" textured multicrystalline and 24.4 % monocrystalline silicon solar cells [J]. Appl Phys Lett, 1998, 73: 1991.
- [11] Hubbard S M, Cress C D, Bailey C G, et al. Effect of strain compensation on quantum dot enhanced GaAs solar cells [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92: 123 512.
- [12] Bhattacharya R N. Solution growth and electrodeposited CuInSe<sub>2</sub> thin films [J]. Electrochem Soc, 1983, 130: 2 040 - 2 042.
- [13] Lincot D, Guillemoles J F, Taunier S, et al. Chalcopyrite thin film solar cells by electrodeposition [J]. Solar Energy, 2004, 77: 725 - 737.
- [14] Müller J, Nowoczin J, Schmitt H. Composition structure and optical properties of sputtered thin films of CuInSe<sub>2</sub> [J]. Thin Solid Films, 2006, 496: 364 - 370.
- [15] Hideki Shirakawa, Edwin J Louis, Alan G MacDiarmid, et al. Synthesis of electrically conducting organic polymers: halogen derivatives of polyacetylene, (CH)<sub>x</sub> [J]. Chem Soc Chem Commun, 1977, 578 - 580.
- [16] Schon J H, Kloc Ch, Batlogg B. Efficient photovoltaic energy conversion in pentacene<sub>2</sub>based hetero junctions [J]. Appl Phys Lett, 2000, 77: 2 473 - 2 475.
- [17] Regan B O, Grtzel M. A low cost, high efficiency solar cell based on dye - sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films [J]. Nature, 1991, 353: 737 - 740.
- [18] Bern àle J C, Berredjem Y, Cattin L, et al. Improvement of organic solar cell performances using a zinc oxide anode coated by an ultrathin metallic layer [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92: 3 304 - 3 306.
- [19] Robert F Service. Solar cells gear up to go somewhere under the rainbow [J]. Science, 2008, 320: 1 585.
- [20] Karam N H, King R R, Cavicchi B T, et al. Development and characterization of high - efficiency Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/ GaAs/ Ge dual - and triple - junctionsolar cells [J]. Electron Devices, IEEE Transactions on, 1999, 46: 2 116 - 2 125.
- [21] Allen Barnett, Douglas Kirkpatrick, Christiana Honsberg, et al. MILESTONES TOWARD 50 % EFFICIENT SOLAR CELL MODULES [A]. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference [C]. Milan: European Environment Agency, 2007.