

叠层太阳能电池研究进展和发展趋势

伍沛亮, 王红林, 陈 砺

华南理工大学化学与化工学院, 广州 510640

摘要 叠层太阳能电池结构可以拓宽吸收光谱, 最大限度地光能变成电能, 提高了太阳能电池的能量转换效率, 这类太阳能电池是目前研究的热点。本文集中介绍了非晶硅叠层太阳能电池、多元化合物叠层太阳能电池和染料敏化叠层太阳能电池的研究现状, 对它们的结构、性能指标和效率等做了介绍和评估, 指出了各自的优缺点, 分析了阻碍叠层太阳能电池进一步发展和应用的制约因素主要有两个: 很难找到两种晶格匹配良好的半导体晶体; 对环境友好, 价格合理, 来源丰富的太阳能电池材料很稀少。非晶硅系叠层太阳能电池对材料纯度要求较高, 价格贵; 化合物太阳能电池虽然转换效率高, 但是电池材料对环境造成污染; 而染料敏化叠层太阳能电池制作工艺简单, 电池材料来源丰富, 必将是今后发展的趋势。

关键词 叠层太阳能电池; 转换效率; 禁带宽度

中图分类号 TM615

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)03-0095-04

Progress in Studied on Tandem Solar Cells

WU Peiliang, WANG Honglin, CHEN Li

School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract The tandem solar cells increase the absorption of solar light and allow a more efficient use of the photo energy. The researches on tandem solar cells have been focused on a-Si tandem solar cells, compound tandem solar cells and dye-sensitized tandem solar cells. Their progress is reviewed in this paper. The structures, characteristics of every kind of tandem solar cells are discussed and evaluated. There are two major constraints for the development of tandem solar cells. One constraint is that it is difficult to find two semiconductor crystals matched well together. Another constraint is that solar cell materials that do not pollute the environment and can be obtained with a reasonable cost are scarce. Among the three kinds of solar cells, the dye-sensitized tandem solar cell will be the future development trend, for its production process is simple and enjoys a rich source of materials.

Keywords tandem solar cells; conversion efficiency; energy gap

0 引言

能源是人类社会存在和发展的重要物质基础。随着社会

的发展, 煤炭、石油等不可再生资源的日益减少, 开发清洁能源迫在眉睫。太阳能是取之不尽的新能源, 太阳能电池是人们利用太阳能的一种重要方式。太阳能电池将资源无限、清洁干净的太阳辐射转换为电能。近些年来, 世界太阳能电池的产量以年增长率 30% 的速度快速发展, 在 2004 年底全球的总装机容量达到 4 330 MW。科学家预言, 在 21 世纪中期太阳能光伏发电将成为重要的发电方式^[1]。

太阳能电池的工作原理是, 太阳光照在半导体 P-N 结上, 形成空穴-电子对, 在 P-N 结电场的作用下, N 型半导体的空穴往 P 型区移动, P 型区中的电子往 N 型区移动, 接通电路后就形成电流。

太阳能电池发展经历了三个阶段。以硅片为基础的“第一代”太阳能电池其技术发展已经成熟, 但单晶硅纯度要求在 99.999%, 生产成本太高使得人们不惜牺牲电池转换率为代价开发薄膜太阳能电池。第二代太阳能电池是基于薄膜材料的太阳电池。薄膜技术所需材料较晶体硅太阳电池少得多, 且易于实现大面积电池的生产, 可有效降低成本。薄膜电池主要有非晶硅薄膜电池、多晶硅薄膜电池、碲化镉以及铜铟硒薄膜电池, 其中以多晶硅为材料的太阳能电池最优。太阳能光电转换率的卡诺上限是 95%^[2], 远高于标准太阳能电池的理论上限 33%, 表明太阳能电池的性能还有很大发展空间。Martin Green 认为, 第三代太阳电池必须具有如下条件: 薄膜化, 转换效率高, 原料丰富且无毒^[3]。目前第三代太阳电池还处在概念和简单的试验研究。已经提出的主要有叠层太阳电池、多带隙太阳电池和热载流子太阳电池等。其中, 叠层太阳能电池是太阳能电池发展的一个重要方向。

收稿日期: 2008-12-25

作者简介: 伍沛亮, 研究方向为太阳能、氢能、等离子体技术, 电子信箱: thend808@yahoo.com.cn; 王红林 (通信作者), 副教授, 研究领域为化学工艺过程、可再生能源、等离子体技术, 电子信箱: pc-wanghl@163.com

1 叠层太阳能电池简介

1.1 叠层太阳能电池的原理

由于太阳光光谱的能量分布较宽,现有的任何一种半导体材料都只能吸收其中能量比其禁带宽度值高的光子。太阳光中能量较小的光子将透过电池被背电极金属吸收,转变成热能;而高能光子超出禁带宽度宽度的多余能量,则通过光生载流子的能量热释作用传给电池材料本身的点阵原子,使材料本身发热。这些能量都不能通过光生载流子传给负载,变成有效电能。因此对于单结太阳能电池,即使是晶体材料制成的,其转换效率的理论极限一般也只有 25% 左右。

太阳光光谱可以被分成连续的若干部分,用能带宽度与这些部分有最好匹配的材料做成电池,并按禁带宽度从大到小的顺序从外向里叠合起来,让波长最短的光被最外边的宽隙材料电池利用,波长较长的光能够透射进去让较窄禁带宽度材料电池利用,这就有可能最大限度地将光能变成电能,这样结构的电池就是叠层太阳能电池^[4]。

1.2 制备方法和种类

叠层太阳能电池可以通过机械堆叠法来制备,先制备出两个独立的太阳能电池,一个是高带宽的,一个则是低带宽的,然后把高带宽的堆叠在低带宽的电池上面。黄素梅、孙卓等^[5]发明了一种高效叠层太阳能电池的制备方法,顶层和底层共用同一块玻璃基板,从顶层太阳电池引出一对电极,同时从底层太阳电池引出另一对电极,构成 4 个终端结构的叠层太阳能电池。实现对太阳能电池的最佳匹配,极大地提高太阳能电池的光电转换效率,提高太阳能电池的质量和性能。该方法有效地改善了单个太阳能电池光谱吸收范围窄,光吸收利用效率低的问题,有效地提高了太阳能电池对光谱的吸收转换效率,其光电转换效率可高达 25%~30%。

叠层太阳能电池研究主要集中在多元化合物叠层太阳能电池、非晶硅叠层太阳能电池和染料敏化叠层太阳能电池等方面。

2 叠层太阳能电池系列

2.1 多元化合物叠层太阳能电池

多元化合物太阳能电池指不是用单一元素半导体材料制成的太阳能电池。现在各国研究的多元化合物太阳能电池品种繁多,但绝大多数尚未工业化生产。半导体化合物 GaAs, CdTe, Cu(In, Ga)Se₂(CIGS)的禁带宽度接近于光伏电池所要求的最佳禁带宽度,它们具有高的光电转化效率,又有较低的制作成本,可以用来制造薄膜叠层太阳能电池。

GaAs 是 III-V 族半导体材料,禁带宽度 1.42 eV,与太阳光谱匹配,是理想的太阳能电池材料。单结 GaAs 电池只能吸收特定光谱的太阳光,转换效率不高。不同禁带宽度的 III-V 族材料制备的多结 GaAs 电池,按禁带宽度由大到小叠合,这些 III-V 族材料分别吸收和转换太阳光谱的不同子域,可大幅提高太阳能电池的光电转换效率。由于镓比较稀缺,砷有毒,制造成本高,此类太阳能电池的发展受到一定的影响。

目前,国际上已对 AlGaAs/GaAs, GaInP₂/GaAs, GaInAs/Inp, GaInP/GaInAs 等双结叠层太阳能电池进行过研究,其中对 GaInP₂/GaAs 叠层太阳能电池的研究居多。这种电池结构首先由 Olson 在 1990 年提出,他发现 GaInP₂ 材料可以作为叠层太阳能电池的顶层电池^[6]。目前国外报道的 GaInP₂/GaAs 双结叠层太阳电池的光转换效率已达 25.7%^[7]。产业化成熟产品转换效率约 23.1%^[8],并逐步用作卫星等航天器的供电电源,前景十分广阔。不过,造价昂贵一直是 GaInP₂/GaAs 叠层电池难以大批量生产的直接原因,选用价格低廉的 Ge 衬底是降低途径。国外对此已研究多年,近年国内研究也开始深入。上海交通大学物理系的陈鸣波、崔容强等^[9]采用低压金属有机物化学气相沉积工艺制备 P-N 型的 GaInP₂/GaAs 叠层太阳能电池样品,并对 GaInP₂ 顶层电池进行改进,制得的电池光电转换效率为 23.82%。其他双结太阳能电池如 Al_{0.37}Ga_{0.63}As/GaAs(Ge)两者的禁带宽度分别为 1.93 eV 和 1.42 eV,正处于叠层太阳能电池所需的最佳匹配范围,其效率达到 23%。

在双结电池的基础上,1993 年在国外就有报道研制出三结 Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs/Ge 叠层太阳能电池。1996 年,美国光谱实验室研制的该类电池的最高效率达到 25.7%,小批量生产平均效率达到 23.8%,1997 年大批量生产平均效率达到 24.5%。2000 年最高效率达到 29%,2002 年大批量生产平均效率达到 26.5%。目前,国际上从事多结电池批产的最知名的两家公司是美国的光谱实验室和 Emcore 公司,其年批产能力分别为 500 kW 和 200 kW。

作为 II-VI 族化合物半导体 CdTe,是禁带宽度为 1.46 eV 的直接禁带半导体,很接近太阳能电池需要的最优化禁带宽度,吸收系数约为 10⁵ cm⁻¹,就太阳辐射光谱中能量高于 CdTe 禁带宽度的范围而言,1 μm 厚的 CdTe 可以有效吸收其 99%^[10-11]。目前,国内的 CdS/CdTe 太阳电池是研究热点,报道的最高光电转换率是由李愿杰等^[12]制造的单层 CdS/CdTe,效率为 13.38%。该实验室还制造出多层叠层 CdS/CdTe 太阳电池,结构为 CdS/CdTe/CdS/CdTe/ZnTe:Cu/Ni,如图 1 所示。这种叠层太阳能电池的效率可以达到 8.16%。

玻璃
SnO ₂
N-CdS(top cell)
P-CdTe(top cell)
N-CdS(bottom cell)
P-CdTe(bottom cell)
ZnTe:Cu
Ni

图 1 叠层太阳能电池结构

Fig. 1 Tandem solar cell structure diagram

Cu(In, Ga)Se₂(CIGS)太阳能电池的光电转化效率高、性能稳定、抗辐射能力强,且制造成本低,倍受重视,是新一代太阳能电池。它的最高的转换效率已经达到 19.5%^[13]。为了提高效率,可以制成 CGS/CIS 层叠太阳能电池,这种电池的转换效

率据报道已经达到 33.9%, 该叠层电池的稳定性、直接带宽、高吸收系数对于生产低成本、高效率的两结叠层太阳能电池来说是可取的。对于两结叠层太阳能电池, 其顶层电池对全部转换效率的贡献大, 所以要达到 CGS/CIS 25% 的转换效率, 需要转换效率大于 15% 高质量的 CGS 顶层电池^[14]。

2.2 非晶硅叠层太阳能电池

在硅系列电池中, 非晶硅(a-Si)对阳光的吸收系数最高, 活性层只需要 1 μm 厚, 材料的需求大大减少。但是也有不少缺点: 随光照时间增加效率反而衰退; 禁带宽度为 1.7 eV, 对长波区域不敏感。研究证实, 叠层太阳能电池可有效提高非晶硅的稳定性, 使室外阳光下照射 1 年的效率衰退率从单结的 25%~35% 下降到 20% 以下。下面将介绍 a-Si/poly-Si, a-Si/ μc -Si, a-Si/CIS 3 种主要的非晶硅叠层太阳能电池。

多晶硅(poly-Si)的禁带宽度(1.12 eV)比非晶硅小得多, 作为 a-Si/poly-Si 叠层太阳能电池底电池的光吸收体, 它能有效吸收从顶层电池透射的能量小于非晶硅禁带宽度的太阳光辐射光谱, 提高叠层电池的能量转换效率。Takakura^[15]理论上计算出 a-Si/poly-Si 叠层太阳能电池有超过 30% 的效率, 已制备出 13.3% 能量转换效率的 a-Si/poly-Si 叠层太阳能电池^[16], 四端输出转换效率达 21%^[17], 未发现电池性能随光照而衰退^[16-17]。

微晶硅(μc -Si:H)有比非晶硅更高的光吸收系数, 尤其近红外高出 2~3 数量级^[18], 光照衰退效应引起的薄膜性能衰退远比非晶硅小^[18-19], 而经氧化微晶硅的载流子迁移率可增大 20 倍^[20], 激起人们研制全微晶硅 P-i-N 型太阳能电池的热情^[18-19]。目前单结微晶硅 P-i-N 太阳能电池能量转换效率已达 7.8%^[18], 而且其光伏特性特别适合用来制造 a-Si/ μc -Si 叠层电池的底电池, 国外报道已获得 9.4% 的电池能量转换效率, 且长期光照电池性能衰退极小^[19]。林鸿生等^[21]通过数值求解 Poisson 方程, 对经高强度光辐射过的 a-Si/ μc -Si 叠层电池进行了数值模拟分析, 表明 a-Si/ μc -Si 叠层电池的顶层电池 a-Si 未发生光致衰退效应, 这种结构的电池具有较高的光稳定性。薛俊明等^[22]采用射频等离子增强化学气相沉积法制得 a-Si/ μc -Si 叠层电池, 效率达到 9.83%, 高于国外水平。

CuInSe₂ 是一种光吸收系数很高的半导体材料, 对能量稍大于其禁带宽度(1.04 eV)的光子, 它的吸收系数在 10⁵ cm⁻¹ 数量级上^[23]。CuInSe₂ 基多晶薄膜太阳能电池已得到了广泛的研究, 它也是一种制造 a-Si/CIS 叠层太阳能电池底电池最理想的光吸收体材料之一。Takakura^[24]从理论上算出 a-Si/CIS 叠层太阳能电池的能量转换效率能超过 20%, 已制备出 13% 稳定效率的 a-Si/CIS 叠层太阳能电池^[25], 而四端输出达 14.6%, 没有发现电池性能随光照而衰退。

2.3 染料敏化叠层太阳能电池

自从 1991 年 Grtzel 等^[26]首次将金属钌有机配合物作为染料吸附在 TiO₂ 纳米晶多孔膜制成电池后, 吸引了许多研究者的目光。染料敏化太阳能电池原理上有诸多优势: 由于几乎所有染料激发态上的电子可以有效地注入到半导体导带中, 减少了电子与空穴复合的机会, 有利于提高光电转换效

率; 此外, 不仅原料和制造成本低, 而且所用材料对环境的影响小, 具有代表性的增感色素 Ru 色素的毒性很低, 电池的生命周期评估也较好。要把理论优势转化为实际优势, 还取决于实际电池中的材料状态与理想状态的符合程度。在 1 sun(即一天中最大的照射下)条件下, 染料敏化太阳能电池的转换效率已经超过 10%^[27], 其实用化研究开发已经开始。据 2008 年 5 月媒体报道索尼已经开发出商业应用的染料敏化太阳能电池, 效率达到 10%。

染料敏化叠层太阳能电池由两个光电池组成, 前面的电池吸收太阳光中的高能紫外和蓝光, 利用纳米晶金属氧化物薄膜来产生电子-空穴对。波长在绿光到红光之间的光被 Grtzel 敏化二氧化钛电池吸收, 这两个电池连接起来提供电压^[28]。染料敏化太阳能电池的能量转换效率主要与敏化剂吸收太阳光谱的能力有关, 为了提高光谱效应, 在电池的两个不同层上用不同的敏化剂染料。马廷丽、苗青青^[29]制作了一种叠层式染料敏化太阳能电池。其特征在于, 顶部的太阳能电池与底部的太阳能电池的光阳极分别吸附具有相同结构或不同结构, 不同光谱响应范围且有互补性质的染料; 两个太阳能电池的光阳极结构为在基板上载有一层导电膜和半导体薄膜及染料, 对向电极为带有导电性的基板, 在两个电极之间介入电解质。这一新型叠层式染料敏化太阳能电池有光电转换效率高、价格低、制备工艺简单并且易于大规模生产的特点。解决现有太阳能电池效率低、成本高、制备工艺复杂的问题。用该发明的技术手法制造的染料敏化太阳能电池可用做太阳能发电和太阳能制氢系统。

3 总结和展望

叠层太阳能电池的设计难题在于要寻找两种晶格匹配良好的半导体晶体, 其禁带宽度将引起高效率的能量转换。此外, 在理想的情况下, 电池导带的最上层应该有与底层价带大约相同的能量, 这使得顶端半导体的电子被太阳光激发后能够很容易的从导带进入底部半导体晶格的孔(价带), 电子在价带上又被不同波长的太阳光激发。这样一来, 两部分的电池一起工作, 像两个串连的蓄电池, 并且总功率与两个电池的功率总和相等。但是, 如果在接合处价带和导带没有被正确的匹配, 当电子流过时就会因为由此产生的电阻造成功率损耗。例如, 高效率的 GaAs/Ge 叠层电池早在 1987 年就已制备出来, 结果证明由于电流不匹配而不能应用。可用可行性分析方法或泊松比和连续性方程设计叠层电池的电流匹配^[28-30]。另外就是实际应用中叠层电池的稳定性问题。

以 III-V 族化合物及 CIS 等稀有元素制备的太阳能电池, 尽管所制成的电池转换效率很高, 但从材料来源和环境问题来看, 这类太阳能电池将来不可能占据主导地位。高转换效率和降低成本是太阳能电池制备中要考虑的两个主要因素, 目前的非晶硅系叠层太阳能电池, 要想把效率提高很多是很困难的, 而且非晶硅系叠层太阳能电池对材料纯度要求较高, 价格贵, 很大程度上限制了其工业化推广。染料敏化

太阳能电池自 1991 年提出以来,一直是科学家的研究热点,染料敏化叠层太阳能电池的研究虽然刚刚起步,但其关键材料二氧化钛薄膜和光敏化剂,材料低廉而且来源广泛,并且染料敏化二氧化钛制备工艺简单。虽然短期内,硅类太阳能电池在占有主要比例,但是在不久的将来,随着科技的进一步发展,染料敏化叠层太阳能电池有十分广阔的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电应用实例 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Wang Changgui, Wang Sicheng. Photovoltaic power application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] Green M A. Third generation photovoltaics: Solar cells for 2020 and beyond[J]. *Physica E*, 2002, 14: 65-70.
- [3] Are K, Tagaya H, Ogata T, *et al.* Electro-chemical intercalation organic molecules into layered oxides, MoO_3 [J]. *Mater Res Bull*, 1996, 31(3): 283.
- [4] 李毅, 胡盛明. 非晶硅叠层太阳能电池的现状与发展方向 [J]. 真空科学与技术学报, 2000, 20(3): 222-225.
Li Yi, Hu Shengming. *Vacuum Science and Technology*, 2000, 20(3): 222-225.
- [5] 黄素梅, 孙卓, 许修兵, 等. 一种高效叠层太阳能电池及其制备方法: 中国, CN200710042793.3[P]. 2008.
- [6] Olson J M, Kurtz S R, Kibbler A E, *et al.* High efficiency GaAs solar cells using GaInP [RD2] window layers [J]. *Appl Phys Lett*, 1990, 56: 623.
- [7] Takakura H. Theoretical analysis of the effect of conduction band offset of Window/CIS layers on performance of CIS solar cells using device simulation[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 31(8): 2394.
- [8] Hamakawa Y, Matsumoto, Okuyama M, *et al.* Proceedings of the 7th E. C Photovoltaic Solar Energy Conference[C], Dordrecht, Netherlands Reidel, 1987: 572.
- [9] 陈鸣波, 崔容强, 王亮兴, 等. P-N 型 GaInP₃/GaAs 叠层太阳能电池研究 [J]. 物理学报, 2004, 53(11): 3632-3636.
Chen Mingbo, Cui Rongqiang, Wang Liangxing, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(11): 3632-3636.
- [10] Ma W, Hariuchi T. Optimum design and its experimental approach of a-Si/poly-Si tandem solar cells [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 1994, 32(4): 351.
- [11] Meier J, Fluckiger R, Shah A, *et al.* Complete microcrystalline P-i-N solar cell-Crystalline or amorphous cell behavior [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 65(7): 860.
- [12] 李愿杰, 唐茜, 李兵, 等. CdS/CdTe 叠层太阳能电池的制备及其性能 [J]. 半导体学报, 2007, 28(5): 722-725.
Li Yuanjie, Tang Qian, Li Bing, *et al.* *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(5): 722-725.
- [13] Miguel A C, Manuel J R, Nouif R. Characterization of Cu (In, Ga)Se₂ materials used in record performance solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2006: 511-512.
- [14] Saitoh K, Ishiguro N, Yanagawa N, *et al.* Performance of P-i-N solar cells with intrinsic $\mu\text{c-Si}$ layer[J]. *Noncryst Solids*, 1996, 198: 1093.
- [15] Faraji M, Gokhale S, Choudhary S M, *et al.* High mobility hydrogenated and oxygenated microcrystalline silicon as a photosensitive material in photovoltaic applications [J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 60(26): 3289.
- [16] Inoue S, Ichikuni N, Suzuki T, *et al.* Transport and interfacial transfer of electrons in dye-sensitized solar cells[J]. *Phys Chem B*, 1998, 102: 4690.
- [17] Nutzenadel C, Zuttel A, Chartouni D, *et al.* Alloys and Compounds[J]. *Electro-Chem Solid-State Lett*, 1999(2): 30.
- [18] Teizer W, Hallock R B, Dujardin E, *et al.* Diamond-coated ZnS for improved erosion resistance[J]. *Bull Am Phys Soc*, 1999, 44(1): 519.
- [19] Bertness K A, Olson J M. 29.5%-efficient GaInP₃/GaAs tandem solar cells[J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 65(8): 989-991.
- [20] John C, Fan C, Tsaur B Y, *et al.* Optimal design of high-efficiency tandem cells[C]// Proceedings of the 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New York: IEEE, 1982: 692-701.
- [21] 林鸿生, 林翌, 段开敏. a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ 叠层结构太阳能电池中的光诱导性能衰退[J]. 固体电子学研究与进展, 2000, 20(8): 313-317.
Lin Hongsheng, Lin Gang, Duan Kaimin. *Research and Progress of Solid State Electronics*, 2000, 20(8): 313-317.
- [22] 薛俊明, 麦耀华, 赵颖, 等. 薄膜非晶硅/微晶硅叠层太阳能电池的研究[J]. 太阳能学报, 2005, 26(2): 166-169.
Xue Junming, Mai Yaohua, Zhao Ying, *et al.* *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2005, 26(2): 166-169.
- [23] Symko D M. Progress in high-performance PV: Poly-crystalline thin-film tandem cells [C]//The 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 2004: 1651.
- [24] Chu T L, Chu S S. Thin film II-VI photovoltaic [J]. *Solid State Electron*, 1995, 38(3): 533.
- [25] Mitchell K, Eberspacher C, Ermer J, *et al.* Progress of high-efficiency thin film cells and submodules[J]. *Sol Cells*, 1989, 27(4): 69.
- [26] O'Regan B, Gratzel M. A low-cost high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 film[J]. *Nature*, 1991, 353: 737.
- [27] Nazarruddin M K, Kay A, Rodicio I, *et al.* Conversion of TiO_2 by $\text{Cis-x}_2\text{Bis}$ (2,2'-bipyridine-4,4'-dicarboxylate) ruthenium (II)[J]. *Am Chem Soc*, 1993, 115: 6382.
- [28] Suresh S R, Craig A, Grimes E C. Fabrication of nanoporous TiO_2 films through benard-marangoni convection[J]. *Mat Res Innovat*, 2002.
- [29] 马延丽, 苗青青. 新型有机太阳能电池塑料薄膜化的研究进展[J]. 化学进展, 2006, 18(3): 176-181.
Ma Yanli, Miao Qingqing. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2006, 18(3): 176-181.
- [30] Pavel Stulik, Jai Singh. Optical modelling of a single-junction P-i-N type and tandem structure amorphous silicon solar cells with perfect current matching [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1997, 46: 271-288.

(责任编辑 岳臣)

《科技导报》“科技纵横捭阖”栏目征稿

“科技纵横捭阖”栏目由中国科学技术信息研究所总工程师武夷山研究员主持,为评论性文章。欢迎读者就国内外重大科技事件、科技人物、科技话题进行评论,发表自己独立的见解和观点。每篇文章约 2000 字,要求行文深入浅出、言简意赅、逻辑清晰、有理有据、观点鲜明、切中要害,可读性强,并附必要的参考文献(不多于 3 条)。栏目责任编辑:王芷;投稿邮箱:wangzhi@cast.org.cn。