

衬底温度对碲化镉薄膜性质及太阳能电池性能的影响

曹 胜, 武莉莉, 冯良桓, 王文武, 张静全, 郁骁骑, 李鑫鑫, 李 卫, 黎 兵

(四川大学 材料科学工程学院, 成都 610065)

摘 要: 蒸汽输运法是制备高质量且大面积均匀的 CdTe 薄膜的一种优良的方法。采用自主研发的一套蒸汽输运沉积系统制备了 CdTe 多晶薄膜, 并研究了衬底温度对 CdTe 薄膜性质及太阳能电池性能的影响。利用 XRD、SEM、UV-Vis 和 Hall 等测试手段研究了衬底温度对薄膜的结构、光学性质和电学性质的影响。结果表明, 蒸汽输运法制备的 CdTe 薄膜具有立方相结构, 且沿(111)方向高度择优。随着衬底温度的升高(520℃~640℃), CdTe 薄膜的平均晶粒尺寸从 2 μm 增大到约 6 μm, CdTe 薄膜的载流子浓度也从 $1.93 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 提高到 $2.36 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 说明提高衬底温度能够降低 CdTe 薄膜的缺陷复合, 使薄膜的 p 型更强。实验进一步研究了衬底温度对 CdTe 薄膜太阳能电池性能的影响, 结果表明适当提高衬底温度, 能够大幅度提高电池的效率、开路电压和填充因子, 但是过高的衬底温度又会降低电池的长波光谱响应, 导致电池转换效率的下降。经过参数优化, 在衬底温度为 610℃、无背接触层小面积 CdTe 薄膜太阳能电池的转换效率达到 11.2%。

关 键 词: 蒸汽输运法; CdTe 薄膜; 衬底温度; 转换效率

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

Effect of Substrate Temperature on CdTe Thin Film Property and Solar Cell Performance

CAO Sheng, WU Li-Li, FENG Liang-Huan, WANG Wen-Wu, ZHANG Jing-Quan,
YU Xiao-Qi, LI Xin-Xin, LI Wei, LI Bing

(College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Vapor transport deposition is an excellent method for preparing large area CdTe thin films with high quality and uniformity. Polycrystalline CdTe thin films were deposited by home-made vapor transport deposition system (VTD). The effects of substrate temperature on the property of CdTe film and the performance of CdTe solar cell were investigated. CdTe thin films were characterized by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), UV-Vis spectrometer, and Hall Effect system. The results show that the CdTe thin films deposited by vapor transport deposition are cubic phase with a preferred orientation in (111) direction. The average grain size increases from 2 μm to 6 μm and the carrier concentration increases from $1.93 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ to $2.36 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ when the substrate temperature increases from 520 °C to 620 °C. This suggests that high substrate temperature can increase the carrier density significantly due to the suppressed defect recombination. The performance of CdTe thin film solar cells deposited at different substrate temperatures demonstrates that high substrate temperature (610℃) can greatly improve the efficiency, open circuit voltage and fill factor of the solar cells. But the substrate temperature higher than 610℃ will reduce the spectral

收稿日期: 2015-07-06; 收到修改稿日期: 2015-08-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA050610)

National High Technology Research and Development(2015AA050610)

作者简介: 曹 胜(1990-), 男, 硕士研究生. E-mail: caosheng0819@163.com

通讯作者: 武莉莉, 教授. E-mail: wulily77@163.com

response of the cells in long wavelength region, which results in the degradation of solar cell performance. The small-area CdTe thin film solar cell without back contact layer deposited at substrate temperature of 610°C obtains the best conversion efficiency of 11.2%.

Key words: vapor transport deposition; CdTe thin film; substrate temperature; conversion efficiency

CdTe 薄膜太阳能电池具有转换效率高、稳定性高及生产成本低等优点,近年来受到科研和产业的广泛关注。CdTe 为直接带隙半导体,室温下带隙宽度为 1.45 eV,带隙值与太阳光谱匹配^[1]。CdTe 吸收系数高达 10^5 cm^{-1} ,太阳光中 99%以上波长小于 826 nm 的可见光可在 1 μm 厚的吸收层内被吸收。目前碲化镉多晶薄膜的制备方法有很多种,比如磁控溅射^[2]、近空间升华(Close-spaced sublimation, CSS)^[3]、蒸汽输运沉积(Vapor transport deposition, VTD)^[4]、电沉积^[5]和丝网印刷^[6]等。但在小面积和组件电池上取得高效率的沉积方法只有近空间升华法和蒸汽输运沉积法。2013 年,美国 GE 公司采用近空间升华法制备出转换效率高达 19.6%的 CdTe 太阳能电池^[7];2014 年,美国 First Solar 公司通过蒸汽输运沉积法制备的小面积 CdTe 太阳能电池的转化效率达到 21.0%^[8],并且其组件电池的效率达到 17.5%^[8]。近空间升华法具有设备简单和成本低廉等优点,但是存在温场不均匀和高温下衬底易变形等缺点,不利于 CdTe 太阳电池的大面积生产。蒸汽输运沉积法与近空间升华法相似,前者在高速沉积 CdTe 薄膜的同时又能够避免源和衬底温度的相互影响,从而能够在较高衬底温度下制备均匀高质量的 CdTe 薄膜。尽管蒸汽输运沉积有诸多优点,但是相比于近空间升华法 VTD 的研究和公开报道仍然很少^[9-11]。

本课题组自主研发了一套 VTD 沉积系统,前期研究结果表明:载气的温度和流量、气压、氧分压、衬底温度等对薄膜和电池的性能有着很大的影响。载气的温度越高,沉积的 CdTe 薄膜电池性能越好;在 50~1000 Pa 沉积气压范围,800 Pa 沉积的电池性能最优;氧分压借鉴了近空间升华法使用的氩氧混合气参数(氧分压为 6%)。在此基础上,本工作着重研究衬底温度对 CdTe 薄膜的各项性质及对电池器件性能的影响。

1 实验方法

实验制备的 CdTe 薄膜太阳电池结构为 Glass/ $\text{SnO}_2\text{:F(FTO)}$ /CdS/CdTe/Au。窗口层采用水浴法制备的 CdS 薄膜,厚度约为 100 nm。用我们自主研发的

VTD 沉积系统制备 CdTe 薄膜,薄膜的厚度在 4~6 μm 。图 1 为 VTD 沉积系统示意图,纯度为 99.999%的 CdTe 粉末放入石墨舟,加热后, CdTe 粉末升华分解成 Cd 蒸汽和 Te_2 蒸汽,饱和的蒸汽流在载气的携带作用下输送到衬底上,最后在温度稍低的运动衬底上反应生成 CdTe 薄膜。为了保证沉积 CdTe 薄膜的均匀性,衬底需均匀加热,运动速率控制在 3 mm/min。

实验中 CdTe 薄膜的沉积工艺参数为:源温 700°C,气压 800 Pa,载气为加热的氩氧混合气(氧分压为 6%),载气流量为 50 sccm/min,沉积时间约为 30 min。前期研究结果表明,低衬底温度制备出的 CdTe 电池性能很差,本工作的研究重点是较高的衬底温度,衬底温度的范围在 520°C~640°C。CdTe 薄膜沉积后需要进行退火处理,先用超声喷雾将一层 CdCl_2 覆盖在 CdTe 薄膜表面,然后放入管式炉在 390°C、空气气氛中处理 30 min。退火后的样品再经过 0.2%的溴+甲醇溶液腐蚀,随后用热蒸发蒸镀 100 nm 的 Au 电极。

采用美国 Ambios Technology Inc.的 Ambios Technology XP-2 探针式台阶仪测量 CdTe 薄膜

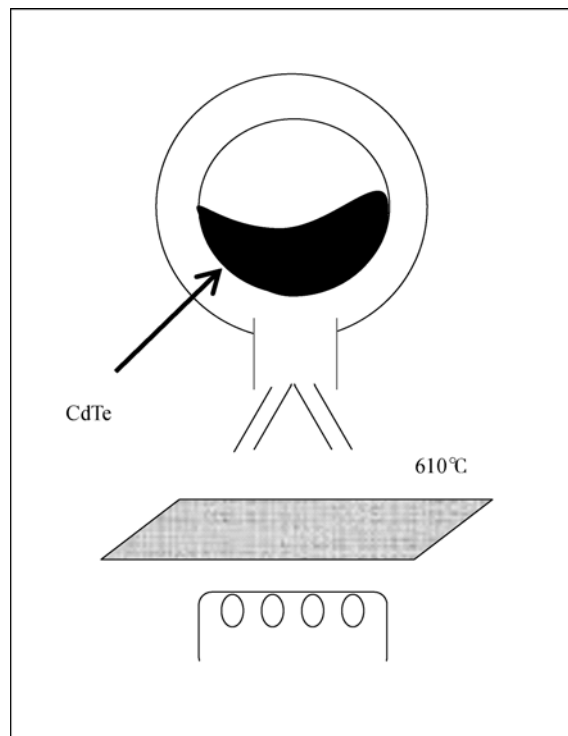


图 1 VTD 装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VTD system

厚度。采用美国 PE 公司制造的 Lambda950 型紫外/可见/近红外分光光度计测量透过谱,使用 $\phi 150$ mm 积分球为探测器,测量范围 320~2500 nm,扫描步长 1 nm。使用丹东浩元有限公司制造的 DX-2600 型 X 射线衍射仪测定薄膜结构,扫描方式为 $\theta \sim 2\theta$,扫描范围 $10^\circ \sim 70^\circ$,扫描速度 $0.03^\circ/\text{s}$,使用 Cu 靶 $K\alpha$ 线(0.154184 nm)。采用陕西众森电能科技有限公司制造的型号为 SCT3.0 的瞬态太阳光模拟光源测定电池的 $I-V$ 特性,光源需使用 NIST 可追溯的标准 GaAs 太阳能电池校准到 $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。

2 结果与分析

2.1 XRD 结构分析

图 2 为不同温度 Glass/ $\text{SnO}_2\text{:F(FTO)}/\text{CdS}$ 上沉积态 CdTe 薄膜的 XRD 图谱。从图 2 中可以看出, CdTe 薄膜均出现了 (111)、(220)、(311)、(400) 和 (331) 衍射峰,说明这些 CdTe 薄膜均具有立方闪锌矿多晶结构。多晶薄膜的择优取向程度可以用织构系数 C_i 定量表征。

$$C_i = \frac{I_i / I_{0i}}{(1/N) \sum_{i=1}^n I_i / I_{0i}} \quad (1)$$

C_i 为 i 晶向上的织构系数; I_i 为实验测定的 i 晶向衍射峰积分强度; I_{0i} 为无规取向粉末样品 i 晶向积分强度(以 JCPDS 粉末衍射标准卡片标识为准); N 为 $2\theta=10^\circ \sim 70^\circ$ 的测量范围内 CdTe 材料的衍射峰个数,对于 CdTe 材料, N 为 5。 C_i 定量表征了材料中各反射面相对于无规取向样品材料的择优取向程度。 C_i 为 1 表示没有择优取向, C_i 大于 1 表示存在择优取向。计算同一样品的所有 C_i 的标准差 σ ,用以整体比较样品的择优取向程度。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - 1)^2}{N}} \quad (2)$$

σ 为 0 表示样品完全无择优取向。根据图 2 计算了这些 CdTe 薄膜的织构系数 C_i 和标准方差 σ ,结果如

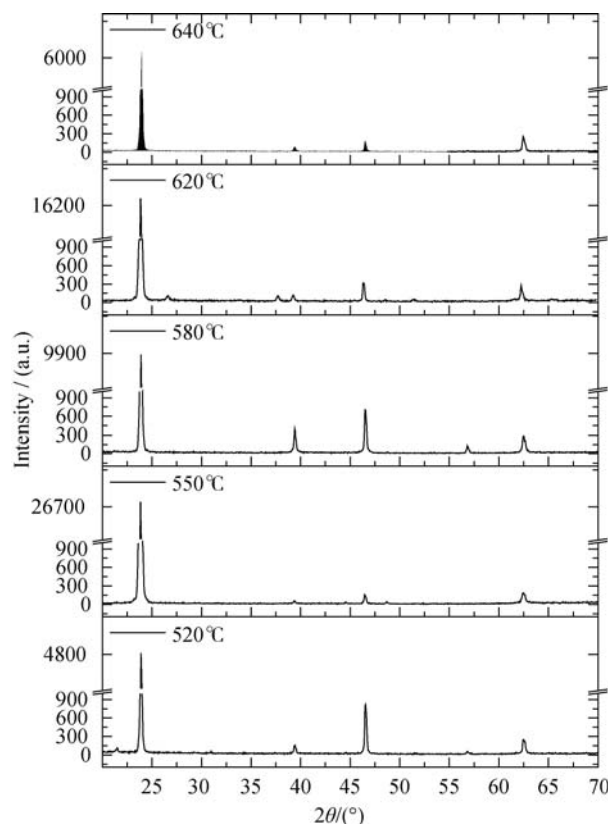


图 2 不同衬底温度下刚沉积 CdTe 薄膜的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of CdTe films deposited at different substrate temperatures

表 1 所示。从表 1 中可以看出所有的 CdTe 薄膜都沿(111)方向高度择优取向,且 550°C 和 620°C 沉积的薄膜择优取向最明显。事实上, (111)晶面的择优取向对 CdTe 薄膜电池来说是最有利的,因为立方相 CdTe 的(111)面与六方相的 CdS 的(002)面之间的晶格失配最小,最有利于异质结界面的生长。

2.2 SEM 表面形貌分析

图 3 给出在不同温度 Glass/ $\text{SnO}_2\text{:F(FTO)}/\text{CdS}$ 上制备的 CdTe 薄膜的 SEM 照片,从图中可以看出沉积的 CdTe 薄膜表面晶粒均呈块状且紧密排列。随着衬底温度的升高, CdTe 晶粒的尺寸和形状发生了显著变化。衬底温度高于 600°C,刚沉积 CdTe

表 1 不同衬底温度下刚沉积 CdTe 薄膜的织构系数 C_i 及标准方差 σ

Table 1 Texture coefficient C_i and standard deviation σ of CdTe films for different substrate temperatures

Substrate temperature/ $^\circ\text{C}$	C_i					σ
	(111)	(220)	(311)	(440)	(331)	
520	2.98	0.10	0.96	0.27	0.67	1.04
550	4.79	0.01	0.05	0.01	0.13	1.89
580	3.44	0.14	0.43	0.31	0.66	1.23
620	4.45	0.03	0.15	0.06	0.36	1.72
640	3.96	0.06	0.22	0.11	0.65	1.49

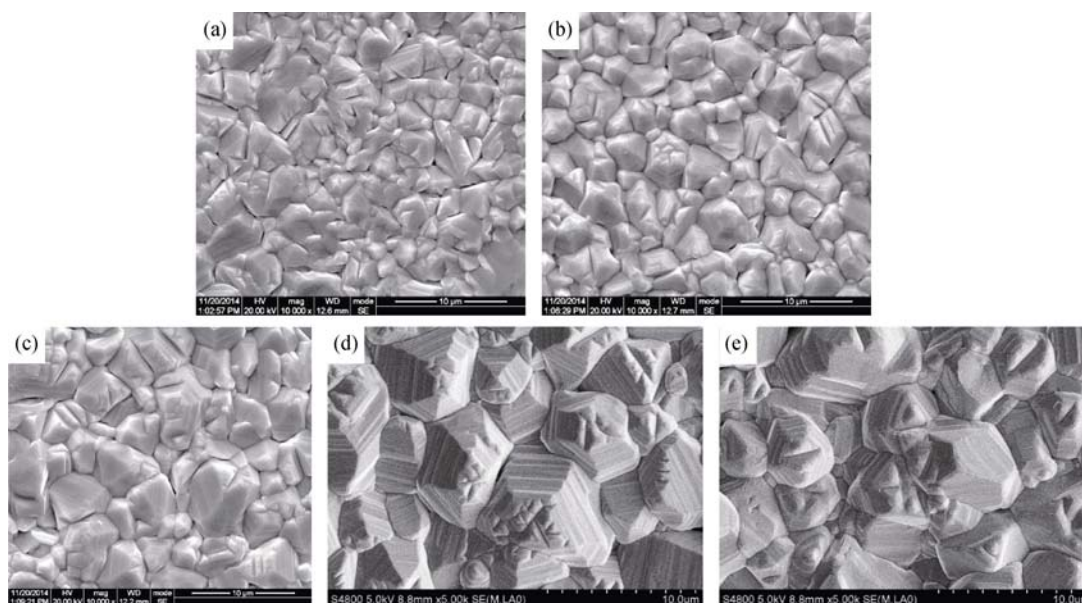


图 3 不同衬底温度下刚沉积 CdTe 薄膜的 SEM 表面照片
Fig. 3 SEM images of CdTe films deposited at different substrate temperatures
(a) 520°C; (b) 550°C; (c) 580°C; (d) 620°C; (e) 640°C

薄膜晶粒形状明显更加规则, 晶粒尺寸也更大。晶粒尺寸是影响 CdTe 薄膜质量的一个重要参数。为此, 使用了“ImageJ”软件统计分析了不同衬底温度下刚沉积 CdTe 薄膜的晶粒尺寸, 统计的结果如图 4 所示, 表明衬底温度越高, 薄膜的晶粒尺寸越大, 且在高衬底温度下, 晶粒尺寸的分布更加广泛。晶粒在一定程度的长大对电池性能是有利的, 因为晶粒较大的薄膜, 其单位体积的晶界减少, 减少了通过晶界发生的载流子复合概率, 从而有利于提高整个电池的性能^[12]。

2.3 CdTe 薄膜的光学性质和电学性质

图 5(a)给出了三个典型衬底温度下刚沉积的 CdTe 薄膜的透过谱, 从透过谱可以看出, 所有衬底

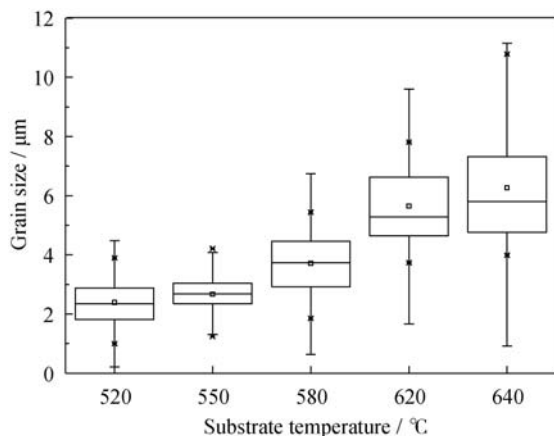


图 4 不同衬底温度下刚沉积的 CdTe 薄膜的晶粒尺寸分布图
Fig. 4 Distribution of average grain size of CdTe films deposited at different substrate temperatures

温度下的 CdTe 薄膜的吸收边一致, 都在 820nm 左右, 对应于 CdTe 的禁带宽度。CdTe 为直接带隙半导体, 根据公式(3)和透过率曲线计算这些 CdTe 薄膜的吸收系数, 进而作出 Tauc 曲线, 如图 5(b) 所示。

$$(ah\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (3)$$

其中 α 是光吸收系数, $h\nu$ 是入射光子的能量, h 是普朗克常数, A 是比例系数, E_g 是 CdTe 薄膜禁带宽度。将图 5(b)中曲线的线性部分延长与横坐标轴相交, 交点所对应的能量值即为 CdTe 薄膜的禁带宽度 E_g , 从图中可以看出随着衬底温度的升高, CdTe 薄膜的禁带宽度 E_g 略微变窄, 从约 1.506 eV 下降到 1.50 eV, 表明衬底温度对薄膜的光学性质基本没有影响。

CdTe 薄膜的电学性质对薄膜电池的性能至关重要。实验采用霍尔效应测量系统测量了不同衬底温度制备的 CdTe 薄膜的电学性质, 获得了薄膜的电阻率、载流子浓度和迁移率等参数如表 2 所示。结果表明, 所有 CdTe 薄膜样品均为 p 型半导体。衬底温度为 520°C 和 580°C 沉积的 CdTe 薄膜的电阻率为 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$, 而 620°C 沉积的 CdTe 电阻率降低了一个数量级, 约为 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。从载流子浓度看, 衬底温度越高, 载流子浓度越大, 620°C 沉积的 CdTe 薄膜的载流子浓度为 10^{13} cm^{-3} , 比 520°C 沉积的样品高了 3 个数量级, 说明衬底温度对 CdTe 薄膜的电学性质影响巨大, 从而显著影响电池的性能。CdTe 薄膜由于自身的补偿效应, 使得 p 型掺杂较为困难。提高衬底温度可以从一定程度上提高薄膜的空穴浓

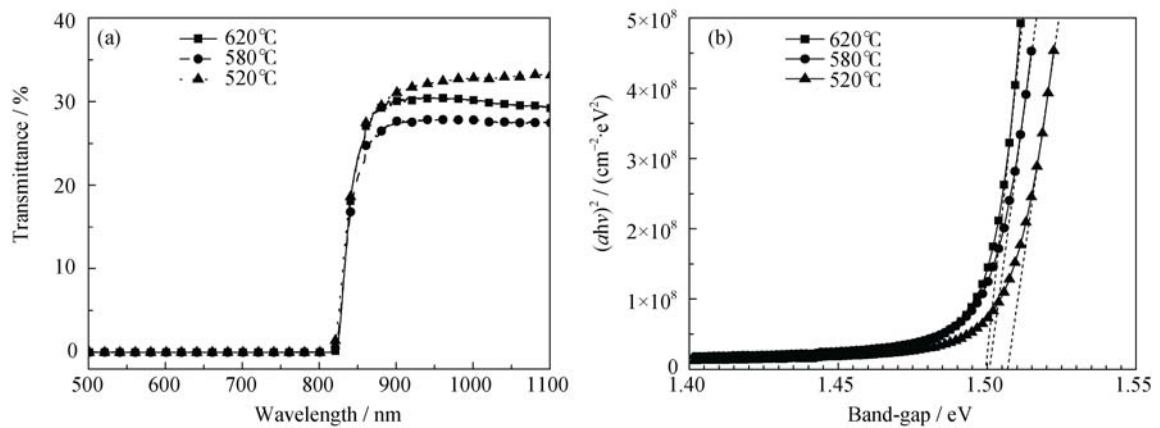


图 5 不同衬底温度下刚沉积 CdTe 薄膜的透过谱(a)和光能隙图(b)
Fig. 5 Optical transmittance spectra (a) and band-gap of CdTe films (b) deposited at different substrate temperatures

度,对于提高电池的性能有利,这与 SEM 分析结果一致,而薄膜空穴浓度的提高与晶粒尺寸的长大密切相关。520℃沉积样品的迁移率太弱,未能测出;580℃和 620℃沉积样品的迁移率均在 $1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 左右。

为了进一步了解薄膜的电子学输运性质,实验还测量了薄膜在 350~480 K 的变温霍尔效应,如图 6 所示,并从图 6 中近似直线的斜率计算出电导率激活能、迁移率激活能和载流子激活能如表 2。从表 2 可以看出,电导率激活能随着衬底温度的升高而略有下降,载流子激活能随着衬底温度的升高而明显下降,迁移率激活能与衬底温度基本无关。各样品的电导率激活能近似等于载流子激活能与迁移

率激活能的加和。载流子激活能可以近似等于薄膜的价带顶到费米能级的能量,520℃沉积样品的激活能为 0.6 eV,表明该样品的费米能级基本在禁带中部,是非常弱的 p 型半导体,这对于形成较强的内建电场是不利的。随着衬底温度的升高,载流子激活能显著下降到 0.277 eV,这表明高衬底温度更有利于生成较强的 p 型的 CdTe 薄膜。另外在多晶半导体材料中,迁移率激活能可以定性地反映晶界势垒对载流子输运的贡献,这个值越大表明晶界势垒对载流子输运的阻碍作用越显著。由表 2 可知,580℃和 620℃沉积样品的迁移率激活能几乎相同,表明了晶界势垒和缺陷对载流子输运的综合影响基本一致。

表 2 不同衬底温度条件下刚沉积 CdTe 薄膜的电学性质参数
Table 2 Electrical parameters of CdTe films deposited at different substrate temperatures

Substrate temperature	Electrical parameters (300 K)				Activation energy		
	$\rho/(\Omega\cdot\text{cm})$	$R_{\text{sh}}/(\Omega\cdot\Box^{-1})$	P/cm^{-3}	$\mu/(\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	E_{a}/eV	E_{ap}/eV	E_{au}/eV
520℃	1.76×10^6	3.84×10^9	1.93×10^{10}	—	0.576	0.608	—
580℃	2.94×10^6	6.75×10^9	1.96×10^{12}	1.171	0.554	0.369	0.178
620℃	5.84×10^5	1.34×10^9	2.36×10^{13}	0.756	0.509	0.277	0.192

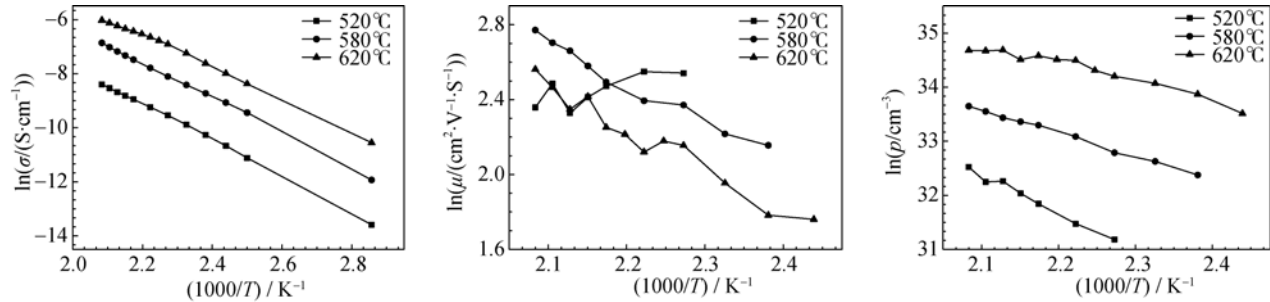


图 6 不同衬底温度条件下刚沉积 CdTe 薄膜的电子学性质与温度的关系
Fig. 6 Temperature-dependency of electronic properties of CdTe films deposited at different substrate temperatures

综合以上电子学性质分析, 衬底温度对 CdTe 薄膜的电学性质影响较大, 较高的衬底温度能够生长出空穴浓度更高的 p 型 CdTe 多晶薄膜, 从而加强与 CdS 薄膜形成的异质结内建电场, 并降低 CdTe 薄膜的体电阻, 这些都有利于提高太阳电池器件的性能。

2.4 IV 和 QE 特性分析

为了更好地研究衬底温度对薄膜及器件的影响, 将沉积态 CdTe 薄膜样品经过相同的热处理后制成太阳电池, 并测量了器件的 I - V 特性和量子效率。图 7 给出了不同衬底温度下 CdTe 薄膜电池 I - V 测试的各项参数, 可以清楚地看到填充因子(FF)和开路电压(V_{oc})随着衬底温度升高而发生显著变化, 然而短路电流密度变化很小。另外发现, 当衬底温度低于 610℃ 时, 电池的转换效率(E_{ff})、 V_{oc} 和 FF 均随着衬底温度的升高而增加, 而当衬底温度超过 610℃ 时, 该电池的各项参数又呈现下降的趋势, 表明较高的衬底温度确实能够提高电池的转换效率(从 8.9% 提高到 11.2%), 但过高的衬底温度又会对电池的性能产生不利影响。综合上述结果可以认为, 610℃ 是 CdTe 薄膜沉积最佳的衬底温度, 在该条件下得到的无背接触层 CdTe 薄膜太阳电池的转换效率为 11.2% (V_{oc} : 768 mV, J_{sc} : 23.3 mA/cm², FF : 62.4%, 0.18 cm²)。

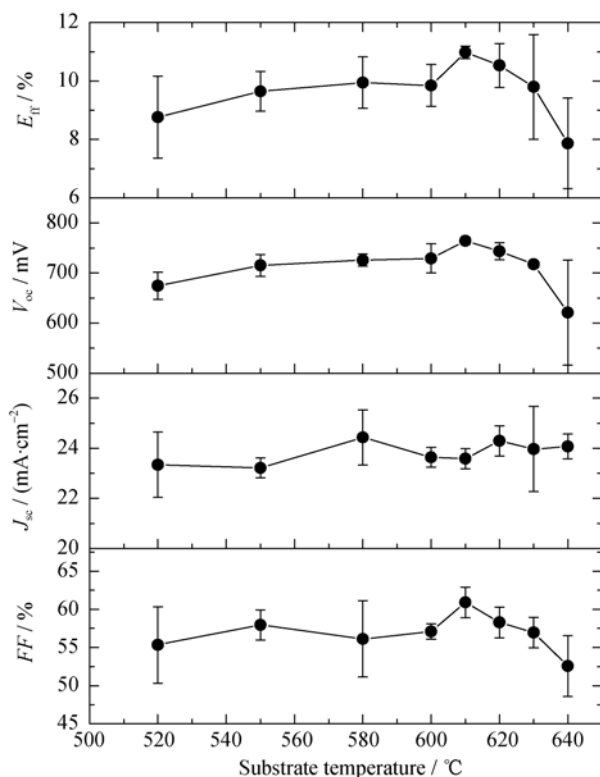


图 7 不同衬底温度下制备的 CdTe 薄膜电池性能的各项参数
Fig. 7 Performance parameters of CdTe cells as a function of substrate temperature

图 8 给出不同衬底温度下制备的 CdTe 薄膜电池的外量子效率(EQE)曲线, 可以看出, 随着衬底温度的升高, CdTe 薄膜电池的短波响应明显提高(300~500 nm), 而在长波方向光谱响应(700~820 nm)明显下降。短波响应的提高是由于衬底温度的升高, CdS 和 CdTe 层之间互扩散更加显著, 相当于减薄了 CdS 薄膜, 变薄的 CdS 窗口层可以让更多的光入射到电池内部, 从而提高了光生电流。Major 等^[13]也发现在 CdTe 高温沉积时, CdS 薄膜中大量的 S 扩散到 CdTe 中, 造成 CdS 的厚度减薄。

结合图 7 电池的 I - V 参数和图 8 的 EQE 曲线, 分析认为, 适当提高衬底温度可以促进 CdS/CdTe 中间层的互扩散, 形成 CdS_{1-y}Te_y / CdTe_{1-x}S_x 渐变层, 有效降低 CdS 和 CdTe 之间的晶格失配度, 从而减少界面层的缺陷密度, 同时减薄的 CdS 层又能提高电池的短波响应, 提高光生电流, 从而提高电池的整体性能。但是过高的衬底温度(>620℃)可能会过渡消耗 CdS 层, 在 CdTe_{1-x}S_x 层产生孔洞, 甚至局部 CdS 会消耗殆尽, 使 CdTe 和 TCO 直接接触形成弱结, 从而导致电池的开路电压和填充因子急剧下降。综合上述结果, 用实验室自制的 VTD 设备制备 CdTe 多晶薄膜, 衬底温度控制在 610℃ 比较合适。

3 结论

采用自主研发的蒸汽输运系统沉积了 CdTe 多晶薄膜, 并研究了衬底温度对薄膜性质和电池性能的影响, 得出以下结论:

1) 520℃~640℃ 衬底温度制备的 CdTe 薄膜表面颗粒均匀、致密, 且具有沿(111)方向高度择优取向

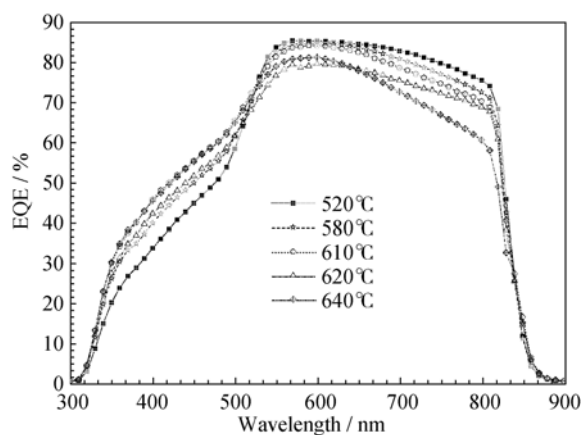


图 8 不同衬底温度下制备的 CdTe 薄膜电池的外量子效率曲线

Fig. 8 Measured EQE spectra of CdTe cells deposited at different substrate temperatures

的立方相结构。随着衬底温度的升高, CdTe 薄膜晶粒尺寸变大。

2) 随着衬底温度的升高, CdTe 薄膜的载流子浓度提高了3个数量级, p型更强。

3) 适当提高衬底温度可以促进 CdS/CdTe 中间层的互扩散, 这不仅能通过减薄的 CdS 层增加透过率, 提高短波区域光生电流, 而且能提高电池的开路电压和填充因子, 从而显著提高效率。

参考文献:

- [1] HENRY C H. Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells. *Journal of Applied Physics*, 1980, **51(8)**: 4494–4500.
- [2] GORJI N E. Electrical and optical characterization of RF-sputtered CdTe thin films. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2014, **14(4)**: 983–988.
- [3] FERKIDES C S, MARINSKIY D, VISWANATHAN V, *et al.* High efficiency CSS CdTe solar cells. *Thin Solid Films*, 2000, **(361/362)**: 520–526.
- [4] ROSE D, POWELL R, JAYAMAHA U, *et al.* R&D of CdTe-absorber Photovoltaic Cells, Modules, and Manufacturing Equipment: Plan and Progress to 100 MW/yr. IEEE, 2000: 428–431.
- [5] SHARMA R K, SINGH G, RASTOGI A C. Pulsed electrodeposition of CdTe thin films: effect of pulse parameters over structure, stoichiometry and optical absorption. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2003, **82(1/2)**: 201–215.
- [6] NAKAYAMA N, MATSUMOTO H, NAKANO A, *et al.* Screen printed thin-film CdS-CdTe solar-cell. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1980, **19(4)**: 703–712.
- [7] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, *et al.* Solar cell efficiency tables (version 42). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013, **21(5)**: 827–837.
- [8] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, *et al.* Solar cell efficiency tables (Version 45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2015, **23(1)**: 1–9.
- [9] MCCANDLESS B E, BIRKMIRE R W, BUCHANAN W A. Vapor Transport Deposition of Cadmium Telluride Films. *IEEE*, 2002: 547–550.
- [10] KESTNER J M, MCELVAIN S, KELLY S, *et al.* An experimental and modeling analysis of vapor transport deposition of cadmium telluride. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2004, **83(1)**: 55–65.
- [11] YANG K, CHA B, HEO D, *et al.* Vapor transport deposition of large-area polycrystalline CdTe for radiation image sensor application. *Physica Status Solidi (c)*, 2014, **11(7/8)**: 1341–1344.
- [12] ZHENG J, LEI Z, ZHANG J, *et al.* Spectral analysis of the effect of annealing on CdTe polycrystalline film. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30(3)**: 753–756.
- [13] MAJOR J D, BOWEN L, TREHARNE R, *et al.* Assessment of photovoltaic junction position using combined focused ion beam and electron beam-induced current analysis of close space sublimation deposited CdTe solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2014, **22(10)**: 1096–1104.