

# CdS/CdTe 叠层太阳电池的制备及其性能\*

李愿杰 唐 茜 黎 兵<sup>†</sup> 冯良桓 曾广根 蔡亚平 郑家贵  
蔡 伟 张静全 李 卫 雷 智 武莉莉

(四川大学材料科学与工程学院, 成都 610064)

**摘要:** CdS/CdTe 太阳电池是薄膜太阳电池研究工作的一个重要方向. 为了提高开路电压  $V_{oc}$ 、改善电池的光谱响应, 进而提高电池的转换效率, 在此提出 CdS/CdTe 叠层太阳电池结构. 文中, 叠层电池的顶电池由 CdS/CdTe 超薄层构成; 底电池由 CdS/CdTe 薄膜层构成. 经分析测试, 实验制备的 CdS/CdTe 叠层太阳电池具有明显的叠层结构, 开路电压最高达到了 852mV, 短路电流密度最大为 13mA/cm<sup>2</sup>, 填充因子最高为 55.2%, 这种叠层电池的效率达到了 8.16% (0.071cm<sup>2</sup>). 研究表明相对于传统的单层 CdS/CdTe 太阳电池, CdS/CdTe 叠层电池的制备对研究如何提高 CdS/CdTe 太阳电池的光伏性能有一定的参考价值.

**关键词:** 顶电池; 底电池; CdS/CdTe 叠层太阳电池

**PACC:** 7300; 8630; 6855

**中图分类号:** TN304.2<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)05-0722-04

## 1 引言

作为 II-VI 族的化合物半导体 CdTe, 是能隙为 1.46eV 的直接禁带半导体, 很接近太阳电池需要的最优化能隙, 吸收系数约为 10<sup>5</sup>cm<sup>-1</sup>, 就太阳辐射光谱中能量高于 CdTe 能隙的范围而言, 1μm 厚的 CdTe 可以有效吸收其 99%<sup>[1,2]</sup>. 目前国内的 CdS/CdTe 太阳电池的最高光电转换效率即为我们课题组创造的 13.38% (0.5cm<sup>2</sup>).

目前, 如何寻求新材料、新结构来改善太阳电池的光伏性能参数是困扰光伏工作者的最大难题之一<sup>[3,4]</sup>. 在对传统太阳电池研究的基础上, 叠层太阳电池的研究一经提出就倍受光伏界的关注. 很多叠层太阳电池结构已经提出, 并且取得了一定的成绩. 例如, 非晶硅叠层太阳电池中的 a-Si/a-Si/a-SiGe 三结叠层太阳电池<sup>[5]</sup> 和 p-n 型的 GaInP<sub>2</sub>/GaAs 叠层太阳电池<sup>[6]</sup>.

为了进一步研究提高电池效率的途径, 我们在研究 CdS/CdTe 单层太阳电池的基础上, 提出了 CdS/CdTe 叠层太阳电池的设计思路. 目的在于提高  $V_{oc}$ , 改善  $I_{sc}$ 、FF. 在本实验中, 成功制备出了 CdS/CdTe 叠层太阳电池, 并对相关性能进行了分析测试.

## 2 实验

### 2.1 样品的结构

本文中, CdS/CdTe 叠层太阳电池的结构为 CdS/CdTe/CdS/CdTe/ZnTe:Cu/Ni, 如图 1 所示.

Glass
SnO <sub>2</sub>
n-CdS (top cell)
p-CdTe (top cell)
n-CdS (bottom cell)
p-CdTe (bottom cell)
ZnTe:Cu
Ni

图 1 叠层电池结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tandem cell's structure

该叠层太阳电池的顶电池由 80nm 厚的 CdS、800nm 左右厚的 CdTe 超薄层组成; 底电池由 50nm 厚的 CdS、4000nm 左右厚的 CdTe 薄膜层组成; 之后, 沉积 ZnTe:Cu 过渡层; 最后, 蒸镀 Ni 电极.

### 2.2 CdS 薄膜的制备

CdS 薄膜是采用化学水浴 (CBD) 法制备<sup>[7]</sup>. 水

\* 国家高技术研究发展计划(批准号:2004AA513010)和国家自然科学基金(批准号:60506004)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: libing70@126.com

2006-10-17 收到, 2006-12-29 定稿

溶液由  $0.002 \sim 0.008 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{CdCl}_2$  ( $\text{CdSO}_4$ ),  $0.005 \sim 0.020 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$  以及氨水配制而成, 置于水浴中, 用电动机控制样品架缓慢旋转, 保持温度为  $80^\circ\text{C}$ , pH 值为  $8 \sim 9$ , 将清洗后的玻璃片放入反应溶液中并进行适当的搅拌, 就可在玻璃衬底上形成均匀的 CdS 薄膜, 如图 2 所示. 反应方程式为:

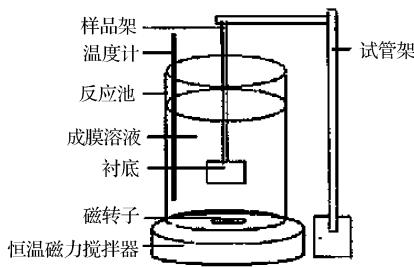
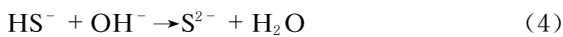
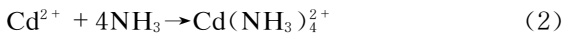
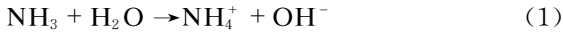


图 2 CBD 法装置示意图

Fig.2 Experimental apparatus of deposition of CdS films

其中,  $\text{Cd}^{2+}$  以络合物  $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$  的形式存在, 起到了缓释  $\text{Cd}^{2+}$  的作用;  $\text{S}^{2-}$  则由硫脲  $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$  缓释分解提供. 另外, 在反应溶液中加入缓冲剂  $(\text{NH}_4\text{Cl})$ , 使成膜溶液的 pH 值保持在  $8 \sim 9$ . 用此方法在透明导电膜 (TCO) 玻璃上制备出性能优良的 CdS 多晶薄膜.

CdS/CdTe 叠层太阳电池结构中, 顶电池和底电池均具有 CdS 薄膜层, 但考虑到光透过率, 各自的厚度不同.

### 2.3 CdTe 薄膜的制备

CdTe 薄膜采用近空间升华 (CSS) 法制备<sup>[8]</sup>, 如图 3 所示. 其反应方程式为:



衬底为已经沉积的 CdS 薄膜, 包括刚沉积的和经退火处理的两种. CdS 和 CdTe 薄膜的退火处理在  $\text{N}_2$  气氛下进行, 温度  $400^\circ\text{C}$ , 退火时间 40min. 考虑到光透过率, CdTe 薄膜在叠层结构中也具有不同的厚度.

### 2.4 背接触层 ZnTe : Cu 的制备

用自行设计的 DM2400 型共蒸发系统在 CdS/CdTe 叠层上制备 ZnTe : Cu 薄膜<sup>[9]</sup>. 由 2 个独立的蒸发源分别加热 ZnTe 粉末和 Cu 粉末, 用 2 台

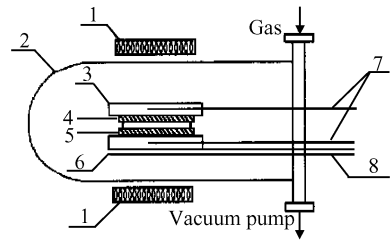


图 3 近空间升华仪器示意图 1-卤素钨灯; 2-石英管; 3-上部的石墨板; 4-底层; 5-CdTe 源; 6-下部的石墨板; 7-热电偶; 8-支撑棒

Fig.3 Schematic diagram of deposition chamber of the close spaced sublimation system

LH22 膜厚监控仪对 2 个蒸发源进行薄膜厚度和沉积速率的在线监控, 如图 4 所示. 制备程序为: 先沉积一层未掺杂的 ZnTe, 再共蒸法沉积 ZnTe : Cu (掺 Cu 比为  $3\% \sim 10\%$ ), 上述两个过程在同一个真空室内进行. 之后在氮气中  $260^\circ\text{C}$  下退火.

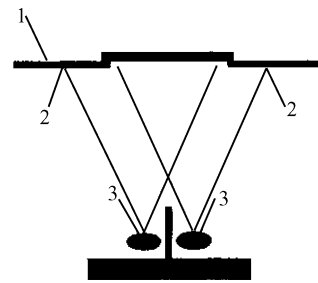


图 4 共蒸发装置示意图 1. 衬底; 2. 石英监控探头; 3. 蒸发源

Fig.4 Schematic diagram of altogether evaporation system

## 3 结果与讨论

### 3.1 SEM 测试分析

用 SEM 法对叠层电池的剖面进行形貌分析, 可以看出具有明显的叠层结构, 如图 5 所示.

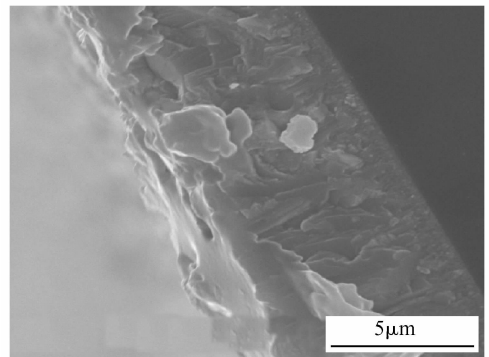


图 5 Glass/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/CdS/CdTe/ZnTe : Cu/Ni 结构的 SEM 图

Fig.5 SEM analyzed image of tandem structure

### 3.2 太阳能电池参数测试

将制备的 CdS/CdTe 叠层太阳能电池各方面参数,如开路电压、短路电流、填充因子和转换效率进行测试,结果如表 1 所示.

表 1 叠层太阳能电池参数测试结果

Table 1 Parameter test result of tandem cells

参数	$V_{oc}/\text{mV}$	$J_{sc}$ $/(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}/\text{mV}$	$\eta/\%$
测试结果	788~852	11~13	49.8~55.2	7.892~8.168

由表 1 可见,本实验中的叠层 CdS/CdTe 电池最大的开路电压为 852mV,优于同条件下 CdS/CdTe 单层电池,但短路电流密度仅为  $13\text{mA}/\text{cm}^2$ ,略小于 CdS/CdTe 单层电池.这可能是由于顶电池很薄,光生载流子少的原因.

### 3.3 I-V 测试分析

图 6 是 CdS/CdTe 叠层太阳能电池的光 I-V 特性测试结果.

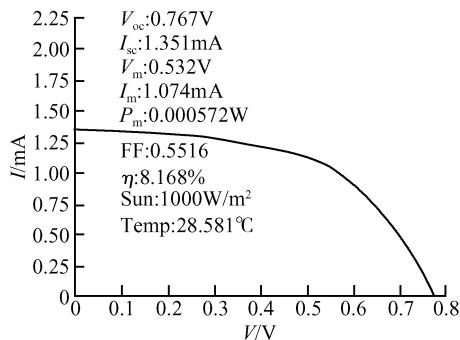


图 6 叠层 CdS/CdTe 太阳能电池的光 I-V 曲线

Fig.6 Light I-V curve of CdS/CdTe tandem solar cells

由图 6 可见,本实验中的叠层 CdS/CdTe 太阳能电池的开路电压较高,但短路电流密度显小,填充因子改善不大.这可能是两个 p-n 结串联使得电阻有所增大的原因.这些参数有助于调节 CdS/CdTe 叠层太阳能电池中各个膜层的厚度,以达到一个较好的匹配,作到既能保持顶电池的一定厚度,又能让大部分光透过顶电池,到达底电池,产生吸收.

图 7 是电池的暗 I-V 特性测试结果.

曲线没有显示出反向背结,检流特性较好,反向饱和电流是反映太阳能电池结特性的重要参数,暗饱和电流密度为  $2.7279 \times 10^{-12} \text{mA}/\text{cm}^2$ .

### 3.4 C-V 测试分析

图 8 给出了 CdS/CdTe 叠层太阳能电池的 C-V

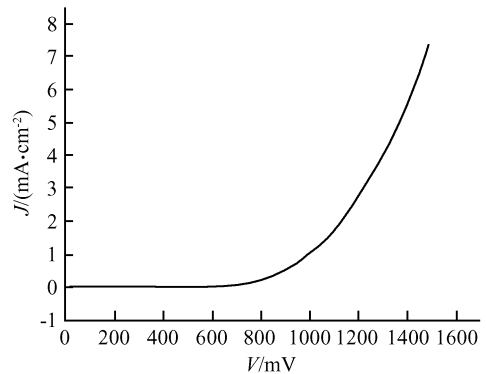


图 7 叠层 CdS/CdTe 太阳能电池的暗 I-V 曲线

Fig.7 Dark I-V curve of CdS/CdTe tandem solar cells

特性曲线.从图中可以看出结电容较小,这与图 7 的暗 I-V 测试结果一致,背接触良好.

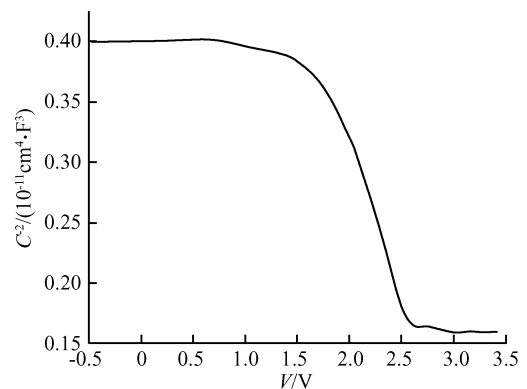


图 8 叠层 CdS/CdTe 太阳能电池的 C-V 曲线

Fig.8 C-V curve of CdS/CdTe tandem solar cells

### 3.5 光谱响应测试分析

对 CdS/CdTe 叠层太阳能电池进行光谱响应测试.其归一化处理如图 9 所示.

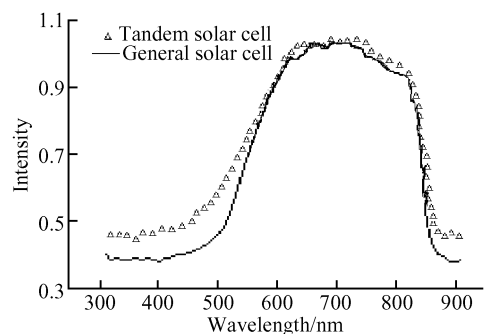


图 9 叠层 CdS/CdTe 太阳能电池光谱响应归一化图

Fig.9 Spectral response image of tandem solar cell

太阳电池的光谱响应曲线通常分为3个特征区域。由图9可见,在300~500nm波段,CdS/CdTe叠层电池( $\Delta$ 标线)的光谱响应比单层电池(实线)有明显改善,说明顶电池中减薄CdS层,确实起到了改善短波响应的效果。

## 4 结论

通过对CdS/CdTe叠层太阳电池的初步研究,得出以下结论:

(1) CdS/CdTe叠层太阳电池可以制备,从剖面形貌分析图,可以看出其具有叠层结构。

(2) 从太阳电池参数和*I-V*、*C-V*测试分析可知,CdS/CdTe叠层太阳电池的开路电压明显增加。在今后的研究中,我们拟提出对顶电池退火,或加入新的膜层来进一步提高短路电流。

(3) 从光谱响应的角度分析来看,顶电池中减薄的CdS层,确实能起到改善短波响应的效果。

**致谢** 感谢四川大学分析测试中心老师的帮助,文中图5系四川大学分析测试中心测试结果。

## 参考文献

[1] Symko-Davies M. Progress in high-performance PV: Polycrystalline thin-film tandem cells. 19th European Photovolta-

ic Solar Energy Conference, Paris, 2004; 1651

[2] Chu T L, Chu S S. Thin film II-VI photovoltaic. Solid State Electron, 1995, 38(3): 533

[3] Britt J, Ferekinds C. Thin film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. Appl Phys Lett, 1993, 62(22): 2851

[4] Aramoto T, Kumazawa S, Higuchi H, et al. 16.0% efficiency thin film CdS/CdTe solar cells. Jpn J Appl Phys, 1997, 36(10): 6304

[5] Zhou Xuemei, Xu Chongyang, Zou Xuecheng, et al. The optimum design of high efficiency a-Si tandem solar cells. Acta Energeticae Solaris Sinica, 1994, 15(4): 313 (in Chinese) [周雪梅, 徐重阳, 邹雪城, 等. 高效非晶硅叠层太阳电池的优化设计. 太阳能学报, 1994, 15(4): 313]

[6] Wanlass M W, Ward J S, Emery K A, et al. Improved large-area, two-terminal InP/Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As tandem solar cells. Proceedings of 1st WXPEC, 1994; 1717

[7] Li Bing, Feng Lianghuan, Zheng Jiagui, et al. Preparation and properties of CdS films. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8): 837 (in Chinese) [黎兵, 冯家桓, 郑家贵, 等. CdS薄膜的制备及其性能. 半导体学报, 2003, 24(8): 837]

[8] Cai Wei, Zhang Jingquan, Zheng Jiagui, et al. Study on preparation and structure of CdTe films. Semiconductor Optoelectronics, 2001, 22(2): 121 (in Chinese) [蔡伟, 张静全, 郑家贵, 等. 近空间升华法制备CdTe薄膜. 半导体光电, 2001, 22(2): 121]

[9] Feng Lianghuang, Cai Wei, Zheng Jiagui, et al. Effects of ZnTe complex back contacts on CdTe solar cells. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2001, 22(4): 403 (in Chinese) [冯良桓, 蔡伟, 郑家贵, 等. 碲化锌复合背接触层对碲化镉太阳电池性能的影响. 太阳能学报, 2001, 22(4): 403]

# Preparation and Performance of CdS/CdTe Tandem Solar Cells\*

Li Yuanjie, Tang Qian, Li Bing<sup>†</sup>, Feng Lianghuan, Zeng Guanggen, Cai Yaping, Zheng Jiagui, Cai Wei, Zhang Jingquan, Li Wei, Lei Zhi, and Wu Lili

(College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** In order to increase  $V_{oc}$  and improve the spectral response of CdS/CdTe solar cells, thus increasing their efficiency, we bring forward a new tandem structure. The top cell consists of thinner CdS/CdTe layers, and the bottom cell structure of thicker CdS/CdTe layers. The total structure is Glass/SnO<sub>2</sub>/CdS/CdTe/CdS/CdTe/ZnTe;Cu/Ni. The structural properties of the tandem solar cells have been investigated, revealing its different layers and showing that it has  $V_{oc}$  of 852mV,  $J_{sc}$  of 13mA/cm<sup>2</sup>, and FF of 55.2%. The spectral response of the cell is improved, and it is demonstrated to have an efficiency of 8.16% for 0.071cm<sup>2</sup> cells. Compared to the ordinary monolayer CdS/CdTe solar cells, the CdS/CdTe tandem solar cells have important value for investigating how to improve CdS/CdTe solar cells' photovoltaic performance.

**Key words:** top cell; bottom cell; CdS/CdTe tandem solar cell

**PACC:** 7300; 8630; 6855

**Article ID:** 0253-4177(2007)05-0722-04

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2004AA513010) and the National Natural Science Foundation of China (No. 60506004)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: libing70@126.com

Received 17 October 2006, revised manuscript received 29 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics