薄膜太阳能电池光电转换材料研究进展

郑春满　　郭宇杰　　谢　凯　　韦永滔

（国防科技大学航天与材料工程学院，长沙　410073）

文　摘　在对太阳能电池基本原理进行介绍的基础上，综述了近年来光电转换材料的发展情况，重点对各种材料的优缺点、制备方法以及未来的发展趋势进行探讨。

关键词　太阳能电池，薄膜，光电转换材料，转换效率

Recent Progress in Developing Photoelectric Conversation Materials for Thin-Film Solar Cells

Zheng Chunman　　Guo Yujie　　Xie Kai　　Wei Yongtao

(Department of Material Engineering and Applied Chemistry, School of Aerospace & Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha　410073)

Abstract　The photoelectric conversation materials are the key part, which decides the conversation efficiency of the thin-film solar cells. The photoelectric conversation materials that can be used in the thin film solar cells mainly include inorganic semiconductor materials and organic materials. In the present paper, the basic principle of thin film solar cells is introduced and the development of the two materials is reviewed. The advantage and disadvantage, the preparation methods and the future trends of every material are discussed.

Key words　Solar cells, Thin-film, Photoelectric conversation materials, Conversation efficiency

1　引言

太阳能电池作为解决人类所面临的能源与环境问题的最佳选择，具有来源广泛、使用方便、无污染等优点，在航空、航天、通讯及微功耗电子产品等领域具有广阔的应用前景[1]，因而逐渐成为研究的重点方向和主流[2-3]。

薄膜太阳能电池具有轻质、高效、高比功率、耗材少等一系列优点，可同时作为能源部件和结构部件使用[4]。在薄膜太阳能电池制备中，光电转换材料被沉积在不同的基底上，如玻璃、不锈钢箔或聚合物等。因此，太阳能电池要求光电转换材料具有强烈的光吸收，低温结晶、低温器件制作和稳定的材料特性等，是关系电池转换效率的重要组成部分，因此一直是太阳能电池开发研究的重点[5]。

可用于薄膜太阳能电池的光电转换材料主要包括无机半导体材料和有机材料两类，本文在对太阳能电池基本原理进行介绍的基础上，综述了近年来光电转换材料的发展情况，重点对各种材料的优缺点、制备方法以及未来的发展趋势进行探讨。

2　太阳能电池的基本原理

太阳能电池的基本原理[6]：当电池的表面受到光照时，由于减反射膜的作用，入射光线小部分被反射，大部分进入光吸收层。其中，能量大于禁带宽度的光子被吸收后，激发出光生载流子。在电池内部产生的光生电子-空穴对扩散到 PN 结并受结电场影响而分开。太阳能电池的 PN 结处存在一个由 N 区指向 P 区的内电场。在 N 区产生的光生空穴会向 PN 结扩散，进入 PN 结后，即被内电场推向 P 区；在 P 区产生的光生电子先向 PN 结扩散，进入 PN 结后，即被内电场推向 N 区；而在 PN 结区附近产生的电子—空穴对，则立即被内电场分别推向 N 区和 P 区。因此，在 N 区积累了大量的光生电子，而 P 区积累了大量空穴，在 PN 结两侧出现了光生电动势。若在两边的集电极间接上负载，则会产生光生电流。如图 1 所

收稿日期：2009-12-07

基金项目：国防科技大学校预研项目（JC08-01-06）

作者简介：郑春满，1976 年出生，博士，副教授．主要从事能源材料研究。E-mail：zhengchunman@sohu.com

示。

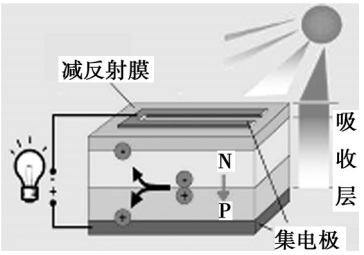

图 1　太阳能电池的基本工作原理

Fig. 1　Basic principium of solar cells

3　无机半导体材料

3.1　硅材料

3.1.1　非晶硅(a-Si)

非晶硅用作薄膜太阳能电池起始于 20 世纪 70 年代。1976 年,卡尔松等[7]利用非晶硅制备了薄膜太阳能电池,其小面积样品转换效率为 2.4%。随后,非晶硅薄膜太阳能电池得到了迅速发展。

非晶硅薄膜太阳能电池通常为 P-I-N 偶及型式,如图 2 所示,P 层和 N 层主要作为建立内部电场,I 层则由非晶硅构成。非晶硅用作薄膜太阳能电池光电转换材料具有以下优点:(1)高光吸收能力,其吸光频率范围为 1.1-1.7 eV,因此,I 层厚度通常小于 0.5 μm,相对其他材料(如 GaAs)小得多;(2)相对于单晶硅,非晶硅薄膜太阳能电池制造工艺简单,能耗少;(3)可实现大面积、连续化生产;(4)可做成叠层结构,提高效率。非晶硅薄膜材料的制备早期主要采用硅烷气体的辉光放电分解、溅射、光-化学气相沉积等方法。目前,为了提高沉积速度,采用超高频法、等离子增强 CVD 法、微波法和微波电子回旋共振 CVD 法等。

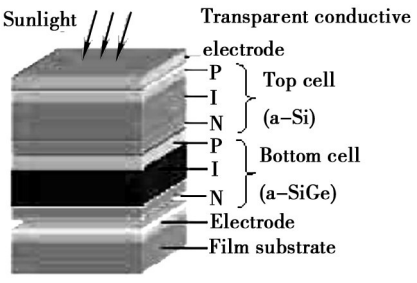

图 2　非晶硅薄膜太阳能电池的结构

Fig. 2　Structure of amorphous solar cell with film substrate

United Solar Ovonic[8]完成面积 929 cm^2 的 a-Si 薄膜太阳能电池,AM0 转换效率达 9.8%,采用减反射层可使小面积效率达 12%;Iowa Thin Film Technologies[8]生产的 a-Si 集成太阳能电池面积达 0.93 m^2,AM0 效率达到 5%;美国国家再生能源实验室[9]三结叠层(a-Si:H/a-SiGe:H/a-SiGe:H)光谱分区吸收薄膜太阳能电池 AM0 转换效率达到 12%;Toledo 大学[9]在 7.5 μm 不锈钢箔上制备柔性可卷单结 a-Si 电池,转换效率为 10.4%,比功率达 1 080 W/kg;日本的 Ichikawa 等[10]使用柔性树脂薄膜衬底,利用卷带滚动化学气相沉积法在 50 cm×1 km 的树脂基底上制备 a-Si/a-SiGe 太阳能电池,效率达到 10.1%。中科院半导体所[11]研制的玻璃衬底非晶硅单结太阳能电池的效率达到 11.2%;南开大学[7]研制的双结 a-Si 电池组件(20 cm × 20 cm)效率达到 9.2%。

虽然非晶硅薄膜太阳能电池得到了广泛的研究和应用。但是,仍然存在着很多问题:(1)由于光致衰退效应(S-W 效应)存在,使得非晶硅薄膜太阳能电池在太阳光下长时间照射会产生效率的衰减,从而导致整个电池效率的降低;(2)制备过程中,非晶硅的沉积速率低,影响非晶硅薄膜太阳能电池的大规模生产;(3)后续加工困难,如 Ag 电极的处理问题;(4)在薄膜沉积过程中存在大量的杂质,如 O_2、N_2 和 C 等,影响薄膜的质量和电池的稳定性。针对以上问题,未来非晶硅薄膜太阳能电池的研究主要集中:(1)采用优质的底电池 I 层材料;(2)向叠层结构电池发展,使用不同禁带宽度的 I 层来做成多结的 PIN 结构,可以更有效地吸收太阳能光谱以提高电池效率;(3)在保证效率的条件下,开发生产叠层型非晶硅太阳能电池模块技术。

3.1.2　多晶硅(poly-Si)

为解决非晶硅薄膜太阳能电池的不足,人们采用多晶硅薄膜代替 a-SiGe 作为底部电池的材料提高硅基薄膜太阳能电池的性能[12]。图 3 是具有多层结构的多晶硅薄膜太阳能电池的结构示意图。

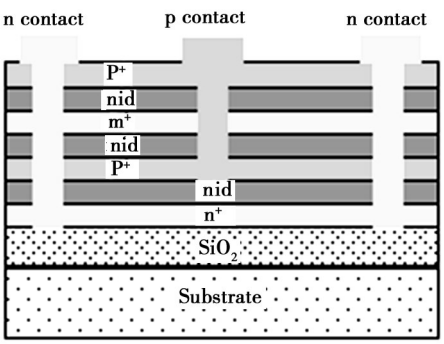

图 3　多晶硅薄膜太阳能电池结构示意图

Fig. 3　Structure of poly-Si thin-film solar cells

多晶硅用作薄膜太阳能电池光电转换材料具有以下优点:(1)在长波段具有高光敏性,对可见光能有效吸收,又具有与晶体硅一样的光照稳定性,是公认的高效、低耗的光伏器件材料;(2)无光致衰退效应,效率比非晶硅要高,而成本远低于单晶硅电池。

多晶硅薄膜的制备方法很多,按成膜过程可分为两类[12]:一类是先制备非晶态材料,再固相晶化为多晶硅,即固相晶化法,它是利用硅烷等原料气体,在PECVD设备中沉积a-Si薄膜,再通过热处理将a-Si薄膜转化为多晶硅薄膜;另一类是直接在衬底上沉积多晶硅薄膜,包括等离子体增强法、热丝法和低气压法等。

美国Astropower公司[13]采用液相外延法制备的多晶硅薄膜太阳能电池的效率达到12.2%;Kaneka公司[14]设计的多晶硅薄膜电池的效率已达10.7%;Morikawa等[14]制备出效率高达16%的多晶硅薄膜太阳能电池;日本三菱公司[14]制备的多晶硅薄膜太阳能电池效率达到16.4%;德国费莱堡太阳能研究[14]所采用区域结晶技术在硅衬底上制备的多晶硅薄膜电池转换效率为19%。河北保定英利集团生产的太阳能电池多晶硅电池片效率已达15%;北京太阳能研究所[13]采用快速热CVD技术,在模拟陶瓷衬底的电池效率达到10.1%。

多晶硅薄膜太阳能电池在提高电池效率、节约能源和大幅度降低成本方面都具有极其诱人的前景。目前,国内由于对多晶硅薄膜材料的研究还不够深入,膜生长技术还在探索,薄膜多晶方式在原理上的研究还在探讨阶段,致使多晶硅薄膜太阳能电池还处于实验室阶段。

3.2 多元化合物材料

3.2.1 碲化镉(CdTe)

CdTe作为光电转换材料用于太阳能电池始于20世纪70年代,在单晶CdTe上蒸发CdS薄膜所制备的电池转换效率达到10%。其后,Yamayushi等[12]在CdTe单晶上外延沉积CdS,得到效率12%的太阳能电池。

CdTe属于II-VI族化合物,具有以下特点:(1)CdTe带隙为1.5 eV,与太阳光谱很匹配,属于直接跃迁型,对可见光的吸收系数大于10^5/cm,厚度1 μm的薄膜足以吸收大于CdTe禁带能量的辐射能量的99%;(2)在500℃时为稳定的固相,高温下生成的CdTe略富Te,Cd空位使其成为本征P型,作为吸收层,光生载流子正好是迁移率较高的电子;(3)CdTe或Cd和Te均可作为制备CdTe薄膜的原料,高纯度CdTe薄膜比较容易制备;(4)CdTe键离子性强,导热性、化学稳定性好,性能不易退化。CdTe薄膜太阳能电池的结构如图4所示。

CdTe多晶薄膜的制备方法有多种。其中,电沉积、喷涂热分解、溅射等三种方法比较成功。美国First Solar公司[15]2004年制备的6 MW CdTe太阳电池,效率达到9%,2005年产量20 MW,该公司生产5.08 cm × 10.16 cm的太阳电池组件几秒钟就可沉积好。北京太阳能研究所采用电沉积技术研究和制备CdTe薄膜电池,电池效率达到8%。四川大学[16]采用近空间升华技术研制的CdTe薄膜电池效率已经突破13.38%,面积为0.5 cm^2。表1列出了典型CdTe薄膜太阳能电池的性能。

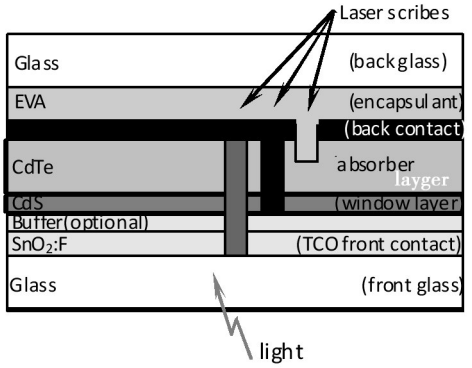

图4 CdTe薄膜太阳能电池的结构

Fig.4 Structure of CdTe thin-film solar cells

表1 CdTe薄膜太阳能电池的性能

Tab.1 Properties of CdTe thin-film solar cells

Manufacturer	Area/cm^2	Power/W	Conversion efficiency/%
Panasonic Battery	1.0	-	16
Florida University	1.05	-	15.8
BP Solar Energy	9000	95	10.6
Solar Cells (USA)	7200	61.3	9.1

CdTe虽然是高效廉价的太阳能光电转换材料,但由于镉会对环境造成严重污染,组件和衬底材料成本太高,占总成本的53%,远高于半导体材料的5.5%,而且碲的天然储量有限。因此,这种薄膜太阳电池难以大批量生产,目前主要用于空间等特殊环境。未来,CdTe薄膜太阳能电池的发展必须研究相应的Cd废料处理与回收技术。

3.2.2 铜铟镓硒(CIGS)

自1974年Bell实验室开发出单晶$CuInSe_2$以来,$CuInSe_2$材料引起了光伏界的关注。$CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$(CIGS)是一种I-III-VI族三元化合物半导体材料,

具有黄铜矿相结构，是 $CuInSe_2$ 和 $CuGaSe_2$ 的混晶半导体。图 5 是 CIGS 薄膜太阳能电池的结构示意图。

CIGS 作为光电转换材料制备薄膜太阳能电池具有显著优点[17-18]：(1)通过变化 Ga 的含量，可使半导体的禁带宽度在 1.04-1.65 eV 变化，适合于调整和优化禁带宽度；(2)CIGS 的光吸收系数达到 10^5/cm，是一种直接带隙的半导体材料，最适合薄膜化；(3)CIGS 可在玻璃基板上形成缺陷少、晶粒大的高品质结晶；(4)转换效率高，薄膜太阳能电池转换效率的世界纪录始终由 CIGS 保持；(5)电池的寿命长。CIGS 没有光致衰退效应，且在外太空具有良好的抗幅射损伤能力和极高的稳定性。

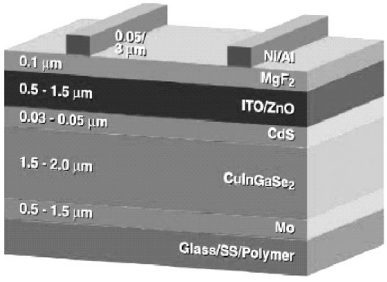

图 5　CIGS 薄膜太阳能电池的结构

Fig. 5　Structure of CIGS thin-film solar cells

目前，CIGS 材料的制备方法使用最多的是真空蒸发法、磁控溅射法和电化学沉积法。真空共蒸发法在实验室制备的很小面积 CIGS 薄膜的效率较高，但制备过程中元素的化学配比很难靠精确控制，制备电池良品率不高，原料利用率低，不利于降低成本。磁控溅射法可以可靠调节各元素配比，制备的薄膜均匀性好，具有更高转化效率，重复性好；但该方法需要高真空系统，原料利用率不高，大面积制备均匀性较差。电化学沉积法可以有效地控制薄膜的厚度、化学组成、结构以及孔隙率，具有设备投资少、原材料利用率高、工艺简单、易于操作等优点，但通过该方法制备具有复杂组成的薄膜材料较为困难。为实现 CIGS 薄膜太阳能电池的工业化生产，ISET 公司[19-20]采用非真空工艺的先驱体墨水转化法制备出成分均匀、性能良好的 CIGS 薄膜；随后，美国的 Nano Solar 公司采用该方法实现了 CIGS 薄膜太阳能电池的大面积制备。

美国 Maine 州大学[21]1976 年首次开发出转换效率 6.6% 的 CIS 太阳能电池；1994 年，瑞典皇家技术学院[22-23]制备出面积 0.4 cm^2、效率 17.6% 的 CIS 太阳能电池；1999 年，美国 NREL[21,24]将 CIS 太阳能电池的转换效率提高到 18.8%；同年，美国 Shell Solar 研制出效率 12.1% 的发电用 CIGS 太阳能电池组件；2001 年，Wurth Solar[22]开始在欧洲销售平均转换效率 8.5% 的 CIGS 太阳能电池组件，日本 Showa Shell 公司[22,25]的 CIGS 太阳能电池 3 569 cm^2 组件转换效率达 13.4%；2004 年，Wurth Solar[22,25]生产的标准模块(60 cm × 120 cm)转换效率达 13%；其后，Global Solar Energy [26]使用卷对卷方法在柔性模块上制备出功率密度 40 W/kg、块效率超过 11% 的太阳能电池；DayStar Technologies[27]采用化学浴蒸发法完成 1.1 cm^2 的 CIGS 效率达 15.2%，24 cm^2 的效率达 11%；ITN Energy Systems[28]采用卷对卷蒸发生产线生产 0.68 cm^2 的 CIGS 效率达 11%，58 cm^2 的效率为 7%；ISET 公司[19-20]采用非真空墨水喷涂工艺在“Upilex”聚合物基底上制备的 CIGS 薄膜太阳能电池效率 8.0%，功率密度大于 1 280 W/kg；2009 年，NERL 研制出转换效率达到 19.9% CIGS 薄膜太阳能电池。

国内，南开大学、内蒙古大学和云南师范大学等于 20 世纪 80 年代中期先后开展 CIS 薄膜电池研究。其中，南开大学[29]采用蒸发硒化法制备的 CIS 薄膜电池效率在 2003 年达到了 12.1%，2004 年 CIS 薄膜电池光电转换效率超过 14%。此外，清华大学、北京大学、国防科技大学等也在从事 CIS、CIGS 薄膜太阳能电池的研究工作，均取得了一定的进展。

虽然 CIGS 具有其他材料无可比拟的优势，但是仍然存在着一些问题，如制造过程比较复杂，增加了工艺的难度和成本；关键原料如铟和硒，其天然储量相当有限；缓冲层材料多用 CdS，其毒性对环境的影响不可忽视。因此，未来的发展主要致力于：(1)采用更先进的生产工艺来降低成本；(2)通过改善光吸收层性质、形成禁带宽度梯度、模块组装进一步提高转换效率。

4　有机材料

自 1977 年导电聚乙炔(PA) 被发现以来，有机太阳能电池受到了科学家极大关注[30]。以聚乙炔薄膜为电池材料的研究十分活跃，尤其是近年来研究开发的导电聚合物为人类提供了新的制备廉价太阳能电池的材料，使人们看到了新的希望。有机太阳能电池材料主要是含有大共轭结构的有机小分子苝类、有机染料分子及含有染料分子的聚合物、过渡金属配合物等。从材料角度考虑，包括有机材料、有机染料/无机材料、有机染料/有机染料、有机染料/聚合物材料等多种。其中，以有机染料/无机材料杂化的研究最为深入和卓有成效。

1991 年，瑞士 Gratzel 教授[31]以纳米多孔 TiO_2 为

半导体电极,以 Ru 络合物作敏化染料,并选用 I_2/I_3 氧化还原电解质,制出了一种新型薄膜太阳电池,其光电转换效率为 7.1%,不同于传统的半导体光伏发电原理,它是借助于染料作为吸光材料,染料中的价电子受光激发跃迁到高能态,进而传导到纳米多孔 TiO_2 半导体电极上,经由电路引至外部。失去电子的染料则经由电池中的电解质获得电子。图 6 是染料敏化太阳能电池的结构组成。

敏化染料直接影响到电池对光子的吸收和转换效率,要求具备以下条件[32]:(1)与 TiO_2 纳米晶半导体电极表面具有良好的结合性能,能够快速达到吸附平衡,而且不易脱落;(2)在可见光区有较强的、尽可能宽的吸收带;(3)染料的氧化态和激发态的稳定性高,且具有尽可能高的可逆转换能力;(4)激发态寿命足够长,且具有很高的电荷传输效率;(5)有适当的氧化还原电势以保证染料激发态电子注入到 TiO_2 导带中;(6)敏化染料分子应含有达 π 键、高度共轭、并且具有强的给电子基团。纳米 TiO_2 薄膜电极的微观结构对电池的光电转换效率有较大的影响。目前所使用的纳米 TiO_2 粒径多在 100 nm 以下。常用的制备方法有溶胶凝胶法、水热反应法、溅射法、醇盐水解法、模板组装法和等离子喷涂法等。

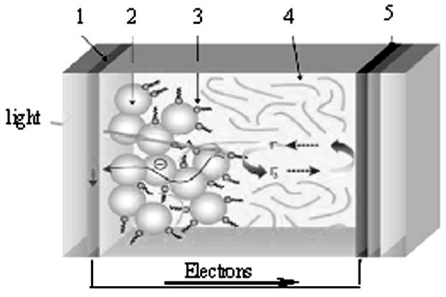

图 6　染料敏化太阳能电池的结构

Fig. 6　Structure of dye sensitized solar cells

1-TCO-coated glass, 2-Nanocrystalline TiO_2 film, 3-Amphiphilic sensitizer dye, 4-Polymer gel electrolyte doped with I^-/I_3^-, 5-Platinized TCO-coated glass。

虽然使用含碘有机溶剂液态电解液的染料敏化 TiO_2 纳晶薄膜太阳能电池的转换效率已超过 11%,然而有机电解液的渗漏和挥发严重缩短了电池的使用寿命。为此,Gratzel 等[33]用一种有机空穴导电材料代替液态电解质制成固态光电池,其单色光电转换效率达 33%,并改善了电池的长期稳定性;澳大利亚 STA 公司[25, 34]建成的 200 m^2 染料电池屋顶;欧盟 ECN[25]研究所取得面积大于 1 cm^2 的电池效率最高纪录:8.18% (2.5 cm^2),5.8% (100 cm^2)。

中国科学院化学所林原等[35]以乙烯基吡啶与交联剂固化离子液体及 EC/PC 电解液,电池转换效率达到 6.53%;2005 年,以悬挂吡啶基聚胺一酰胺的树状聚合物和含双碘功能基团的交联剂构成的潜在反应性高分子电解液体系,固化液态电解液电池转换效率达 7.7%;2007 年,中国科学院等离子体物理研究所[36]15 cm×20 cm 染料敏化太阳能电池的效率达到 6%。

今后,染料敏化 TiO_2 电池光电转换材料的研究主要致力于:(1)优化纳米多孔薄膜电极低温制备工艺;(2)新型无机敏化染料以及有机染料开发;(3)电解质的固体化替代液体电解质解决电池的封装问题等。

5　结束语

未来光电转换材料的研究将朝以下方向发展:(1)转换效率高,寿命长,无衰退现象;(2)制备工艺简单,对环境和设备要求不高;(3)成本低,原料来源丰富或者是电池制备过程中用量少;(4)环保。

参考文献

[1] Goetzberger A, Hebling C. Photovoltaic materials, past, present, future [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 2000, 62: 1

[2] Stribling R. Boeing high power thin film solar array [C]. //The 4th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), June 2006, San Diego, California

[3] Yukinori K. Recent progress and future prospects for Japan's photovoltaic power generating systems-to- wards a genesis project [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2000(8): 53

[4] Zheng G F, Shi Z, Bergmann R, et al. Thin film silicon solar cells on glass by substrate thinning [J]. Sol Energy Mater Sol Cells, 1994, 32: 129

[5] 杨洪兴,郑广富,文卓豪,等. 太阳电池新材料新方法[J]. 太阳能学报, 2002, 23(02): 301

[6] PeterWurfel 著,陈红雨,匡代彬,郭长娟,等译. 太阳能电池——从原理到新概念[M]. 北京:化学工业出版社, 2009

[7] Carlson D E, Wroski C R. Solar cells using discharge-produced amorphous silicon [J]. J Elect. Mater., 1997(6): 95

[8] Jennifer E G, Paul E H, Donna S, et al. AFRL thin film solar cell development and upcoming flight experiments [C]. IEEEAC paper#1590, 2004

[9] National Renewable Energy Laboratory (US). Solar program overview: fiscal years [J]. 2002 & 2003

[10] Ishikawa Y, Schubert M B. In Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Palz W, et al. (eds.), Munich, Germany, 2005

[11] 郝会颖,孔光临,曾湘波,等. 非晶/微晶相变域硅薄膜及其太阳能电池[J]. 物理学报,2005,54(07):3327

[12] 陈光华,邓金祥. 新型电子薄膜材料[M]. 北京:化学工业出版社,2002

[13] 郭浩,丁丽,刘向阳. 太阳能电池的研究现状及发展趋势[J]. 许昌学院学报,2006,25(02):38

[14] 刘玉萍,陈枫,郭爱波,等. 薄膜太阳能电池的发展动态[J]. 节能与环保,2006(11):21

[15] Demtsu S H, Sites J R. Quantification of losses in thin-film CdS/CdTe solar cells [C]. //Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf. ,2005,31:347

[16] 夏庚培,郑家贵,冯良桓,等. CdTe 太阳能电池的制备及电子辐照对电池影响的研究[J]. 四川大学学报(自然科学版),2004,41(01):118

[17] Kessler F, Rudmann D. Technological aspects of flexible CIGS solar cells and modules [J]. Sol Energy,2004,77:685

[18] 庄大明,张弓. GIGS 薄膜太阳能电池研究现状及发展前景[J]. 新材料产业,2005(4):43

[19] Kapur V K, Fisher M, Robin R. Fabrication of light weight flexible CIGS solar cells for space power applications [J]. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. ,2001:668

[20] Kapur V K, Basol B M, Craig R, et al. Oxide-based method of making compound semiconductor films and making related electronic devices [P]. U. S. Patent, No. 6,127,202

[21] Archer M L, Hill R. Clean Energy From Photovoltaics [M]. Imperial College Press, 2001

[22] 庄大明,张弓. 铜铟镓硒薄膜太阳能电池的发展现状以及应用前景[J]. 真空,2004,41(02):1

[23] Schock H W, Pfister F. Thin film solar cells: the early years [C]. //Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 2000:270

[24] Ramanathan K, Contreras M A, Perkins C L, et al. Properties of 19.2% efficiency ZnO/CdS/$CuInGaSe_2$ thin film solar cells [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2003, 11: 225

[25] 徐立珍,李彦,秦锋. 薄膜太阳电池的研究进展及应用前景[J]. 可再生能源,2006,127(03): 9

[26] Beck M E, Westermann J V, Mason D. Manufacturing process control and optimization of CIGS on flexible substrates [C]. NCPV Program Review Meeting, 2001

[27] Raffaelle R P, Aloysius F, Hepp, et al. Thin-film solar cells on metal foil substrates for space power [C]. //The 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, 2004, Providence, Rhode Island

[28] Woods L M, Kalla A, Gonzalez D, et al. Wide-bandgap CIAS thin-film photovoltaics with transparent back contacts for next generation single and multi-junction devices [J]. NASA, CP-2005-213431

[29] 刘芳芳, 何青, 李凤岩, 等. Cu(In, Ga)Se_2材料成分对其电池性能的影响[J]. 半导体学报, 2005, 26(10): 1954

[30] William H Holley. Investigation into the causes of browning in EVA encapsulated flat plate PV modules [C]. IEEE First WCPEC, Hawaii, 1994, 12: 893.

[31] Regan B O, Gratzel M. High-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films [J]. Nature, 1991, 353: 737

[32] 张哲, 周保学, 葛伟杰, 等. 染料敏化纳米 TiO_2 薄膜太阳能电池中的电荷复合[J]. 科学通报, 2005, 50(18): 1929

[33] Bach U, Lupo D, Gratzel M, et al. Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO_2 solar cells with high photon-to electron conversion efficiencies [J]. Nature, 1998, 395: 583

[34] Service R F. Solar cells-tricks for beating the heat help panels see the light [J]. Science, 2003, 300: 1219

[35] 张昌能, 王淼, 周晓文, 等. 染料敏化太阳能电池中聚合物电解质的优化[J]. 科学通报, 2004, 49(13): 1241

[36] 孔凡台, 戴松元. 染料敏化太阳能电池研究进展[J]. 新材料产业, 2007(7): 32

(编辑　任涛)