

碲化镉薄膜太阳能电池中的关键科学问题研究*

王德亮[†] 白治中 杨瑞龙 侯泽荣

(中国科学技术大学 合肥微尺度物质科学国家实验室(筹))

中国科学院能量转换材料重点实验室 合肥 230026)

2012-06-28收到

[†] Email:eedewang@ustc.edu.cn

DOI:10.7693/wl20130506

Critical issues of CdTe thin film solar cells

WANG De-Liang BAI Zhi-Zhong YANG Rui-Long HOU Ze-Rong

(Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, Key Laboratory of Energy Conversion Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘 要 文章对CdTe薄膜太阳能电池中的4个关键科学问题进行了讨论,并对电池器件的性能进行了研究,其中包括高质量硫化镉薄膜、背接触层、CdS/CdTe界面和CdCl₂热处理性能的研究。文章作者研究了背电极接触层中Cu掺杂含量对电池性能的影响,通过改变背接触层中Cu的含量,可以改变Cu与Te反应产生的物相成分,从而发现以Cu_{1.4}Te为主导的背接触缓冲层能有效地减少电池*I-V*曲线中的“翻转”(roll-over)现象,同时能有效地降低背接触势垒。此外,还研究了CdS/CdTe界面的CdCl₂热处理反应,发现当热处理温度高于350℃时,CdS与CdTe之间的互扩散开始发生,此温度对应于CdS由立方相转变为六方相;而在550℃热处理后,S和Te互扩散形成的CdS_xTe_{1-x}化合物,其*x*值高达11%。通过优化电池制备工艺,获得了在AM1.5标准光源下高达14.6%的CdTe电池转换效率。

关键词 太阳能电池, 碲化镉, 薄膜, 高转化效率

Abstract Four critical issues related to high efficiency CdTe thin film solar cell are discussed and studied: the quality of CdS films, back contact, CdS/CdTe interface formation, and CdCl₂ heat treatment. Through control of the copper doping in the back contact we have eliminated the roll-over phenomenon in the *I-V* curve. The back contact barrier was reduced by formation of a Cu_{1.4}Te compound which has a good contact with CdTe. Systematic investigations showed that relatively strong interdiffusion at the CdS/CdTe interface began to occur at around 350°C. This temperature coincides with the CdS phase transformation from cubic to hexagonal. Both S- and Te-rich CdS_xTe_{1-x} alloy formed at the interface, with *x* as much as 11%. Through optimization of the cell fabrication process, a CdTe solar cell efficiency as high as 14.6% has been obtained.

Keywords solar cell, CdTe, thin film, high efficiency

* 国家自然科学基金(批准号: 51272247, 60976054)和中国科学院太阳能行动计划资助项目

1 引言

CdTe 是一种 II—VI 族化合物半导体。它作为一种具有应用前景的薄膜太阳能电池材料而受到广泛关注。这是由于 CdTe 具有以下两大特性：首先，其禁带宽度为 1.45 eV，因而对太阳光谱的响应处在最理想的太阳光谱波段，使得以 CdTe 为吸收层的单结薄膜太阳能电池能获得较高的转换效率，其理论转换效率高达 30% (目前其实验室最高转换效率达到 16.5%^[1]，国内研究者也获得了 13.38% 的实验室转换效率^[2])；其次，CdTe 的吸收系数在可见光范围高达 10^5 cm^{-1} ，太阳光中有 99% 的能量高于 CdTe 禁带宽度的光子可在 2 μm 厚的吸收层内被吸收，CdTe 作为吸收层的太阳能电池，理论上吸收层所需厚度在几个微米左右，材料消耗极少，因而电池成本低。与其他化合物电池 (如 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) 太阳能电池) 相比，CdTe 的制备方法容易实施，可以利用多种方法获得高质量的 CdTe 多晶薄膜。目前实验室制备 CdTe 薄膜的方法有近空间升华法、电化学沉积法、气相输运沉积法、丝网印刷法和磁控溅射法等。用这些方法制备的 CdTe 电池均获得了较高的转换效率^[3-6]。然而，作为太阳能电池材料，CdTe 也存在物理特性的缺陷：首先，CdTe 具有很强的自补偿效应，很难像硅等半导体一样通过掺入杂质元素，调控电学性能。CdTe 载流子浓度低，薄膜电阻率大，因而影响电池的电流

输出。其次，CdTe 的功函数高达 5.5 eV，与寻常背电极金属材料难以形成欧姆接触。同时，现阶段的 CdTe 薄膜太阳能电池制备和研究仍然存在许多关键的材料和器件工艺方面的问题。因此，尽管 CdTe 薄膜太阳能电池已经引起了广泛的关注和实现了规模化生产，但其实验室研制的电池和商业化电池模块的转换效率依然较低，目前商业化电池模块的转换效率最高只有 11%^[7]。这是由于 CdTe 薄膜太阳能电池还存在大量关键科学问题，需要研究者进一步探索。本文针对 CdTe 薄膜太阳能电池中的几个常见的关键问题进行讨论，并结合本实验室近年来 CdTe 薄膜太阳能电池的研究工作进展，深入分析高效率 CdTe 薄膜太阳能电池中这些问题的物理原因和解决方案。

2 CdTe 薄膜太阳能电池中的关键问题

图 1(a) 为传统 CdTe 薄膜太阳能电池横截面结构示意图。图中所示 CdTe 薄膜太阳能电池主要由 4 层薄膜构成：(1) 透明导电氧化物 (TCO) 薄膜，该层薄膜主要作为 CdTe 薄膜太阳能电池的前电极，厚度通常约为 300 nm；(2) CdS 多晶薄膜，为 CdTe 薄膜太阳能电池的窗口层，同时作为 n 型半导体与 p 型 CdTe 薄膜形成 p-n 结，该结为 CdTe 薄膜电池光生载流子电子和空穴分离的场所。CdS 厚度通常约为 100—300 nm；(3) CdTe 多晶薄膜，为 CdTe 薄膜太阳能电池的吸收层，也是 CdTe/CdS p-n 结中的 p 型部分，厚度约为

5 μm ; (4) 背接触层, 该层薄膜作为缓冲层, 可改善 CdTe 与金属正电极之间的欧姆接触, 能有效地降低接触势垒和电池串联电阻。太阳光从玻璃衬底射入 CdTe 薄膜太阳能电池, 穿过 TCO 和 CdS 层后, 在 CdTe 层被吸收, 产生光生载流子, 电子和空穴在电池内部空间电场的作用下分离, 电子流向负极, 空穴流向正

理至关重要, 因为它能有效地促进薄膜再结晶, 减少薄膜氧化, 从而提高 CdS 质量和电池性能^[12]。从 CdTe 的禁带宽度理论分析, CdTe 薄膜太阳能电池的短路电流理论上可达 $30.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ ^[13]。其中大约有 $7 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 的电流是由能量高于 CdS 禁带宽度的光子(波长小于 510 nm)贡献的。如果这部分光子

被 CdS 层吸收掉, 那么对于 CdTe 薄膜太阳能电池电流是没有任何贡献的, 必须使该部分光子穿过 CdS 层, 顺利到达 CdTe 吸收层, 才能进一步提高电池性能。因此, 降低 CdS 层厚度, 减少有效光子损失和提高电池短波长响应至关重要。但是对于 CdS 多晶薄膜, 如果厚度过于减薄, 容易产生针孔, 电池的开路电压和填充因子将会受到影响^[14]。同时, 在电池制备的热处理过程中, CdS 与 CdTe 之间的互扩散也将

导致 CdS 针孔的产生。针孔的出现导致 CdTe 与 TCO 接触, 形成电池短路和电流分流, 这对于大面积电池制备是不利的。为了避免减薄 CdS 厚度带来的这些负面影响, 在 TCO 与 CdS 之间加入一层超薄的高阻氧化物薄膜, 通常厚度控制在几十纳米左右。该层薄膜在电池中起缓冲层的作用, 由于隧穿效应的存在, 电子能几乎无阻碍地穿越该超薄层, 同时能有效地避免 CdTe 与 TCO 直接接触造成的短路现象, 从而有效提高电池性能^[13]。常用的缓冲层薄膜有本征 SnO_2 , In_2O_3 和 ZnO 等。近些年, 为了进一步提高 CdTe 薄膜太阳能电池转换效率, 科学家们开发了一个新的前电极体系: $\text{Cd}_2\text{SnO}_4/\text{Zn}_2\text{SnO}_4$ 复合层前电极^[1]。其中 Cd_2SnO_4 是低阻的前电极层, Zn_2SnO_4 则是高阻的缓冲层。与传统 FTO 和 ITO 体系相比, $\text{Cd}_2\text{SnO}_4/\text{Zn}_2\text{SnO}_4$ 复合层电阻率更低, 透光率更好, 并且易于大面积制备。

2.2 背接触层

对于 CdTe 薄膜太阳能电池而言, 背电极与 CdTe 薄膜之间欧姆接触的形成是电池获得高转换效率的

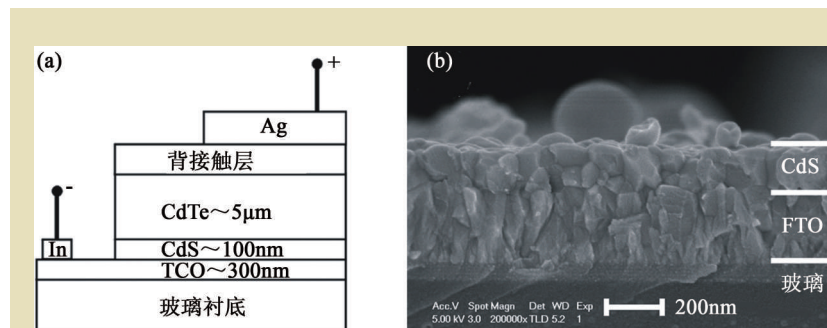


图1 (a) CdTe 薄膜太阳能电池结构示意图; (b) 高质量 CdS 薄膜的断面扫描电子显微镜 (SEM) 形貌图

极, 将电流输入外电路。这就是 CdTe 薄膜太阳能电池的工作原理。

2.1 高质量硫化镉薄膜

CdS 是一种 II—VI 族化合物 n 型宽禁带半导体, 其禁带宽度为 2.42 eV, 能允许太阳光中绝大部分光子穿过其中而不被吸收。因此, CdS 在铜铟镓硒和碲化镉薄膜太阳能电池中可作为窗口层而被广泛应用, 同时在 CdTe 薄膜电池中也作为与 CdTe 形成 p-n 结中的 n 型层薄膜。目前制备 CdS 的主要方法有: 磁控溅射^[8]、近空间升华^[9]、真空热蒸发^[10]和化学水浴沉积^[11]等。制备高质量的 CdS 薄膜是 CdTe 薄膜太阳能电池获得高转换效率的一个关键。我们研究了用化学水浴法制备高质量的 CdS 薄膜, 同时对 CdS 薄膜的热处理工艺和机制进行了研究。图 1(b) 所示为化学水浴法制备的 CdS 在 CdCl_2 热处理后的薄膜断面 SEM 形貌图。从图中可以看到, 热处理后 CdS 结晶性能优异, 薄膜均匀致密, 晶粒尺寸约为 100 nm, 适合作为 CdTe 薄膜太阳能电池的窗口层。研究表明, CdCl_2 的存在对 CdS 在空气中进行热处

关键,同时也是最困难的一个环节。由半导体物理特性得知,对于p型低掺杂浓度半导体,获得与金属电极间良好的欧姆接触是十分困难的。在通常状态下,如果金属功函数低于半导体功函数,二者接触的时候就会在接触面形成一个肖特基势垒,阻碍电子传输。二者功函数差别越大,肖特基势垒高度也就越高^[15]。由于CdTe材料的功函数高约5.5 eV,很难找到与CdTe匹配的金属背电极。图2为一非欧姆接触的CdTe薄膜太阳能电池等效电路示意图,从图中可以看到,CdTe薄膜太阳能电池主要由一个恒流源和一个p-n结构成。同时,在CdTe电池的背电极处存在一个与电池的CdTe/CdS主p-n结反向的肖特基结(图中背接触结)。该肖特基势垒的高低直接影响CdTe薄膜太阳能电池的性能^[15, 16]。尤其是在电池的电流—电压特性曲线($I-V$ 曲线)中,高电压端电池的电流将受到限制,在高于开路电压端,造成曲线扭曲,这就是文献中被称为“翻转”的现象。 $I-V$ 曲线扭曲的程度直接反映出背接触肖特基势垒的高低。

在通常情况下,CdTe薄膜太阳能电池的背接触层主要通过以下两种方式获得:一种是选择高功函数的金属作为背电极,利用高功函数金属与p型半导体接触特性,减小接触势垒,常用的高功函数金属有Au, Ni, Mo和石墨等;另一种是在CdTe薄膜表面制备一层重掺杂的p型层,该p型层半导体能与背电极金属形成一个薄的肖特基势垒,光生载流子便能通过隧穿效应穿过CdTe表面到达背电极,从而达到降低势垒高度,减少阻碍电流的目的。重掺杂p型层的获得,目前有以下几个重要步骤:(1)在CdTe薄膜表面,利用溴甲醇溶液或磷酸混合溶液等蚀刻液进行蚀刻处理,获得一个薄的富Te层表面,该富Te层本身是一个重掺杂的p型层,或者说是一个退化的p型半导体层,同时,该层中的Te还能与后续生长的金属或掺杂半导体反应,生成与CdTe接触良好的背接触缓冲层;(2)在富Te层表面,制备含Cu, Hg, Pb和Au等的金属或者半导体薄膜,通过薄膜中的这些元素与富Te层或者CdTe发生反应,生成利于CdTe欧姆接触的

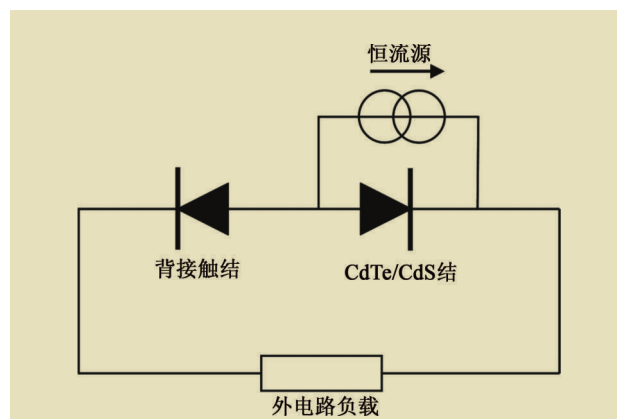


图2 非欧姆接触的CdTe薄膜太阳能电池工作原理示意图

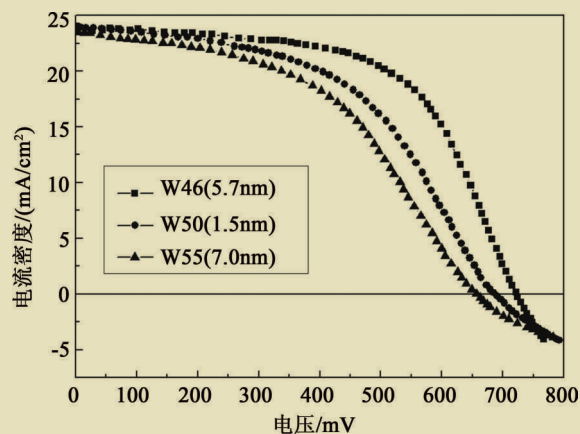


图3 背电极接触层中不同Cu厚度的CdTe薄膜电池的 $I-V$ 曲线

碲化物退化半导体;(3)利用热处理促进背接触层中的反应和扩散,提高接触特性。不是所有实验室制备CdTe薄膜电池都是利用上述步骤获得有效的欧姆接触。但是,在CdTe薄膜与背电极金属之间制备过渡层半导体,是CdTe电池获得高转换效率的一个至关重要的过程。

为获得有效欧姆接触,提高电池性能,我们研究了背接触层中不同Cu掺杂浓度对电池性能的影响。图3是3个不同Cu厚度的背接触层CdTe电池的 $I-V$ 曲线。这3个电池的背接触层是在溴甲醇中蚀刻过的CdTe薄膜表面,它是通过蒸发Cu/Au双层金属薄膜制备的。其中W46, W50和W55电池背接触层中,Cu厚度分别为5.7 nm, 1.5 nm和7.0 nm。W46显示了较高的开路电压、短路电流和填充因子。W50和W55除了各项参数均劣于W46

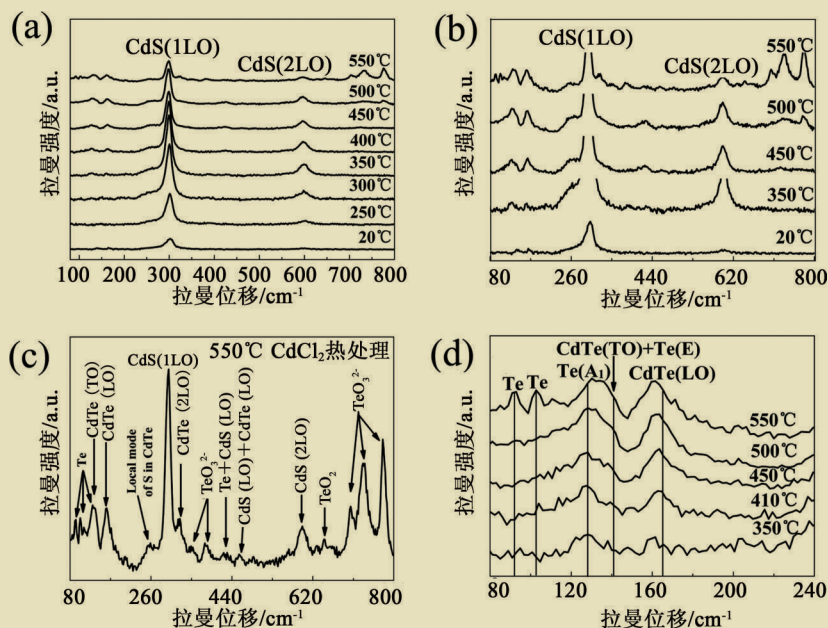
外, $I-V$ 曲线形状也与 W46 有明显差别。在开路电压端右侧, 曲线有明显的上翘弯曲, 这就是 $I-V$ 曲线的“翻转”现象。该现象的出现说明, 在该电池的后接触处存在较高的势垒, 严重影响载流子传输, 使电池电流受到强烈的抑制。图 3 显示了后接触层中 Cu 厚度对“翻转”现象的影响, 即当 Cu 厚度达到一个合适的值(5.7 nm)的时候, “翻转”现象就能有效地克服。不同厚度的 Cu 导致在 CdTe 后接触层中与富 Te 层中的 Te 形成不同的相。在 CdTe 后接触层中, 存在着 3 个主要的 Cu—Te 相: CuTe, $\text{Cu}_{1.4}\text{Te}$ 和 Cu_2Te ^[15]。在这 3 个相中, $\text{Cu}_{1.4}\text{Te}$ 占主导的相虽然导电性不是最佳, 但是它与 CdTe 薄膜的接触最有效, 因而对电池性能提高最为有利。尤其是能有效地减小“翻转”现象。从 3 个电池的性能和 Cu 含量的关系来分析, 可认为 W50 的后接触层中, CuTe 相为主要相, W55 的后接触层中, Cu_2Te 相为主要相, 而在 W46 的后接触层中, 有利于与 CdTe 接触的 $\text{Cu}_{1.4}\text{Te}$ 相为主要相。

2.3 CdS/CdTe 界面

CdTe 薄膜太阳能电池存在 3 个主要界面: TCO/CdS 界面、CdS/CdTe 界面和 CdTe/背电极界面。作

为 CdTe 薄膜太阳能电池的主 p-n 结, CdS/CdTe 界面耗尽区是 CdTe 薄膜电池光电转换的场所, 是整个电池的核心部位。了解该界面的特性对于深入了解 CdTe 薄膜电池的工作原理和制备都是至关重要的。在界面处, 六方结构的 CdS 与立方结构的 CdTe 存在着 9.7% 的晶格失配^[17]。如此高的晶格失配, 使得在 CdS/CdTe 界面处, 存在大量的界面缺陷。与这些界面缺陷相伴而生的是大量的缺陷能级, 这些缺陷能级的存在使得光生载流子在界面处传输的时候被俘获, 从而严重降低电池性能^[18]。为了减少这些缺陷能级带来的影响, 研究人员利用 CdS 和 CdTe 之间的互扩散特性, 使 CdS/CdTe 器件在热处理的过程中形成一个中间产物 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$, 该中间产物能有效地降低界面处由于晶格失配带来的大量缺陷能级, 同时该中间产物对于器件还有如下影响: (1) 可使 CdTe 表面钝化; (2) 可以作为界面缓冲层, 使得 CdTe 与 CdS 的电学界面与合金界面分离, 减少界面缺陷能级的负面影响; (3) 能有效地提高载流子传输特性和电池转换效率。为了研究中间产物 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ 的形成过程, 我们制备了一个电池反转结构, 即在常规电池结构的 CdTe 表面, 制备一层厚度约为 35 nm 的 CdS 薄膜, 然后在有 CdCl_2 存在的条件下, 对样品进行不同温

图 4 (a) 不同温度热处理的 CdTe/CdS 样品在室温下的拉曼光谱图; (b) 将(a)中峰强放大后的拉曼光谱图; (c) 550°C 热处理的样品在室温下的拉曼光谱图; (d) 波数在 80—240 cm^{-1} 范围内的拉曼光谱细节图(图中 LO 为纵向振动光学模式, TO 为横向振动光学模式)

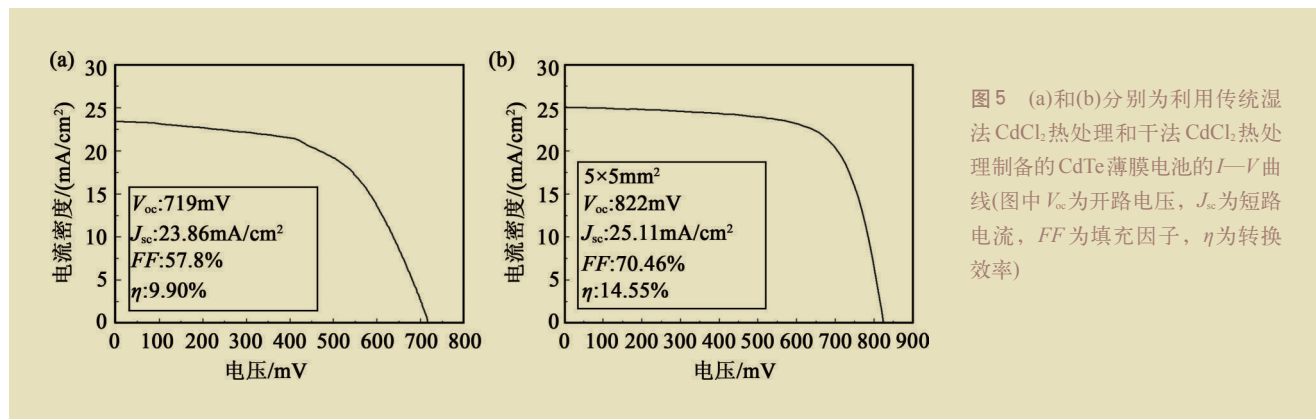


度的热处理,再利用拉曼光谱、X射线衍射(XRD)、X射线光电子能谱(XPS)和扫描电子显微镜(SEM)等探测手段对样品进行表征,研究CdS/CdTe界面的互扩散和相关的反应。图4为样品在不同温度下热处理后的拉曼光谱图。三元相 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ 具有类CdS和类CdTe的两种纵向光学声子振动模式^[19]。从图4可以看到,在低于 300°C 的温度范围内,数据显示只有CdS的1LO和2LO峰,证明在低于 300°C 的范围内,样品表面几乎没有Te存在,也就是CdTe与CdS的互扩散几乎没有发生;当温度高于 400°C 的时候,开始能明显地观察到Te和CdTe对应的峰,这说明,在高于 400°C 的温度下,CdS与CdTe开始互扩散反应;当热处理温度达到 550°C 的时候,S和Te的互扩散形成了 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$,该温度正好是本实验室利用近空间升华法制备CdTe时衬底的温度,可见在实验室制备的CdTe/CdS太阳能电池中,在CdS/CdTe界面处均存在 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ 中间产物。通过拉曼频率和XRD衍射峰位的移动,计算得到S和Te互扩散形成的 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ 化合物的 x 值高达11%^[20]。XPS和SEM等测试和分析同样得到了一致的结果^[20]。

2.4 CdTe薄膜的CdCl₂热处理

在有CdCl₂存在的条件下,对CdTe薄膜进行热处理,是提高CdTe薄膜电池转换效率的一个关键步骤,几乎所有的CdTe电池研究人员都将该步骤引入到电池制备流程中。一般认为,CdCl₂热处理具有以下几个作用:(1)能促进CdTe原子重新排

列,增大CdTe薄膜中的晶粒尺寸^[21];(2)能使晶粒界面钝化,从而减少缺陷态密度,减少载流子的复合^[22];(3)能促进CdS与CdTe之间的互扩散,有效地降低CdTe与CdS之间的晶格失配^[23, 24];(4)由于Cl离子参与Cd空位的形成,增加了CdTe薄膜的p型掺杂,从而提高了载流子浓度,减少了电池的串联电阻^[25]。通常CdCl₂热处理是指在CdTe薄膜上通过旋涂、喷雾、浸润CdCl₂甲醇或水溶液等方法沉积一层CdCl₂薄膜,然后在惰性气体、氢气或者大气环境下和 400°C 左右温度下进行热处理。也有采用CdCl₂蒸汽热处理的方法^[13],为了避免Cd的毒性,也有研究人员利用含Cl的气体(如 HCF_2Cl 等),对CdTe薄膜进行热处理^[17]。蒸汽CdCl₂能有效地避免在电池制备流程中引入液相过程,同时也不用破坏真空系统,并适用于流水线作业,从而具有较大应用前景。为了研究CdCl₂热处理过程对电池性能的影响,本文采用两种热处理工艺:(1)传统湿法热处理工艺是利用CdCl₂饱和甲醇溶液在CdTe表面沉积一层CdCl₂薄膜,然后在空气中进行热处理;(2)本实验室独立开发的干法热处理工艺。以上两种热处理工艺最大的区别是CdCl₂厚度和均匀性不同。不同厚度和均匀性的CdCl₂热处理,对电池性能影响较大。图5是分别利用两种热处理工艺制备的CdTe薄膜太阳能电池 $I-V$ 曲线。图5(a)是湿法热处理CdTe薄膜电池的 $I-V$ 曲线,图5(b)是干法CdCl₂热处理CdTe薄膜电池的 $I-V$ 曲线。从图中可以看到,干法热处理的电池各项主要参数都优于湿法热处理的相关参数,其中提高最为显著的是



电池的填充因子。在 AM1.5 标准光源(测试光源型号为: Oriol 94023A)条件下, 利用 CdCl_2 干法热处理的 CdTe 薄膜电池转换效率达到了 14.6%, 该转换效率处于国际领先水平。

3 结束语

CdTe 化合物薄膜太阳能电池作为一种具有应用前景的第二代光伏电池, 已经实现了规模化生产。然而, 针对该电池所涉及的材料和器件问题, 仍存在许多科学和技术问题需要进行深入研究。本文针

对 CdTe 薄膜太阳能电池制备中的几个关键问题进行了研究和探讨。研究了背接触层中 Cu 含量对电池性能的影响, 通过改变 Cu 的含量, 改变 Cu 与 Te 反应产生的物相成分, 发现了以 $\text{Cu}_{1.4}\text{Te}$ 为主导的背电极接触缓冲层能有效地减少电池 $I-V$ 曲线中的“翻转”现象, 降低背接触势垒; 定量研究了 CdS/CdTe 界面处的互扩散反应, 发现 S 和 Te 互扩散形成的 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ 化合物的 x 值高达 $\sim 10\%$; 对两种不同 CdCl_2 热处理工艺进行了对比研究。通过优化电池制备工艺, 获得了 AM1.5 标准测试条件下高达 14.6% 的 CdTe 电池转换效率。

参考文献

- [1] Wu X. Solar Energy, 2004, 77: 803
- [2] Feng L, Zhang J, Li B *et al.* Thin Solid Films, 2005, 491: 104
- [3] Ferekides C S, Marinskiy D, Viswanathan V *et al.* Thin Solid Films, 2000, 361: 520
- [4] Compaan A D, Gupta A, Drayton J *et al.* Physica Status Solidi B, 2004, 3: 779
- [5] Cunningham D, Rubcich M, Skinner D. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2002, 10: 159
- [6] Clemminck I, Burgelman M, Casteleyn M *et al.* International Journal of Solar Energy, 1992, 12: 67
- [7] Cunningham D, Davies K, Grammond L *et al.* Large area Apollo module performance and reliability. In: 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2000, 13
- [8] Romeo N, Bosio A, Canevari V. The role of CdS preparation method in the performance of CdTe/CdS thin film solar cell. In: Proceedings of Third World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 1: 469
- [9] Ferekids C, Ceekala V, Dugan K *et al.* Recent advances in thin film CdTe solar cells. In: Proceedings of AIP Conference, 1995, 353: 39
- [10] Romeo A, Bätzner D, Zogg H *et al.* Solar Energy Materials & Solar Cells, 2001, 67: 311
- [11] Barker J, Binns S, Johnson D *et al.* International Journal of Solar Energy, 1992, 12: 25
- [12] Wan L, Bai Z, Hou Z *et al.* Thin Solid Films, 2010, 518: 6858
- [13] Ferekides C S, Balasubramanian U, Mamazza R *et al.* Solar Energy, 2004, 77: 823
- [14] McCandless B E, Hegedus S S. Influence of CdS window layers on thin film CdS/CdTe solar cell performance. Proceedings of 22nd IEEE PVSC, 1991, 967
- [15] Zhou J, Wu X, Yan Y *et al.* Materials Research Society Symposium Proceeding, 2007, 1012: Y13-03
- [16] Niemegeers A, Burgelman M. Journal of Applied Physics, 1997, 81: 6
- [17] Bosio A, Romeo N, Mazzamuto S *et al.* Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2006, 52: 247
- [18] Albright S P, Singh V P, Jordan J F. Solar Cells, 1988, 24: 43
- [19] Fischer A, Feng Z, Bykov E *et al.* Applied Physics Letters, 1997, 70: 3239
- [20] Wang D, Hou Z, Bai Z. Journal of Materials Research, 2011, 26: 697
- [21] McCandless B E, Moulton L V, Birkmire R W. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1997, 5: 249
- [22] Paulson P, Dutta V. Thin Solid Films, 2000, 370: 299
- [23] Moutinho H, Al-Jassim D M M, Levi P *et al.* Journal of Vacuum Science and Technology, 1998, 16: 1251
- [24] Jahn U, Okamoto T, Yamada A *et al.* Journal of Applied Physics, 2001, 90: 2553
- [25] Basol B, Ou S, Stafsudd O. Journal of Applied Physics, 1985, 57: 3809