

碲化镉薄膜太阳能电池电学特性参数分析*

赵守仁^{1)2)†} 黄志鹏²⁾ 孙雷¹⁾²⁾ 孙朋超²⁾ 张传军¹⁾ 邬云华²⁾
曹鸿²⁾ 王善力²⁾ 褚君浩¹⁾²⁾

1) (中国科学院上海技术物理研究所, 红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

2) (上海太阳能电池研究与发展中心, 上海 201201)

(2013年5月7日收到; 2013年6月4日收到修改稿)

用 inline 方式全部近空间升华方法制备 n-CdS/p-CdTe 取得了 ~11% 的转换效率 (AM1.5). 把其中 n-CdS 层采用磁控溅射方法取得了 ~10% 的转换效率 (AM1.5). 基于其电流密度 - 电压 (J - V) 曲线和外量子效率曲线, 分析了其拟合关键参数对于电池性能的影响程度, 并从理论分析上把目前器件性能参数与当今前沿性能参数以及其理论值进行比较, 指出了如何提高电池转换效率 (η) 的方法: 提高开路电压 (V_{oc})、短路电流 (J_{sc}) 和填充因子 (FF).

关键词: 碲化镉电池, 电流密度 - 电压曲线, 外量子效率曲线, 电学特性

PACS: 88.40.hj, 88.40.jm, 85.60.Bt

DOI: 10.7498/aps.62.188801

1 引言

CdTe 由于具有较好匹配 AM1.5 光谱的带隙 (~1.5 eV) 和高的吸收系数 ($> 10^4 \text{ cm}^{-1}$), 且 CdS/CdTe 可以低成本制备, 工艺可控且重复性好, 被广泛研究与应用^[1,2]. 对于 CdS/CdTe 薄膜电池的 J - V 测试和 EQE (外量子效率) 分析是表征其性能评价的重要手段. 在其 J - V 分析中有许多数学模型^[3-6]. 光照情况下, 非理想 CdS/CdTe 薄膜电池在不考虑背接触势垒影响的情况下, 其 J - V 曲线为单指数模型的超越方程如下:

$$J = J_{ph} - J_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + JR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + JR_s}{R_{sh}}, \quad (1)$$

其中 J_{ph} 为光生电流密度, J_0 为暗电流密度; n 为品质因子; R_s 为串联电阻; R_{sh} 为并联电阻. 根据其 J - V 曲线可以拟合出填充因子 (FF)、最大工作点电压 (V_m) 和最大工作点电流密度 (J_m). 最后根据

(2) 式可以计算 CdS/CdTe 电池转换效率:

$$\eta = \frac{P_{\text{solarcell}}}{P_{\text{sun}}} = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{P_{in}}, \quad (2)$$

其中 $P_{in} = 100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ (AM1.5). 由 (2) 式可知影响 CdS/CdTe 薄膜电池转换效率 (η) 的因素主要有: 开路电压 (V_{oc})、短路电流 (J_{sc})、 FF . 目前已报道的 CdS/CdTe 薄膜电池制备的 J - V 数据中, 决定 η 的三个因素的最高指标分别为: 24—27 mA/cm^2 (J_{sc}), 840—850 mV (V_{oc}), 74%—78% (FF)^[7-10].

本文以两个 CdS/CdTe 薄膜电池的 J - V 曲线和其 EQE 曲线为例, 结合理论极限值的分析, 在不考虑背接触^[11] 影响因素的前提下, 讨论了提高光电转换效率的影响因素.

2 样品制备

样品器件结构为 glass/FTO/CdS/CdTe/Cu/Au, 上层配置 (superstrate) 结构, 入射光方向为衬底入光. 采用 TEC15 导电玻璃, FTO 厚度 ~500 nm; CdS 厚度 ~330 nm; CdTe 厚度为 4.5 μm ; Cu/Au 厚度分别为 ~3, ~200 nm. 退火条件为 400 °C/20 min, 气氛

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: KGCX2-YW-38, KGCX2-YW-384) 和上海市 2012 年度“科技创新行动计划”节能减排领域项目 (批准号: 12dz1201000) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: srzhao@mail.sitp.ac.cn

为高纯空气. CdTe 层采用近空间升华 (CSS) 方法制备, 背电极 Cu/Au 采用热蒸发方式制备. 样品 1# 和 2# 的区别在于前者采用 CSS 方法制备, 后者采用 SP 方法制备.

3 结果和讨论

采用不同方法制备 CdS 层的 CdS/CdTe 电池 J - V 性能见图 1 和表 1. 图 1 给出了样品 1# 和 2# 的 J - V 曲线. 对于 J - V 数据拟合其均方根误差 $RMSE$ ($< 0.7\%$), 平均绝对误差 MAE ($< 0.5\%$) 和平均偏差 MBE ($< 0.6\%$) 的误差值较小, 具有较好的拟合精度, 详细拟合方法见文献 [12]. 两种方法制备的电池性能参数比较接近. 其 V_{oc} 接近于 800 mV , J_{sc} 不高于 $23\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, FF 低于 70% .

表 2 给出了 CdS/CdTe 薄膜电池的 J - V 数据比较. 文献 [13] 中 1080 mV 的 V_{oc} 基于参数: p-CdTe 的空穴浓度为 $2 \times 10^{17}\text{ cm}^{-2}$, 少子寿命 (τ_e) $>$

10 ns , 当寿命大于此值时其对于 V_{oc} 的贡献减小. 本文工艺制备的器件 C - V 测试其 p-CdTe 的空穴浓度数量级在 $\sim 1 \times 10^{14}\text{ cm}^{-2}$ 附近. 表 2 中对于 V_{oc} , J_0 , FF 的理论值计算采用了文献 [14] 的数据: $N_A = 1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$, $\mu_e = 500\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $E_g = 1.5\text{ eV}$, $\tau_e = 10\text{ ns}$.

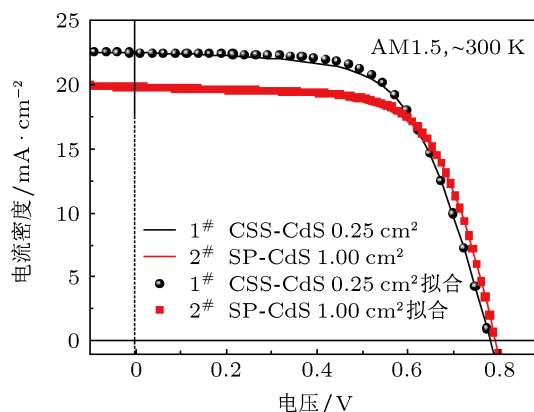


图 1 采用不同制备方法制备 CdS 层的 CdS/CdTe 薄膜太阳能电池 J - V 曲线

表 1 采用不同制备方法制备 CdS 层的 CdS/CdTe 薄膜太阳能电池 J - V 参数

	V_{oc}/mV	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$FF/\%$	$\eta/\%$	$R_s/\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$	$R_{sh}/\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$	n	$J_0/\text{nA}\cdot\text{cm}^{-2}$	Area/ cm^2
1# CSS-CdS CSS-CdTe	780.2	22.55	61.91	10.89	4.89	2.03	2.27	35.56	0.25
2# SP-CdS CSS-CdTe	794.5	19.86	65.27	10.30	3.22	1.03	2.26	23.99	1.00

表 2 CdS/CdTe 薄膜太阳能电池 J - V 参数比较

	V_{oc}/mV	$J_{sc}/\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$	$FF/\%$	$\eta/\%$	$R_s/\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$	$R_{sh}/\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^{-2}$	n	$J_0/\text{nA}\cdot\text{cm}^{-2}$
1# 2#	< 800	< 23	< 66	≤ 11	< 5	> 1	/	/
当今前沿 [7-10]	840—860	24—27	74—78	> 16	~ 1	3—5	/	/
实际极限值 [15]	900	27	80	19	/	/	/	/
理论极限值	1000—1080 [2,13,16]	28—31 [17,18]	83.3 [7]	29—31 [11,19]	0	∞	1	7.23×10^{-10} [20]
理论极限值	1143	30.3	88.89	30.8	0	∞	1	1.84×10^{-12}

3.1 提高开路电压

对于非理想 CdS/CdTe 薄膜电池的开路电压表示为

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_0} - \frac{V_{oc}}{J_0 R_{sh}} + 1 \right), \quad (3)$$

理想情况下, $1/R_{sh} = 0$; 其中, J_0 是反向饱和电流; n 是二极管品质因子, 表征结好坏的一个参数, V_{oc} 达到其理论最大值时其 $n = 1$, 此时为理想状态下电流, 以扩散电流为主. 当 $n = 2$ 时, 空间电荷区以复合电流为主 [21].

$$J_0 = \frac{kTn_i W}{2(V_{bi} - V)\tau_e}, \quad (4)$$

由 (4) 式可见, 品质因子 n 和反向饱和电流 J_0 之间是关联变量 [22], 二者数值大小与其内部少子寿命有关 [23]; W 为耗尽区宽度, V_{bi} 为内建电势, τ_e 为电子少子寿命, n_i 为本征载流子浓度. 典型的二极管品质因子范围 1.4—2.0 之间, 反向饱和电流在 0.001 — $1\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 之间. 性能好的器件 A 和 J_0 具有较低值, 当两者增大时, 器件性能会下降 (V_{oc} 减小). J_0 的影响因素主要有以下三个方面: 1) 器件结位置处的深能级缺陷产生的复合电流, 这一点可以通过控制工艺, 尽可能地减少空间电荷区的复合中心数目来减小 J_0 ; 2) 旁漏电流 (shunting), 源于 CdS 膜层的不连续而产生的孔洞 (pinhole) 具有较大的漏电

流存在, 空穴少子寿命 τ_e 从 0.08—0.32 ns 变化时, J_{sc} 升高 $1.2 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 V_{oc} 升高 0.11 V, FF 基本上不变 [24]; 3) CdTe 镀膜工艺产生的 pinhole 或者其致密性不够, 或者后续处理工艺对于 CdTe 膜层的损害而导致的背接触贯穿 CdTe 层与前电极接触而产生的漏电流, 这个体现在 R_{sh} 的急剧减小, 严重的会短路形成欧姆接触。

3.2 提高短路电流

光生电流 J_{ph} 表达式为 [25]

$$J_{ph} = q \sum_i \eta_{int}(\lambda) \frac{\Phi_i(\lambda)}{h\nu_i} \Delta\lambda, \quad (5)$$

其中 Φ_i 为光谱辐射功率密度, $h\nu_i$ 为光子能量, $\Phi_i/h\nu_i$ 入射光子流光谱密度. 计算光谱范围为 $\lambda < hc/E_g$, 当 $\eta_{int}(\lambda) = 1$ 时可计算理论最大光生电流. 由于各界面反射, 玻璃吸收, TCO 吸收, CdS 吸收等因素, 实际情况下 $\eta_{int}(\lambda) < 1$. 因此实际光生电流小于理论值.

对于实际电池 ($R_s > 0, R_{sh} \neq \infty$), 短路电流 J_{sc} 表达式为

$$J_{sc} = R_{sh} \left\{ J_{ph} - J_0 \left[\exp\left(\frac{qJ_{sc}R_s}{nkT}\right) - 1 \right] \right\} \times \frac{1}{(R_s + R_{sh})}, \quad (6)$$

由 (6) 式可知, 理想情况下 ($R_s = 0, R_{sh} = \infty$), 短路电流密度 $J_{sc} = J_{ph}$.

图 2(a) 所示为对 EQE 曲线进行标准归一化处理 (假定在 600 nm 时光子收集效率为 100%) 后, 根据 QE 曲线计算的 J_{sc} 与 $J-V$ 曲线拟合的数据误差分别为 4.0% 和 1.8%. 样品 1# 和 2# 的差别在于其短波方向, 相差约 $1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. 根据 (5) 式和标准太阳光谱 (AM1.5 Ed.2) [26] 进行计算, 理论最大光生电流为 $30.3 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 相关数据见表 3. 从图 2(b) 模拟计算可以看出, CdS 厚度对于 512 nm 以下短波响应有着重要影响. 理论上, CdS 越薄, 相应于 (5) 式的 $\eta_{int}(\lambda)$ 越大, 那么积分电流越大; 对于 512—850 nm 的影响可以忽略不计. 为了提高短波方向的 J_{sc} , CdS 的制备厚度需要尽可能地薄, 一般 $d_{CdS} < 100 \text{ nm}$ [10]. 其中文献报道目前最高 16.5% 效率 CdS 的厚度约为 50 nm [8].

CdS 的厚度对于 AM1.5 光谱短波方向 ($< 510 \text{ nm}$) 的光生电流有着重要影响. 由于较薄的

CdS 厚度而产生的 pinhole 漏电和较厚的 CdS 厚度而导致光生电流减小是一个矛盾. 解决这个问题的办法是在前电极和 CdS 层之间引入合适的 HRT (高阻层) 结构. 这层结构一般由 $i\text{-SnO}_2$ 或者 ZnSnO_4 构成. HRT 的具体作用不是很清楚, 由于其高阻和超薄, 故针对性的相关研究报道几乎没有, 一种解释是在 FTO 和 CdTe 引入可以降低晶格失配作用的机制 [27]. 当无 HRT 结构后, CdS 层需要较大的厚度. 本文样品无 HRT 情况下需要标称厚度 $\sim 330 \text{ nm}$, 但实际上由于高温下制备 CdTe 时 CdS 层的反蒸发和与 CdTe 层的互扩散而导致 CdS 的实际厚度减小.

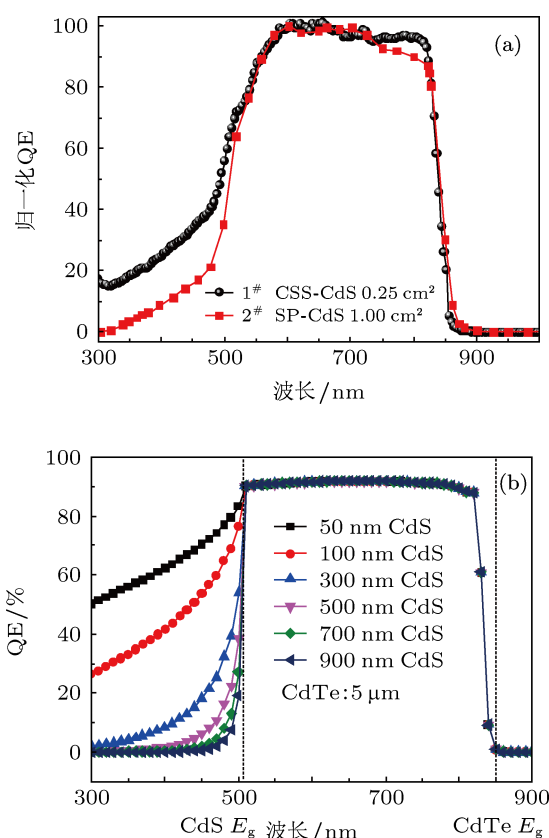


图 2 上层配置 CSS(CdS)/CdTe 太阳电池外量子效率测量曲线 (a) 测量 QE 曲线; (b) 计算 QE 曲线

表 3 EQE 短路电流密度计算

	J_{sc1} (300—512 nm)	J_{sc2} (512—850 nm)	J_{sc}	$\Delta J/(J_{sc})$
AM1.5	6.6	23.7	30.3	
1#	1.92	21.57	23.49	4.0%
2#	0.83	21.26	20.23	1.8%

3.3 提高填充因子

空间电荷区电荷复合导致反向饱和电流 J_0 变大, 这会导致填充因子 FF 的降低. 相关表达式如下:

$$FF = \left\{ -1 + \text{LambertW}[(1 + J_{\text{ph}}/J_0)e] \right\} \times \frac{[J_{\text{ph}} - J_0(\exp(qV_m/kT) - 1)]}{[\ln(1 + J_{\text{ph}}/J_0)J_{\text{ph}}]}$$

其中

$$V_m = \frac{nkT}{q} \left\{ -1 + \text{LambertW}[(1 + J_{\text{ph}}/J_0)e] \right\}, \quad (7)$$

(7) 式为理想电池 ($R_s = 0, R_{\text{sh}} = \infty$) 的 FF 关系式, 其 FF 数值大小与反向饱和电流 J_0 , 光生电流 J_{ph} 有关.

另外非理想情况下串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 对于 FF 也有影响, 表达式为 [28,29]:

$$FF_{s+\text{sh}} = FF_0(1 - R_s/R_{\text{ch}}) \times \left[1 - \frac{(v_{\text{oc}} + 0.7)FF_0(1 - R_s/R_{\text{ch}})}{v_{\text{oc}}/(R_{\text{ch}}G_{\text{sh}})} \right] \quad (8)$$

$R_s > 0, \quad R_{\text{sh}} \neq \infty,$

$$FF_0 = \frac{v_{\text{oc}} - \ln(v_{\text{oc}} + 0.72)}{v_{\text{oc}} + 1} \quad (9)$$

$R_s = 0, \quad R_{\text{sh}} \neq \infty,$

其中 $v_{\text{oc}} = qV_{\text{oc}}/nkT$, $R_{\text{ch}} = V_{\text{oc}}/J_{\text{sc}}$ 和 $G_{\text{sh}} = 1/R_{\text{sh}}$.

根据样品 1# 和 2# V_{oc} 不高于 0.8 V, 反推其少子寿命在 0.02 ns 范围. 在非自补偿前提下 CdTe 作为 n 型或者 p 型的载流子浓度极限为 10^{17} — 10^{19} cm^{-3} [30]. 由于 p-CdTe 为自补偿半导体材料, 其空穴浓度主要来源于镉空位 (V_{Cd})、铜替代位 (Cu_{Cd})、氯替代位和镉空位复合体 ($\text{Cl}_{\text{Te}}-V_{\text{Cd}}$)⁻ 等, 其净空穴浓度数量级不会超过 10^{15} cm^{-2} . 文献 [8] 的 p-CdTe 未进行掺杂处理, 其少子寿命应该在 0.2 ns 左右. 只有提高空穴浓度, 降低吸收层的厚度才有意义, 否则较低的空穴浓度会导致耗尽区宽度增大. 当 CdTe 层的空穴浓度从 $\sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 到

$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 变化时, 相应的耗尽区宽度范围为 0.16 到 $1.55 \mu\text{m}$ [24]. 因此提高 p-CdTe 的空穴浓度具有以下好处: 可以减少吸收层厚度, 一方面降低光生载流子的复合, 提高光生电流, 复合概率的减少可以提高其填充因子, 这有助于转换效率的提高; 另外一个方面可以降低背接触制备的难度, 更易制备良好的背接触.

本征未掺杂 CdTe 薄膜具有较高的电阻率 $> 10^6 \Omega\cdot\text{cm}$, 这种靠碲镉组分偏离造成的镉空位及 CdCl_2 热处理后氯、氧掺杂作用的载流子浓度一般不超过 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. 当制备的 CdTe:Sb 薄膜材料的载流子浓度达到 $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 时, 电阻率为 $580 \Omega\cdot\text{cm}$. 本征未掺杂 CdS 电阻率 $10^2 \Omega\cdot\text{cm}$ 的载流子浓度一般为 $\sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. CdS:In 薄膜电阻率 $10^{-2} \Omega\cdot\text{cm}$ 的载流子浓度一般为 $\sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 迁移率 $60 \text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ [31]. 文献 [32] 指出, 对于 CSS 方法制备 CdTe 薄膜的方块电阻与其生长时氧气分压、衬底温度、蒸发源温度及源-衬底间距有关, 其变化值在 $1.4 \times 10^4 \Omega\cdot\text{cm}$ 和 $0.4 \Omega\cdot\text{cm}$ 之间. 采用离子辅助掺杂技术 [33], 在 CdTe 薄膜制备过程中进行 p 型掺杂, 载流子浓度可达 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 因此摸索合适工艺提高 n-CdS 和 p-CdTe 载流子浓度是提高器件效率的重要因素.

4 结论

1) CdS 层的厚度对于器件的 V_{oc} 和 FF 没有影响, 影响的是其 $J_{\text{sc}} (\leq J_{\text{ph}})$, 但是 CdS 层的不连续性会影响其 J_0 和 FF ;

2) 空间电荷区由于复合中心的存在会导致 FF 和 V_{oc} 的降低, 因此通过使用合适的镀膜工艺及材料, 提高光生载流子的收集效率, 同时提高 V_{oc} ;

3) 提高 n-CdS 和 p-CdTe 层的有效载流子浓度, 一方面有助于提高其开路电压 V_{oc} , 同时降低串联电阻, 对 J_{sc} 和 FF 产生贡献.

- [1] Banai R, Blissett C, Buurma C, Colegrove E 2011 *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 37th IEEE* Seattle, WA, June 19–24, 2011 p003410
- [2] Matin M A, Amin N, Zaharim A, Sopian K 2009 *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Non-linear Analysis, Non-linear Systems and Chaos* Wisconsin, USA 2009 p338
- [3] Chegaar M, Ouennoughi Z, Guechi F, Languer H 2003 *J. Electron*

Dev. 2 p17

- [4] Kaminski A, Marchand J J, Fave A 1997 *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE* Anaheim, CA, September 29–October 3, 1997 p203
- [5] Rajkanan K, Shewchun J 1979 *Solid State Electron* 22 193
- [6] Chen Y F, Wang X M, Li D, Hong R J, Shen H 2001 *Appl. Energy* 88 2239

- [7] Ferekides C S, Morel D L 2011 Subcontract Report NREL/SR-5200-51605
- [8] Wu X Z, Dhere R G, Albin D S, Gessert T A, DeHart C, Keane J C, Duda A, Coutts T J, Asher S, Levi D H, Moutinho H R, Yan Y, Moriarty T, Johnston S, Emery K, Sheldon P 2001 *To be Presented at the NCPV Program Review Meeting* Lakewood Colorado, US, October 14–17, 2001 p14
- [9] Romeo N, Bosio A, Tedeschi R, Canevari V 1999 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **58** 209
- [10] Korevaar B A, Halverson A, Cao J, Choi J, Davila C, Huber W 2013 *Thin Solid Films* **535** 229
- [11] Zhao S R, Huang Z P, Sun L, Sun P C, Zhang C J, Wu Y H, Cao H, Wang S L, Chu J H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 168801 (in Chinese) [赵守仁, 黄志鹏, 孙雷, 孙朋超, 张传军, 邬云华, 曹鸿, 王善力, 褚君浩 2013 物理学报 **62** 168801]
- [12] Zhao S R, Huang Z P, Sun L, Sun P C, Zhang C J, Wu Y H, Cao H, Huang Z M, Wang S L, Chu J H 2013 *Journal of Infrared and Millimeter Waves* **32** 444 (in Chinese) [赵守仁, 黄志鹏, 孙雷, 孙朋超, 张传军, 邬云华, 曹鸿, 黄志明, 王善力, 褚君浩 2013 红外与毫米波学报 **32** 444]
- [13] Sites J, Pan J 2007 *Thin Solid Films* **515** 6099
- [14] Arturo M A 2006 *Solar Energy* **80** 675
- [15] Luque A, Hegedus S 2003 *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (England: John Wiley & Sons, Ltd) p617
- [16] Kosyachenko L A, Grushko E V 2010 *Fizikai Tehnika Poluprovodnikov* **44** 1422
- [17] Ferekides C S, Marinskiy D, Marinskaya S, Tetali B, Oman D, Morel D L 1996 *25th PVSC Washington, D.C., USA, May 13–17*, p751
- [18] Guo J, Kong C Y, Wang W L 2003 *Proc. SPIE* **5117** 157
- [19] Siepchen B, Drost C, Späth B, Krishnakumar V, Richter H, Harr M, Bossert S, Grimm M, Häfner K, Modes T, Zywitzki O, Morgner H 2012 *Thin Solid Films* **535** 224
- [20] Guo J, Wang W L, Liu G B, Feng L H 2003 *J. Chongqing Univ.* **26** 34 (in Chinese) [郭江, 王万录, 刘高斌, 冯良桓 2003 重庆大学学报 **26** 34]
- [21] Mitchell K W, Fahrenbruch A L, Bube R H 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 4365
- [22] Oman D M, Dugan K M, Killian J L, Ceekala V, Ferekides C S, Morel D L 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 1896
- [23] Ferekides C S, Ceekala V, Dugan K, Killian L, Oman D, Swaminathan R, Morel D 1996 *AIP Conf. Proc.* **353** 39
- [24] Alan L. Fahrenbruch A L 1999 *AIP Conf. Proc.* **462** 48
- [25] Kosyachenko L 2010 *Solar Energy* **6** 105
- [26] Reference Solar Spectral Irradiance at the Ground at Different Receiving Conditions, 9845-1, Standard of International Organization for Standardization ISO, 1992
- [27] Takamoto T, Agui T, Kurita H, Ohmori M 1997 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **49** 219
- [28] Green M A 1992 *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications* (1st Ed.) (Kensington: University of New South Wales, NSW) p96
- [29] Green M A 1981 *Solid-State Electron* **24** 788
- [30] Marfaing Y 2001 *Thin Solid Films* **387** 123
- [31] Hussain O M, Reddy P J 1991 *J. Mater. Sci. Lett.* **10** 813
- [32] Gordillo G, Florez J M, Hernandez L C 1995 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **37** 273
- [33] Fahrenbruch A L, Chien K F, Kim D, Lopez-Otero A, Sharps P, Rube R H 1989 *Solar Cells* **27** 137

Analysis of electrical property parameters of CdS/CdTe solar cells fabricated by close space-sublimation*

Zhao Shou-Ren^{1)2)†} Huang Zhi-Peng²⁾ Sun Lei¹⁾²⁾ Sun Peng-Chao²⁾

Zhang Chuan-Jun¹⁾ Wu Yun-Hua²⁾ Cao Hong²⁾

Wang Shan-Li²⁾ Chu Jun-Hao¹⁾²⁾

1) (National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

2) (Shanghai Center for Photovoltaics, Shanghai 201201 China)

(Received 7 May 2013; revised manuscript received 4 June 2013)

Abstract

CdS/CdTe Thin film solar cells are grown in a homemade close-space sublimation system where the cell fabrication of p-n junction is carried out in a continuous, in-line process. The best efficiency achieved is about 11% (AM1.5). Another cell is prepared with the same procedure except for the n-CdS layer coated by sputtering(SP), achieving an efficiency of about 10% (AM1.5). Current density-voltage and external quantum efficiency measurements are analyzed and the solar cell performances are characterized. By the comparison between the practical fitted data and theoretical calculations, the method of improving CdS/CdTe solar cell efficiency, i.e., increasing the open-circuit voltage (V_{oc}), short circuit current (J_{sc}), and fill factor (FF), is proposed.

Keywords: cdte solar cell, current density-voltage curve, external quantum efficiency curve, electrical property

PACS: 88.40.hj, 88.40.jm, 85.60.Bt

DOI: 10.7498/aps.62.188801

* Project supported by the Important Initiatives In the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (Grant Nos. KG CX2-YW-38, KG CX2-YW-384), and 2012-Shanghai, "Science and Technology Innovation Action Plan" Energy-Saving Emission Reduction Project, China (Grant No. 12dz1201000).

† Corresponding author. E-mail: srzhao@mail.sitp.ac.cn