

# 太阳能电池研究进展

张秀清<sup>1</sup>, 李艳红<sup>1</sup>, 张超<sup>2</sup>

(1. 国家知识产权局专利局审查协作北京中心, 北京 100083)

(2. 北京有色金属研究总院, 北京 100088)



张秀清

**摘要:** 能源短缺和环境污染已成为影响经济社会发展的重要因素, 能否获得无污染的能源成为当今社会关注的焦点之一。太阳能作为一种洁净的可再生能源得到了越来越多的重视。当前, 在核电的安全问题日益突出的情况下, 太阳能电池被认为是解决能源衰竭和环境污染等一系列重大问题的最佳选择。目前, 许多国家正在制订中长期太阳能开发计划, 准备在 21 世纪大规模开发太阳能。太阳能电池将太阳能直接转化为电能, 是有效利用太阳能的最佳途径之一。综述了国内外包括单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、薄膜太阳能电池等在内的太阳能电池的研究进展, 对其制备技术、性能、转化效率以及应用领域进行了总结, 讨论了它们各自的优势和劣势, 并就太阳能电池未来的发展进行了展望。

**关键词:** 太阳能电池; 单晶硅太阳能电池; 多晶硅太阳能电池; 薄膜太阳能电池

**中图分类号:** TM914.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)07-0436-06

## Research Progress on Solar Cell

ZHANG Xiuqing<sup>1</sup>, LI Yanhong<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>2</sup>

(1. Patent Examination Cooperation Center of the Patent Office, SIPO, Beijing, Beijing 100083, China)

(2. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The shortage of traditional energy and environmental pollution become the major problem of restricting economic and social development. Searching for pollution-free resources becomes more and more urgent. As a clean and renewable power source, solar energy gets much more attention. As a kind of green energy, especially in the case of nuclear safety problem becoming prominent, solar energy are thought to be the best choice to solve the energy failure and environmental pollution and so on. At present, many countries are drafting long-term solar energy development plan, and prepare to develop solar energy in large-scale in the 21st century. The solar cell is a device converting solar energy directly into electrical energy, also is an effective way to use solar energy. This paper briefly introduces the current status of solar cells, including monocrystalline silicon solar cells, polycrystalline silicon solar cells, and thin film solar cells, and their respective preparation method, performance, conversion efficiency, application fields are summarized, then their respective advantages and disadvantages are discussed, and the development trend of that is also presented.

**Key words:** solar cells; monocrystalline silicon solar cells; polycrystalline silicon solar cells; thin film solar cells

## 1 前言

随着世界能源需求迅速增长, 日益严重的供需和环境问题已成为制约经济和社会发展的瓶颈, 有必要建立清洁、充足、经济、安全和可持续发展的能源体系。太阳能因其源源不断地照射至地面, 且清洁无任何污染,

成为最具开发潜力的新能源之一。近年来, 太阳能电池技术取得了很大进展, 很可能成为未来主要电力来源之一。截至 2010 年 12 月 31 日, 关于太阳能电池及其组件的专利达到 5 536 件, 中国达到 3 936 件, 占世界专利总数的 71%<sup>[1]</sup>。截至 2012 年底, 全球光伏发电累计装机容量达 100 GW(1 GW = 100 万 kW), 预计到 2015 年全球光伏发电累计装机量将达到 228 GW, 美、日、欧装机总量将超过 50%<sup>[2]</sup>。2012 年全球前 10 大太阳能电池厂商的产量与产能见表 1。据 EPIA 预测, 2020 年全球太阳能电池产量将达到 80 ~ 160 GW, 年均增长速度达 25%。

收稿日期: 2013-05-20

第一作者及通讯作者: 张秀清, 女, 1982 年生, 审查员, Email: zhangxiuqing1982@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.07.08

## 2 太阳能电池的发展现状和发展趋势

太阳能电池根据制备材料的不同,可分为晶体硅太阳能电池、薄膜太阳能电池等<sup>[3]</sup>。目前,全球太阳能电池主要以硅半导体太阳能电池为主,2012年占全球光伏市场的90%。

表1 全球前十大太阳能电池厂商的产量与产能(2012年)

Table 1 The output and capacity of the global top ten cell manufacturer in 2012

| Ranking | Country | Manufacturer | Output /MW | Capacity/MW |
|---------|---------|--------------|------------|-------------|
| 1       | China   | Yingli       | 2 300      | 2 450       |
| 2       | USA     | First Solar  | 1 900      | 2 400       |
| 3       | China   | Suntech      | 1 700      | 2 400       |
| 4       | China   | Trina        | 1 700      | 2 450       |
| 5       | China   | CSI          | 1 600      | 2 400       |
| 6       | China   | JA           | 1 100      | 1 500       |
| 7       | Japan   | Sharp        | 1 060      | 1 400       |
| 8       | USA     | Sunpower     | 925        | 1 000       |
| 9       | China   | Hanwha       | 850        | 1 500       |
| 10      | China   | Jinko        | 840        | 1 500       |

### 2.1 晶体硅太阳能电池

#### 2.1.1 单晶硅太阳能电池

单晶硅太阳能电池是发展最快、最稳定、转化效率最高、一直以来占据太阳能电池市场主导地位的硅基太阳能电池。单晶硅太阳能电池以纯度为99.99%的高纯硅作为生产的原材料,原材料的范围较广,主要有导体硅碎片,半导体单晶硅的头、尾料等,以及半导体用不合格的单晶硅<sup>[4]</sup>。单晶硅太阳能电池多用于光照时间短、光照强度小、劳动力成本高的区域,如航空航天领域等<sup>[5]</sup>。通过采用不同的硅片加工及电池处理技术,国内外各科研机构及电池厂家都制备出了效率较高的单晶硅电池。据报道,某实验室小尺寸硅片转换效率已高达24.7%,大尺寸的单晶硅模片效率最高已达22.7%<sup>[6]</sup>。德国费莱堡太阳能研究所制得的电池转化效率超过23%,BP Solar公司采用UNSW开发的激光刻槽埋栅技术生产出的电池平均效率达到17%<sup>[7]</sup>。虽然单晶硅太阳能电池转换效率最高,但对硅的纯度要求高,且工艺复杂和材料价格等因素致使其成本较高,应用受限。

#### 2.1.2 多晶硅太阳能电池

多晶硅太阳能电池一般采用低等级的半导体多晶硅,或者专门为太阳能电池而生产的多晶硅等材料<sup>[8]</sup>。与单晶硅太阳能电池相比,多晶硅太阳能电池成本较低,而且转换效率与单晶硅太阳能电池比较接近,是太阳能电池主要产品之一<sup>[9]</sup>。随着长晶技术和多晶硅太阳

能电池制备技术的不断改进,近年来多晶硅太阳能电池的转换效率得到了大幅提高<sup>[8]</sup>。据报道,实验室小尺寸硅片,通过采用不同的加工处理工艺,其转换效率高达19.8%、20.3%<sup>[10-11]</sup>。在商业化方面,挪威REC公司与荷兰能源研究中心(ECN)制造出转换效率为17%的多晶硅太阳能板;2012年,夏洋课题组采用PIII法和SiN<sub>x</sub>层钝化工艺在多晶硅上获得了效率为15.99%的器件,然后通过对SiN<sub>x</sub>层钝化工艺的优化,将效率提升至16.25%<sup>[12]</sup>,继而又对电池工艺步骤进行调整,将黑硅制备工序置于硅片的扩散制结工序之后,抑制了黑硅扩散制结的不均匀性而引入的侧向电场,再次将多晶黑硅太阳能电池效率提升至16.3%<sup>[13]</sup>,其后将利用等离子体浸没离子注入技术在商用多晶硅(156 mm × 156 mm)衬底上制备的黑硅材料成功应用于太阳能电池,转换效率达到17.88%。

### 2.2 薄膜太阳能电池

#### 2.2.1 非晶硅薄膜太阳能电池

非晶硅薄膜太阳能电池与晶体硅太阳能电池相比,具有吸光率高、重量轻、工艺简单、低成本和低能耗等优点,但是转换效率偏低,转换效率随时间而衰退。在美国RCA实验室Carlson和Wronski的共同努力下,第1块非晶硅薄膜太阳能电池于1976年问世,从此拉开了薄膜光伏技术研究与发展的序幕。目前,非晶硅薄膜太阳能电池正在进入显著的技术进步和规模化应用阶段<sup>[14]</sup>。西班牙巴塞罗那大学的Villar.F等在温度低于150℃的条件下利用HWCVD方法制备出转换效率为4.6%的非晶硅薄膜光电池<sup>[15]</sup>。日本三菱重工(MHI)制成了世界上面积最大的高效非晶硅薄膜太阳能电池(1.4 m × 1.1 m),其转换效率达到8%<sup>[16]</sup>。

#### 2.2.2 多晶硅薄膜太阳能电池

多晶硅薄膜太阳能电池是近年来太阳能电池研究的热点,它对长波段具有高光敏性,能有效吸收可见光且光照稳定性强,是目前公认的高效率、低能耗的理想材料<sup>[17]</sup>。虽然多晶硅属于间接带隙材料,不是理想的薄膜太阳能电池材料,但是随着陷光技术、钝化技术以及载流子束缚技术的不断发展,人们完全有可能制备出高效廉价的多晶硅薄膜太阳能电池。日本Kaneka公司采用PECVD技术在玻璃衬底上制备出具有p-i-n结构、总厚度约为2 μm的多晶硅薄膜太阳能电池,光电转换效率达到12%。德国Gall.S等<sup>[18]</sup>认为以玻璃为衬底制备出来的多晶硅薄膜光电池具备光电转换效率达到15%的潜力。日本京工陶瓷公司研制出面积为15 cm × 15 cm的光电池,其转换效率达到了17%。Kaneka公司、日本三菱公司、德国费莱堡太阳能系统研究所等对此作了

大量研究,采用不同技术制备出各种结构的薄膜硅电池,其转换效率均已达可喜的程度<sup>[19]</sup>。

### 2.2.3 化合物薄膜太阳能电池

#### 2.2.3.1 铜铟镓硒薄膜太阳能电池

在各种薄膜太阳能电池中,铜铟镓硒薄膜太阳能电池由于材料有近似最佳的光学能隙、吸收率高、抗辐射能力强和稳定性好等特点,被国际上称为最有希望获得大规模应用的太阳能电池之一,受到了广泛的关注。2010年8月,德国太阳能和氢能研究中心(ZSW)研究的CIGS太阳能电池的光电转化率达到20.3%。在产业化组件转换效率方面,2010年12月,CIGS薄膜太阳能电池板制造商MiaSol研发的大面积生产组件(面积为1 m<sup>2</sup>)效率达到15.7%,是商业规模薄膜组件中已证实的最高效率。采用柔性衬底也是CIGS薄膜电池的发展趋势之一<sup>[20]</sup>。有文献报道称以金属箔为衬底制造的CIGS电池最高效率达到17.7%<sup>[21]</sup>。2011年5月,瑞士联邦材料科学与技术实验室EMPA在PI衬底上制造出转化效率为18.7%的柔性CIGS电池。Islam M M等人研究了AZO(AI: ZnO)薄膜窗口层厚度对CIGS太阳能电池光电性能的影响,研究表明:当AZO窗口层厚度为400 nm时,CIGS太阳能电池光电性能达到最优,转换效率可达17.2%<sup>[22]</sup>。

#### 2.2.3.2 碲化镉薄膜太阳能电池

CdTe薄膜太阳能电池具有成本低、转换效率高且性能稳定的优势,是技术上发展较快的一种薄膜太阳能电池。制备CdTe薄膜太阳能电池主要的工艺有丝网印刷烧结法、近空间升华法(CSS)、真空蒸发法、电沉积法、溅射法等。此类电池最早由Kodak公司于1982年制造出来,转换效率超过10%。赵守仁等用inline方式全部近空间升华方法制备的n-CdS/p-CdTe的转换效率约为11%,其中n-CdS层采用磁控溅射方法可取得约10%的转换效率<sup>[23]</sup>。据了解,半导体硅的禁带宽度为1.12 eV,而CdTe的禁带宽度为1.46 eV。在阳光下,太阳能电池效率的最大值出现在禁带宽度为1.4 eV时<sup>[24]</sup>。CdTe可

能是比硅更为优越的光电材料,而且其良好的稳定性也受到研究者的青睐。但是构成CdTe的Te和Cd都属于有毒元素,一旦进行市场化,所引起的安全和环保问题需要引起高度重视<sup>[25]</sup>。

#### 2.2.3.3 砷化镓薄膜太阳能电池

制备GaAs薄膜太阳能电池的方法有晶体生长法、直接拉制法、气相生长法、液相外延法等。1954年,首次发现GaAs材料具有光生伏特效应,1974年,GaAs电池效率的理论值达22%~25%<sup>[26]</sup>。20世纪80年代中后期,美国的ASEC公司改用MOVPE技术制备GaAs/GaAs太阳能电池,并于1987年成功地用Ge单晶代替GaAs作为外延衬底,制备出GaAs/Ge太阳能电池。目前,其最高效率超过20%,生产过程中转化效率已经达到了19%~20%。2009年,荷兰的Bauhuis G J等使GaAs单结电池转换效率达到26.1%<sup>[27]</sup>。2008年,美国Emcore公司通过大尺寸薄膜剥离技术,从0.1 mGaAs衬底上将GaAs太阳能电池完整地剥离下来,剥离后制作的电池具有21.1%的光电转换效率,而且剥离后的GaAs衬底经过处理可以再次使用<sup>[28]</sup>。2011年,美国国家可再生能源实验室(NREL)研制的小面积(0.99 cm<sup>2</sup>)GaAs薄膜太阳能电池实现了28.3%的光电转换效率,其制备的面积为856.8 cm<sup>2</sup>的GaAs薄膜太阳能电池组件效率也达到了23.5%<sup>[29-30]</sup>。

#### 2.2.3.4 铜锌锡硫薄膜太阳能电池

CIGS薄膜太阳能电池虽然具有优异的性能,但是存在In和Ga稀缺的问题。CZTS(Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>)薄膜是替代CIGS光伏电池吸收层的最佳选择之一,原材料Cu, Zn, Sn和S在地壳中储量丰富。CZTS是一种直接带隙半导体材料,光学吸收系数超过10<sup>4</sup> cm<sup>-1</sup>,光学带隙在1.45 eV左右,非常接近光伏电池的理想带隙1.4 eV,理论上可达到单结电池的最高转换效率。CZTS薄膜太阳能电池目前尚处在实验室研究到中试研究阶段,目标是使用相对便宜、丰富的原材料获得最大的转换效率,其发展历程见下表2<sup>[30-35]</sup>。

表2 铜锌锡硫薄膜太阳能电池发展历程

Table 2 The development history of CZTS thin film solar cell

| Years | Area of solar cell/cm <sup>2</sup> | Open circuit voltage/mV | Short circuit current/mA · cm <sup>-2</sup> | Filling factor | Conversion efficiency/% | Research institutions |
|-------|------------------------------------|-------------------------|---|----------------|-------------------------|-----------------------|
| 1996  | 0.15                               | 400                     | 6.0   | 0.28           | 0.66                    | Jap.                  |
| 1999  | 0.15                               | 522                     | 14.1  | 0.36           | 2.63                    | Jap.                  |
| 2003  | 0.15                               | 582                     | 15.5  | 0.60           | 5.45                    | Jap.                  |
| 2007  | 0.15                               | 662                     | 15.7  | 0.55           | 5.74                    | Jap.                  |
| 2008  | 0.15                               | 610                     | 17.9  | 0.62           | 6.70                    | Jap.                  |
| 2010  | 0.15                               | 516                     | 28.6  | 0.66           | 9.60                    | IBM                   |
| 2011  | 0.15                               | 517                     | 30.8  | 0.64           | 10.10                   | IBM                   |

CZTS 薄膜太阳能电池下一步的挑战是实现 12% 的单体电池效率和 10% 的组件效率。目前美国 IBM 公司与日本的 Solar Frontier 公司正合作研发 CZTS 电池组件, Advancis 公司也已开始定做 CZTS 中试线。

#### 2.2.4 聚合物薄膜太阳能电池

聚合物薄膜太阳能电池的基本工作原理是基于半导体异质结(p-n 结)或金属/半导体界面附近的光生伏特效应。目前,制作聚合物半导体层主要采用真空镀膜溅射和分子束外延生长等真空技术,以及溶液处理成膜技术,主要有电化学沉积技术、铸膜技术、分子组装技术、印刷技术等,以及电化学法、扩散法和气相法等单晶技术<sup>[7]</sup>。Yu 等人把电子给体(如 MEH-PPV, 即聚[2-甲氧基-5-(2-乙基-己氧基)-对苯乙炔])和电子受体(如 C60 或 PCBM)共溶于一种有机溶剂中制成体相异质结,使能量转换效率有了突破性的提高,在强度为 10 mW/cm<sup>2</sup>, 波长为 430 nm 的单色光照射下,能量转换效率达到了 5.5%<sup>[36]</sup>。2010 年 12 月,经德国弗莱堡太阳能系统研究所和美国可再生能源实验室分别证实,德国 Heliotech 公司和美国 Konarka 公司各自开发出了转换效率达 8.3% 的有机薄膜太阳能电池<sup>[37]</sup>。2011 年 4 月,《Science》报道日本三菱化学通过改良有机半导体材料及采用涂布技术制备了光电转换效率达 9.2% 的有机薄膜太阳能电池<sup>[38]</sup>。2011 年,日本产业技术综合研究所(AIST)研制的有机太阳能电池转换效率达到了 10%<sup>[39]</sup>,面积为 294.5 cm<sup>2</sup> 的组件效率达到了 4.2%。聚合物薄膜太阳能电池虽然具有许多无机半导体太阳能电池所不可比拟的优点,但毕竟起步较晚,效率也较低,要想获得高效率、低成本的聚合物薄膜太阳能电池任重道远。

#### 2.2.5 染料敏化太阳能电池

1991 年,瑞士 Gratzel 研究组利用钌多吡啶配合物染料作为光敏剂,敏化纳米晶二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)薄膜电极作为电池的光阳极而制备成染料敏化太阳能电池(Dye-Sensitized Solar Cell, DSSC),转换效率达 7.9%,这一发明引起了世界轰动<sup>[40]</sup>。图 1 是染料敏化太阳能电池工作原理示意图。1993 年,Gratzel 教授发表论文指出 N<sub>3</sub> 染料将 DSSC 的效率提高到 10%<sup>[41]</sup>。这种电池的成本很低,根据试算,仅是硅电池的 1/5~1/10。除此之外,该电池还具有原材料丰富、无毒环保、制作工艺简便等特点。日本京都大学的足立等人利用界面活性剂制造的 DSSC 太阳能电池的光电转换效率高 9.33% (电池的面积: 5 mm<sup>2</sup>; 染料: N719), 达到高效率的原因被认为是电极内部高结晶性和吸附了高浓度染料。

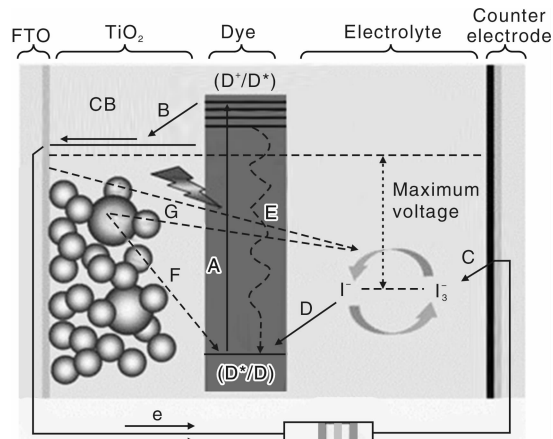


图 1 染料敏化太阳能电池工作原理示意图

Fig. 1 The schematic diagram of dye-sensitized solar cell

人们还尝试用 TiO<sub>2</sub> 以外的金属氧化物混合电极代替 TiO<sub>2</sub> 电极来提高太阳能电池性能。Tenna-kone 等人用 SnO<sub>2</sub> 与大宽带隙的 ZnO 或 MgO, AlO 的复合材料做电极, 获得了较高的光电转换效率。之后, Gratzel 和其他研究者也证实了这一结果。Konno 等人用 SnO 和 ZnO 的混合材料制作的太阳能电池, 效率达 8%, 可与 TiO<sub>2</sub> 制作的匹配<sup>[42]</sup>。2010 年, 王鹏研究团队发表了纯有机染料敏化太阳能电池效率达到 10.3% 的文章。2011 年, Gratzel 研究组通过将卟啉染料与噻吩基染料共敏化, 获得了迄今为止 DSSC 领域中的最高转换效率 12.3%<sup>[43]</sup>。

### 3 结 语

目前, 太阳能电池产业发展的瓶颈主要有两方面: 第 1 个是价格问题, 首先要研制稳定的、高效率且低成本的半导体材料, 并用低成本的工艺路线量化生产太阳能电池; 第 2 个问题就是效率问题, 减少材料消耗与能耗、降低成本、提高转换效率和稳定性将是太阳能电池研究及制备工艺的研究重点。基于人类对新能源材料的需求和科技的不断进步, 太阳能电池在替代常规能源方面将显示出愈来愈强大的优势。

#### 参考文献 References

- [1] Ma Yanli (马艳丽), Zhang Cheng (张 成). 国内太阳能电池专利分析[J]. *Library and Information Service* (图书情报工作), 2011, Supplement (2): 287-289.
- [2] Wang Bohua (王勃华). *China is Now the Biggest Producer of Polysilicon, Waters Cells and Component* (我国多晶硅、硅片、电池及组件产量位居世界首位) [EB/OL]. (2013-05-08) [2013-05-10]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20130508/433062.html>.
- [3] Zhang Liang (张 亮). 太阳能电池的研发进展[J]. *Pioneer*

- ring with Science and Technology Monthly ( 科技创业月刊 ), 2011 ( 5 ) : 157 - 158.
- [ 4 ] Guo Kailong ( 郭凯龙 ). 单晶硅太阳能电池制备与环境保护 [ J ]. *Development Guide to Building Materials* ( 建材发展导向 ), 2013 ( 6 ) : 362.
- [ 5 ] Bruton T M. General Trends about Photovoltaics Based on Crystalline Silicon [ J ]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2002, 72 ( 1 - 4 ) : 3 - 10.
- [ 6 ] Li Huaihui ( 李怀辉 ), Wang Xiaoping ( 王小平 ), Wang Lijun ( 王丽军 ), *et al.* 硅半导体太阳能电池进展 [ J ]. *Materials Review* ( 材料导报 ), 2011, 25 ( 19 ) : 49 - 53.
- [ 7 ] Cheng Zhixiu ( 成志秀 ), Wang Xiaoli ( 王晓丽 ). 太阳能光伏电池综述 [ J ]. *Information Recording Materials* ( 信息记录材料 ), 2007, 8 ( 2 ) : 41 - 47.
- [ 8 ] Chaure N B, Young J, Samantilleke A P, *et al.* Electro-Deposition of p-i-n CuInSe Multilayers for Photovoltaic Applications [ J ]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 81 : 125 - 133.
- [ 9 ] Deb S K. Recent Development in High Efficiency PV Cells [ J ]. *Renewable Energy*, 1998, 15 ( 4 ) : 467 - 472.
- [ 10 ] Guo Zhiqiu ( 郭志球 ), Shen Hui ( 沈 辉 ), Liu Zhengyi ( 刘正义 ), *et al.* 太阳能电池研究进展 [ J ]. *Materials Review* ( 材料导报 ), 2006, 20 ( 3 ) : 41 - 43.
- [ 11 ] Ma Wenhui ( 马文会 ), Cang Yongnian ( 藏永年 ), Yang Bin ( 杨 斌 ). 太阳能级硅制备新技术研究进展 [ J ]. *Advanced Materials Industry* ( 新材料产业 ), 2006 ( 10 ) : 12 - 16.
- [ 12 ] Zhong Sihua, Liu Bangwu, Xia Yang, *et al.* Influence of the Texturing Structure on the Properties of Black Silicon Solar Cell [ J ]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013 ( 108 ) : 200 - 204.
- [ 13 ] Shen Zenan, Liu Bangwu, Xia Yang, *et al.* Black Silicon on Emitter Diminishes the Lateral Electric Field and Enhances Blue Response for Solar Cell by Optimizing Depletion Region Uniformity [ J ]. *Scripta Materialia*, 2013 ( 68 ) : 3 - 4.
- [ 14 ] Zou Hongye ( 邹红叶 ). 硅薄膜太阳能电池的原理及其应用 [ J ]. *Physics Bulletin* ( 物理通报 ), 2009 ( 5 ) : 56 - 57.
- [ 15 ] Villar F, Antony A, Escarre J, *et al.* Amorphous Silicon Thin Film Solar Cells Deposited Entirely by Hot-Wire Chemical Vapor Deposition at Low Temperature ( < 150 °C ) [ J ]. *Thin Solid Films*, 2009, 517 ( 12 ) : 3 575 - 3 577.
- [ 16 ] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, *et al.* Research Short Communication: Solar Cell Efficiency Tables ( version 31 ) [ J ]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2008, 16 ( 1 ) : 61 - 67.
- [ 17 ] Qin Guihong ( 秦桂红 ), Yan Biao ( 严 彪 ), Tang Renjian ( 唐人剑 ). 多晶硅薄膜太阳能电池的研制及发展趋势 [ J ]. *Shanghai Nonferrous Metals* ( 上海有色金属 ), 2004, 25 ( 1 ) : 38 - 42.
- [ 18 ] Wei C, Lianghuan F. Produce Technology of CdTe Thin Film Modules and Design of Manufacture Line [ J ]. *Photovoltaic Energy Conversion*, 2006 ( 1 ) : 585 - 587.
- [ 19 ] Liu Maoping ( 刘毛萍 ), Chen Feng ( 陈 枫 ), Guo Aibo ( 郭爱波 ), *et al.* 薄膜太阳能电池的发展动态 [ J ]. *Energy Conservation and Environmental Protection* ( 节能与环保 ), 2006 ( 11 ) : 21 - 23.
- [ 20 ] Yang Yang ( 杨 洋 ), Zhang Qian ( 张 婧 ). 铜铟镓硒薄膜太阳能电池产业发展综述 [ J ]. *Science and Technology Information* ( 科技信息 ), 2013 ( 19 ) : 53 - 55.
- [ 21 ] Shogo Ishizuka, Akirasa Yamada, Koji Matsubara, *et al.* Development of High-Efficiency Flexible Cu ( In, Ga ) Se<sub>2</sub> Solar Cells: A Study of Alkali Doping Effects on CIS, CIGS, and CGS Using Alkali-Silicate Glass Thin Layers [ J ]. *Current Applied Physics*, 2010, 10 ( 2 ) : S154 - S156.
- [ 22 ] Islam M M, Ishizuka S, Yamada A, *et al.* Thickness Study of Al: ZnO Film for Application as a Window Layer in Cu ( In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub> ) Se<sub>2</sub> Thin Film Solar Cell [ J ]. *Applied Surface Science*, 2011, 257 ( 9 ) : 4 026 - 4 030.
- [ 23 ] Zhao Shouren ( 赵守仁 ), Huang Zhipeng ( 黄志鹏 ), Sun Lei ( 孙 雷 ), *et al.* 碲化镉薄膜太阳能电池电学特性参数分析 [ J ]. *Chinese Journal of Physics* ( 物理学报 ), 2013 ( 18 ) : 25 - 28.
- [ 24 ] Shi Yuchuan ( 施钰川 ). *Basic Principle and Application Technology of Solar Energy* ( 太阳能原理与技术 ) [ M ]. Xi' an: Xi' an Jiaotong University Press, 2009.
- [ 25 ] Wang Haoying ( 王昊鹰 ). 近几年太阳能电池的研究进展和发展趋势 [ J ]. *Science and Technology Innovation Herald* ( 科技创新导报 ), 2012 ( 31 ) : 27 - 28.
- [ 26 ] Chen Jie ( 陈 颀 ), Chen Tingjin ( 陈庭金 ). 砷化镓太阳能电池的研究与展望 [ J ]. *Journal of Yunnan Normal University* ( 云南师范大学学报 ), 1989 ( 3 ) : 52 - 57.
- [ 27 ] Bauhuis G J, Mulder P, Haverkamp E J, *et al.* 26.1% Thin-Film GaAs Solar Cell Using Epitaxial Lift-Off [ J ]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93 ( 9 ) : 1 488 - 1 491.
- [ 28 ] Tatavarti R, Hillier G, Dzankovic A, *et al.* Light Weight, Low Cost GaAs Solar Cells on 4" Epitaxial Lift-off ( ELO ) Wafers [ C ] // California: 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008 : 1 - 4.
- [ 29 ] Green M A, Emery K, Hisikawa Y, *et al.* Solar Cell Efficiency Tables [ J ]. *Prog Photovolt: Res Appl*, 2012, 20 : 12 - 20.
- [ 30 ] Li Wei ( 李 微 ), Huang Caiyong ( 黄才勇 ), Liu Xingjiang ( 刘兴江 ). 薄膜太阳能电池技术发展趋势浅析 [ J ]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology* ( 中国电子科学研究院学报 ), 2012, 7 ( 4 ) : 344 - 350.
- [ 31 ] Wang K, Gunawan O, Todorov T, *et al.* Thermally Evaporated Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Solar Cells [ J ]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97 ( 14 ) : 143 508.
- [ 32 ] Jimbo K, Kimura R, Kamimura T, *et al.* Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>-Type Thin Film Solar Cells Using Abundant Materials [ J ]. *Thin Sol-*

- id Films*, 2007, 515(15): 5 997–5 999.
- [33] Guo Q, Ford G M, Yang W C, *et al.* Fabrication of 7.2% Efficient CZTSSe Solar Cells Using CZTS Nano-Crystals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(49): 17 384–17 386.
- [34] Todorov T K, Reuter K B, Mitzi D B. High-Efficiency Solar Cell with Earth-Abundant Liquid-Processed Absorber[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(20): E156–E159.
- [35] Barkhouse D A R, Gunawan O, Gokmen T, *et al.* Device Characteristics of a 10.1% Hydrazine-Processed Cu<sub>2</sub>ZnSn(Se, S)<sub>4</sub> Solar Cell [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, 2012, 20(1): 6–11.
- [36] He Jie(何杰), Su Zhongji(苏忠集), Xiang Li(向丽), *et al.* 聚合物太阳能电池研究进展[J]. *Polymer Bulletin* (高分子通报), 2007(4): 53–65.
- [37] Sara V B. *Organic Solar Cells Push Efficiency Thresholds to 8.3% [EB/OL]*. [http://www. plusplasticelectronics. com/energyorganic-solar-cells-push-efficiency-thresholds-to-8-3-percent-20819. aspx](http://www.plusplasticelectronics.com/energyorganic-solar-cells-push-efficiency-thresholds-to-8-3-percent-20819.aspx)
- [38] Service R F. Outlook Brightens for Plastic Solar Cells[J]. *Science*, 2011, 332(6 027): 293.
- [39] Miyake K, Uetant Y, Selek T, *et al.* Development of Next Generation Organic Solar Cell[J]. *Sumitomo Kagaku*, 2010.
- [40] O' Regan B, Gratzel M. A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO<sub>2</sub> Films[J]. *Nature*, 1991, 353: 737–740.
- [41] Nazeeruddin M K, Kay A, Rodicio R, *et al.* Conversion of Light to Electricity by cis-X<sub>2</sub>Bis(2, 2'-Bipyridyl-4, 4'-Dicarboxylate) Ruthenium(II) Charge-Transfer Sensitizers on Nanocrystalline Electrodes[J]. *J Am Chem Soc*, 1993, 115(14): 6 382–6 390.
- [42] Tannakone K, Bandara J, Bandaranayake P K M, *et al.* Enhanced Efficiency of a Dye-Sensitized Solar Cell Made from MgO Coated Nanocrystalline SnO<sub>2</sub> [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2001, 40: 732.
- [43] Yella A, Lee H, Tsao H N, *et al.* Porphyrin-Sensitized Solar Cells with Cobalt-Based Redox Electrolyte Exceed 12% Efficiency[J]. *Science*, 2011, 334(6 056): 629–634.

## 我国首例突破 11% 的铁电-半导体耦合光伏器件

日前,中国科学院电工研究所化合物薄膜太阳能电池研究组在普通钠钙玻璃上制备的铁电-半导体耦合光伏器件,经中国科学院太阳能光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心认证,其转化效率达到 11.3%。

铁电-半导体耦合光伏器件也称为纳米偶极子太阳能电池,属于第三代太阳能电池。与传统 PN 结型不同的是,这种光伏器件是由具有铁电特性的纳米颗粒矩阵的极化电场来产生内建电场;而填充在纳米偶极子颗粒之间的半导体介质则充当吸光材料的角色。

在光照条件下,半导体吸光材料吸收可见光产生光生载流子,这些光生载流子在极化电场的作用下分离,并向电池的两极运动,对外电路输出功率,从而完成太阳能光伏器件的电流和电压两个必要输出。这种新型器件与传统 PN 结光伏器件的一个重要区别是,薄膜中的这些纳米颗粒在外电场的极化作用下会形成一个极化场,因而可以在电池制备完成后,通过外电场的偏转影响电池的输出电压,进而提高转换效率。

该组已经于 2013 年发现了这种特殊的现象,并发表在《Prog. Photovolt: Res. Appl.》上(A CdS Nano-dipole Solar Cell, Progress in Photovoltaics: Research and Applications. DOI: 10.1002/pip.2432)。据介绍,由电工所刘向鑫研究员带领的团队,采用 CdS 纳米颗粒作为压电材料, CdTe 作为吸光材料,不仅通过多种微观和宏观技术证明了纳米偶极子太阳能电池的工作机理,而且成功将这种新型光伏器件的转换效率提高到了 11.3%。相比较传统的 PN 结型太阳能电池,纳米偶极子薄膜电池的制备工艺更简单,只需沉积一层薄膜。

上述工作获得了中国科学院、国家自然科学基金的支持。

From [http://www.cas.ac.cn/ky/kyjz/201407/t20140715\\_4157311.shtml](http://www.cas.ac.cn/ky/kyjz/201407/t20140715_4157311.shtml)