

Al₂O₃ 与 SnO₂ 对碲化镉太阳能电池前电极的界面钝化作用

郑根华,王东明,吴玲玲,王光伟,蔡彦博,王德亮

(中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心,安徽合肥 230026)

摘要: 采用磁控溅射法分别生长 Al₂O₃ 和 SnO₂, 将其作为 Mg_xZn_{1-x}O(MZO)/CdTe 薄膜太阳能电池前电极钝化层进行了相关研究. 时间分辨光致发光(TRPL)光谱的测试结果显示, MZO/Al₂O₃/CdTe 的少数寿命远大于 MZO/CdTe 的少数寿命, 表明 Al₂O₃ 对 CdTe 太阳能电池具有较好的钝化作用. 实验发现, 以 Al₂O₃ 为钝化层的电池亮态电流密度-电压曲线出现了严重的“S-kink”现象. 通过 X 射线光电子能谱(XPS)分析不同钝化层电池界面的能带匹配, 发现 Al₂O₃ 和 CdTe 界面较高的导带带阶是造成亮态电流密度-电压曲线出现“S-kink”的主要原因之一. SnO₂ 和 CdTe 界面处具有较小的导带带阶, 通过控制 SnO₂ 薄膜厚度, 可以利用量子尺寸效应调整 SnO₂ 和 CdTe 界面处的导带带阶, 减弱电流密度-电压曲线的“S-kink”现象, 提升电池填充因子和短路电流密度, 使得电池转化效率提升至 9.7%. 研究结果表明, 较大的导带带阶是导致“S-kink”产生的主要原因, 适当降低导带带阶, 能有效改善“S-kink”现象, 进而有效地提升电池转化效率.

关键词: 碲化镉; 薄膜太阳能电池; 钝化; 能带调制

中图分类号: TM914.42 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.04.009

引用格式: 郑根华,王东明,吴玲玲,等. Al₂O₃ 与 SnO₂ 对碲化镉太阳能电池前电极的界面钝化作用[J]. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(4):450-456.

ZHENG Genhua, WANG Dongming, WU Lingling, et al. Interface passivation by Al₂O₃ and SnO₂ at the CdTe solar cell front contact[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020, 50(4):450-456.

Interface passivation by Al₂O₃ and SnO₂ at the CdTe solar cell front contact

ZHENG Genhua, WANG Dongming, WU Lingling, WANG Guangwei, CAI Yanbo, WANG Deliang

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

Abstract: Al₂O₃ and SnO₂ thin layers employed as the passivation layer for Mg_xZn_{1-x}O(MZO)/CdTe thin-film solar cells were grown by RF magnetron sputtering. Time-resolved photoluminescence (TRPL) spectroscopy spectra show that the minority carrier lifetime of the MZO/Al₂O₃/CdTe structure is much longer than that of the MZO/CdTe structure, indicating that Al₂O₃ has a strong passivation effect on CdTe. However, the CdTe solar cells with Al₂O₃ as the passivation layer demonstrate serious “S-kink” in the light current density-voltage curves. The band alignment of solar cells with different passivation layer were analyzed by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The large conduction band offset between Al₂O₃ and CdTe was found to be responsible for the “S-kink” for the solar cells with Al₂O₃. By controlling

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61774140, 61474103)资助.

作者简介: 郑根华,男,1993年生,硕士. 研究方向: 半导体薄膜与器件. E-mail: zghnol@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 王德亮,博士/教授. E-mail: eedewang@ustc.edu.cn

the thickness of the SnO₂ layer, quantum size effect can be used to adjust the conduction band offset between SnO₂ and CdTe, thus reducing the “S-kink” phenomenon, improving the filling factor and short-circuit current density. A solar cell with an efficiency of 9.7% has been fabricated. This study demonstrates that large conduction band offset is the main reason for the “S-kink” in the *J-V* curves, and that reducing the conduction band offset can effectively decrease the “S-kink” phenomenon and increase the solar cell efficiency.

Key words: CdTe; thin film solar cells; passivation; band alignment

0 引言

近年来,碲化镉(CdTe)薄膜太阳能电池转化效率迅速提升,其最高转化效率已经达到 22.1%^[1]. CdTe 太阳电池转化效率的提升主要源于其短路电流密度(J_{sc})的提升^[2-4]. 而短路电流密度的提升主要是通过使用禁带宽度更高的 MZO 取代了禁带宽度较小的硫化镉(CdS)薄膜,消除了 CdS 吸收波长小于 510 nm 的可见光带来的损耗^[5]. 但是 MZO/CdTe 电池亮态电流密度-电压(*J-V*)曲线常常出现 S 形扭结(S-kink),“S-kink”的存在使得填充因子(fill factor, FF)的大幅降低,从而制约 MZO/CdTe 电池的转化效率的提升^[6-8]. 因此研究“S-kink”的产生原因和解决办法是目前的重点之一.

Kephart 等^[9]沉积了 Ta₂O₅, TiO₂, SiO₂, MgO, Al₂O₃ 和 Mg 含量较高的 MZO 这 6 种不同的氧化物作为 CdTe 的钝化层,并以此制备太阳电池,测试结果表明在 6 种氧化物中 Al₂O₃ 具有最好的钝化效果. 但是在文献[9]中以 Al₂O₃ 作为钝化层的电池转化效率没有得到提升,也并未解释电池性能变差的原因. 本研究中,我们制备了 Al₂O₃ 和 SnO₂ 作为钝化层,分析了钝化层与前电极界面的能带结构,发现 Al₂O₃ 和 CdTe 界面存在高达 2.83 eV 的导带带阶,我们认为较大导带带阶和 Al₂O₃ 薄膜较大的电阻率是引起“S-kink”的最主要原因. SnO₂ 和 CdTe 界面具有较小的导带带阶,较小的正值导带带阶使得开路电压得到提高. 根据量子尺寸效应,我们通过适当增加 SnO₂ 厚度,降低了 SnO₂ 的禁带宽度,从而减小 SnO₂ 和 CdTe 界面处的导带带阶,造成了开路电压下降. 但随着 SnO₂ 薄膜厚度增加,薄膜连续性变好,电阻率较低的 SnO₂ 薄膜对电阻率较高的 MZO 覆盖程度增加,导致电池串联电阻逐渐降低,填充因子增大,因此电池“S-kink”现象大幅减弱. 随 SnO₂ 薄膜厚度增加,电池填充因子和短路电流密度逐渐增大,电池转换效

率提升至 9.7%. 这表明较大导带带阶是造成亮态电流-电压曲线出现“S-kink”的主要原因,适当降低导带带阶能有效改善该现象,进而提升电池转化效率.

1 实验

制备的 CdTe 太阳能电池结构为 glass/SnO₂:F(FTO)/MZO/钝化层/CdTe/ZnTe:Cu/Au, 其示意图如图 1 所示. MZO 薄膜采用射频磁控溅射法在镀有 SnO₂:F 导电薄膜的玻璃衬底上沉积,溅射靶材成分为 Mg_{0.2}Zn_{0.8}O, 衬底温度为室温,薄膜厚度约为 100 nm. Al₂O₃ 和 SnO₂ 分别采用射频磁控溅射法在 MZO 薄膜上沉积,衬底温度分别为室温和 200 °C,厚度约为 1 nm. CdTe 光吸收层利用实验室自主设计的近空间升华系统沉积,厚度约为 4 μm. 样品在 400 °C 的干燥空气中,进行 30 min 的 CdCl₂ 热处理,来钝化 CdTe 薄膜晶界和激活 CdTe 薄膜电学性能. 热处理后的样品在硝酸-磷酸混合溶液中进行刻蚀,使得 CdTe 表面形成富 Te 层. 采用热蒸发方法生长 100 nm 厚的 ZnTe:Cu 薄膜作为背接触缓冲层. 最后采用热蒸发方法生长 300 nm 厚的 Au 作为电池的金属电极.

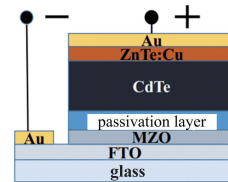


图 1 CdTe 电池结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of thin film CdTe solar cell

2 结果与讨论

2.1 Al₂O₃ 和 SnO₂ 的钝化效果

我们分别制备了以 Al₂O₃ 和 SnO₂ 为钝化层以及标准的 MZO/CdTe 太阳能电池. 图 2 显示了在标准光照条件下不同太阳能电池的 *J-V* 曲线, 电池

的性能参数和转化效率如表 1 所示. 从图 2 和表 1 可以看出, 具有 SnO_2 钝化层的电池与标准 MZO/CdTe 电池 J - V 曲线形状相近, 填充因子也大致相等, 但开路电压 V_{oc} 从 817 mV 提高到 850 mV; 而以 Al_2O_3 作为钝化层的电池串联电阻 (R_s) 最大, 达到了 $46.3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 这与 Al_2O_3 薄膜自身的高电阻 ($1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$) 有关^[10]; 高的串联电阻使得电池 J - V 曲线中“S-kink”现象更加严重, 并且导致 V_{oc} 大幅降低为 718 mV.

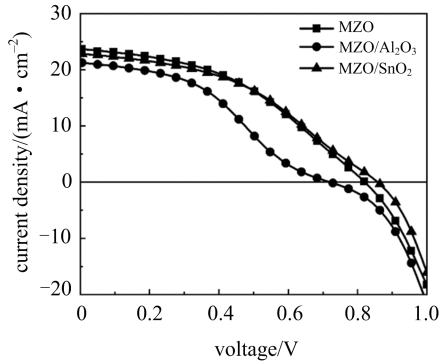


图 2 标准 MZO/CdTe 电池和具有不同钝化层电池的亮态电流密度-电压曲线

Fig. 2 J - V curves of the standard MZO/CdTe solar cell and the solar cells with different passivation layers

表 1 不同钝化层太阳能电池性能参数的比较

Tab. 1 The performance and parameters of the solar cells with different passivation layers

电池结构	开路电压 /mV	短路电流密度 /($\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$)	填充因子	转化效率	串联电阻 /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	并联电阻 /($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
MZO	817	23.6	42.3%	8.16%	16.1	206.8
MZO/ Al_2O_3	718	21.2	38.9%	5.93%	46.3	193.7
MZO/ SnO_2	850	22.8	42.1%	8.15%	18.0	207.6

标准 MZO/CdTe 电池和具有不同钝化层电池的时间分辨光致发光光谱 (time-resolved photoluminescence, TRPL) 如图 3 所示. 时间分辨光致发光光谱测试使用时间关联的单光子计数技术 (TimeHarp 260) 和皮秒脉冲源 (PicoQuant Solea), 在 540 nm 波长以 2.5 MHz 的重复频率获得. 标准 MZO/CdTe 电池具有最短的少数载流子 (少子) 寿命, 仅有 0.7 ns. SnO_2 钝化层对 CdTe 具有较弱钝化效果, 少子寿命为 0.8 ns, 不是电池开路电压提高的主要原因. Al_2O_3 钝化层钝化作用比较明显, 将少子寿命提升至 4 ns. Kephart 等^[9] 也证明了

Al_2O_3 是钝化效果较强的材料. 这是由于 Al_2O_3 中具有高浓度的固定负电荷, 能够通过场效应钝化提升 CdTe 中少子寿命^[14]. 虽然 Al_2O_3 提高了少子寿命, 但由于 Al_2O_3 本身具有较高电阻率, 会导致具有 Al_2O_3 覆盖部分电阻大幅增加, 严重阻碍了载流子的传输, 使得电池性能反而下降.

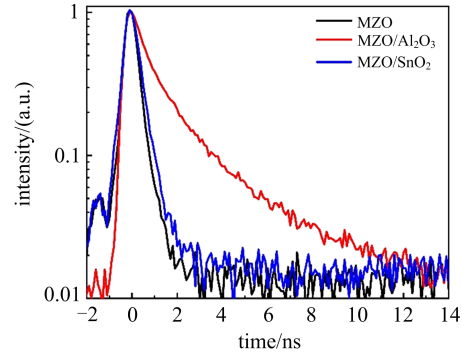


图 3 CdTe 太阳能电池的 TRPL 光谱图 (从电池的玻璃面测得)

Fig. 3 Time-resolved photoluminescence spectra of the CdTe solar cells having different passivation layer (measured from cell glass side)

2.2 钝化层对电池性能影响的分析

图 4 显示了标准 MZO/CdTe 电池和不同钝化层 CdTe 电池的外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 曲线. 标准 MZO/CdTe 电池在可见光范围内 EQE 达到了 80%. SnO_2 钝化层的引入使得其电池的 EQE 响应出现轻微下降. 以 Al_2O_3 作为钝化层的电池, 其 EQE 在波长 400~800 nm 范围内大幅下降, 并且随着波长增加下降幅度增大, 这表明 Al_2O_3 对载流子的传输起到了巨大的阻碍作用. Pudov 等^[15] 发现在标准光强下出现轻

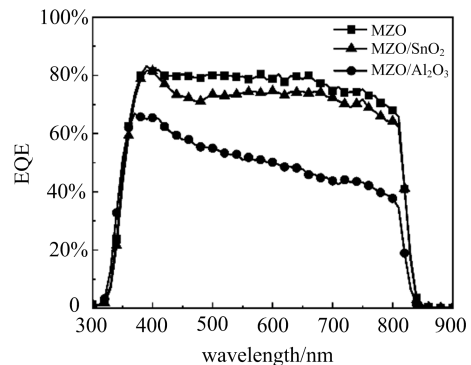
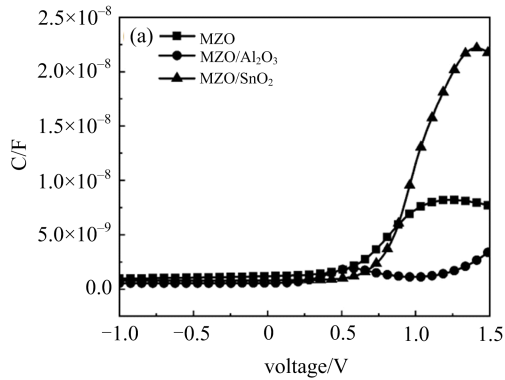


图 4 标准 MZO/CdTe 电池和不同钝化层电池的外量子效率曲线

Fig. 4 EQE curves of the standard MZO/CdTe solar cell and the solar cells with different passivation layers

微“S-kink”的电池在红色光(过滤短波蓝色光)下“S-kink”更加明显. 短波光子的光生电导可以降低电池窗口层的电阻率,使得载流子较为容易收集到外电路,得到较高的 EQE. 随着波长增加,光生电导效应逐渐减弱,使得电池窗口层电阻率增加,从而导致载流子输运受到阻碍,造成 EQE 随波长增加而逐渐下降.

电容-电压(C-V)测试在常温下进行,测试频率为 200 kHz,结果如图 5(a)所示. 引入 Al₂O₃ 钝化层的电池具有最小的电容值,而引入 SnO₂ 钝化层的电池相比标准 MZO/CdTe 电池电容值增大,这说明 Al₂O₃ 的引入破坏了标准 MZO/CdTe 电池的 p-n 结,而 SnO₂ 的引入使得电池的 p-n 结得到增



强. 如图 5(b)所示,我们通过对 $1/C^2-V$ 曲线进行线性拟合,得到了拟合直线与横轴的截距,即电池的内建电势(V_{bi}),计算公式如下^[16]:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{A^2 \epsilon q N_A} \quad (1)$$

式中, A , ϵ 和 V 分别为电池有效面积,介电常数和外加偏压. 标准 MZO/CdTe 电池的 V_{bi} 为 0.744 V,以 SnO₂ 作为钝化层电池的 V_{bi} 为 0.752 V,而以 Al₂O₃ 作为钝化层的电池的 V_{bi} 仅有 0.404 V. 这是由于 Al₂O₃ 禁带宽度高达 6.9 eV^[17],具有很高电阻率,能够阻碍载流子的输运,从而影响 p-n 结内建电场的形成,导致 V_{bi} 大幅降低.

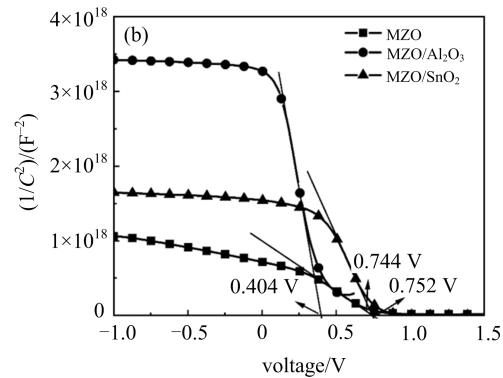


图 5 标准 MZO/CdTe 电池和不同钝化层电池的 C-V 曲线(a)和 $1/C^2-V$ 曲线(b)

Fig. 5 C-V curves for the standard MZO/CdTe solar cell and the solar cells with different passivation layers(a) and $1/C^2-V$ curves(b)

标准 MZO/CdTe 电池和不同钝化层 CdTe 电池的暗态 $J-V$ 曲线以及相应拟合曲线如图 6 所示. 总的暗态电流(J_D)拟合公式如下^[18-19]:

$$J_D = J_{01} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - J_D R_s)}{A_1 K_B T} \right] - 1 \right\} + J_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V - J_D R_s)}{A_2 K_B T} \right] - 1 \right\} + K(V - J_D R_s)^m + \frac{V - J_D R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

式中,等号右边四项分别代表主二极管电流、弱二极管电流、空间限制电荷电流和欧姆漏电电流; J_0 是二极管反向饱和电流, q 是电子电荷, R_s 为串联电阻, R_{sh} 为并联电阻, A 为理想因子, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度, K 与薄膜厚度、捕获态(trap state)分布和漏电路径的导电性有关, m 与传输路径中态密度有关. 从图 6(a)中可以看出,以 SnO₂ 为钝化层的电池反向饱和电流最低,而以 Al₂O₃ 为钝化层的电池反向饱和电流最大. SnO₂ 钝化层电池反向饱和电流较低,使得电池开路电压得到提高,

是电池开路电压提高 33 mV 的主要原因. 反向饱和电流的增加一定程度上造成了开路电压的下降. 图 6(b)~(d)为利用式(2)分别对不同钝化层电池暗态 $J-V$ 曲线进行的拟合,经对比可以看出,相比于标准 MZO/CdTe 电池,以 Al₂O₃ 为钝化层电池的反向饱和电流的增加主要由弱二极管电流的增加引起,表明了 Al₂O₃ 的引入导致了弱结的产生.

2.3 钝化层与 CdTe 界面的能带结构

如图 7 所示,通过 X 射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)定量分析得到了 Al₂O₃/CdTe 和 SnO₂/CdTe 界面的能带图. 具体实验细节在文献[20-21]中有详细的描述. Al₂O₃ 和 CdTe 禁带宽度分别为 6.9 eV 和 1.5 eV. 如图 7(a)所示,利用 XPS 测得芯能级的相对位置,通过计算得到 Al₂O₃ 与 CdTe 的导带带阶($\Delta E_C^{Al_2O_3/CdTe}$) 为 2.83 eV. 高达 2.83 eV 的导带带阶将会阻碍光生载流子的输运,从而造成 $J-V$ 曲线中出现“S-kink”. 根据量子尺寸效应,薄膜的禁带宽度会随着薄膜厚度减小而逐渐增加. 当 SnO₂ 薄膜厚度减小

到 1 nm 左右时,禁带宽度将从 3.6 eV 上升至约 4.1 eV^[22]. 如图 7(b)所示,利用 XPS 测得芯能级的相对位置,通过计算得到 SnO₂ 与 CdTe 的导带带阶 ($\Delta E_C^{\text{SnO}_2/\text{CdTe}}$) 为 0.21 eV. 当导带带阶为正值时,会抑制界面载流子的复合,使得开路电压升高;反之当

导带带阶为负值时,会促进界面载流子的复合,导致开路电压降低^[23]. SnO₂ 与 CdTe 界面具有 0.21 eV 的导带带阶,对电子输运影响较小,同时抑制了界面载流子的复合,使得电池反向饱和电流减小,这是电池开路电压得到提高的根本因素.

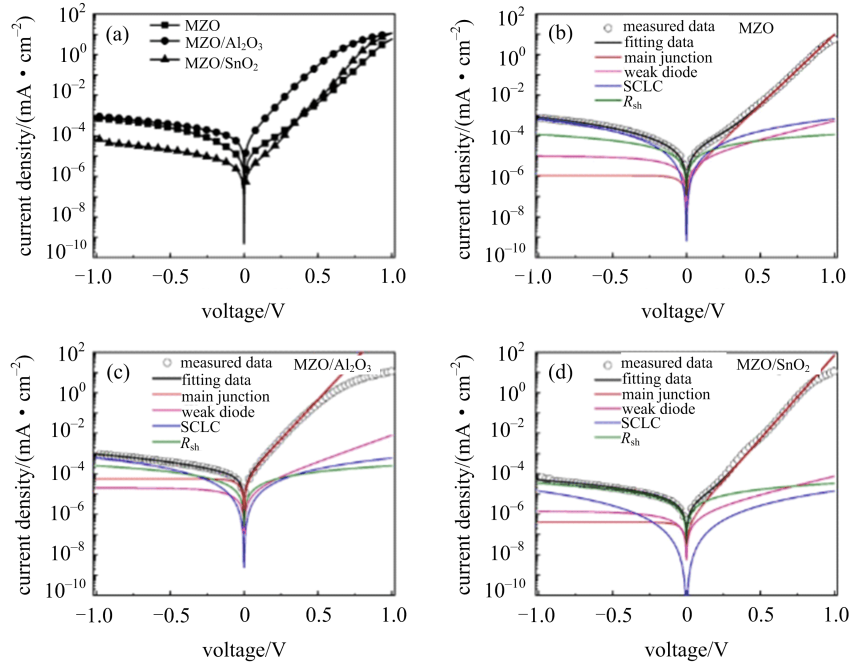


图 6 (a)标准 MZO/CdTe 电池和不同钝化层电池的暗态 J - V 曲线; 电池不同漏电通道的拟合曲线: (b)MZO/CdTe; (c)MZO/Al₂O₃/CdTe; (d)MZO/SnO₂/CdTe

Fig. 6 (a)The dark J - V curves of the standard MZO/CdTe solar cell and the solar cells with different passivation layers; Fitting curves from contributions of the different shunting paths for solar cells: (b)MZO/CdTe; (c)MZO/Al₂O₃/CdTe; (d)MZO/SnO₂/CdTe

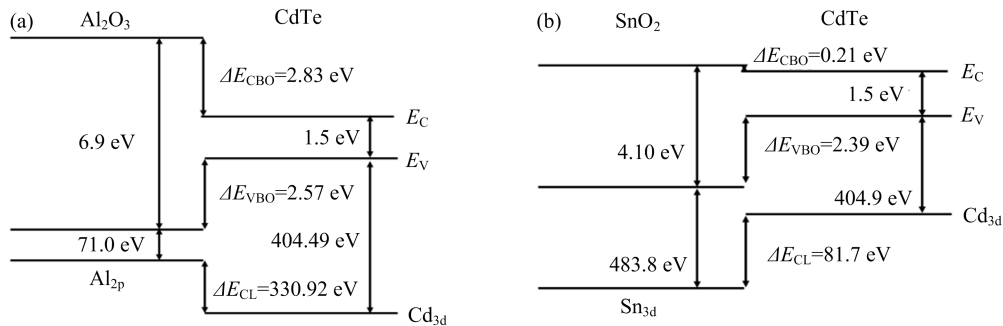


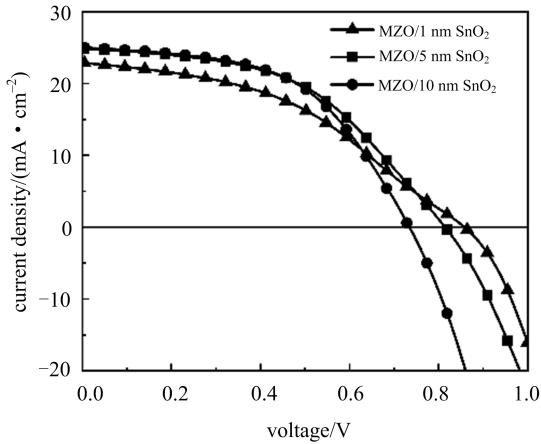
图 7 基于 XPS 数据得到的前电极界面的能带结构 (a)Al₂O₃/CdTe; (b)SnO₂/CdTe

Fig. 7 Band alignment at (a)Al₂O₃/CdTe and (b)SnO₂/CdTe contact interface obtained based on the XPS data

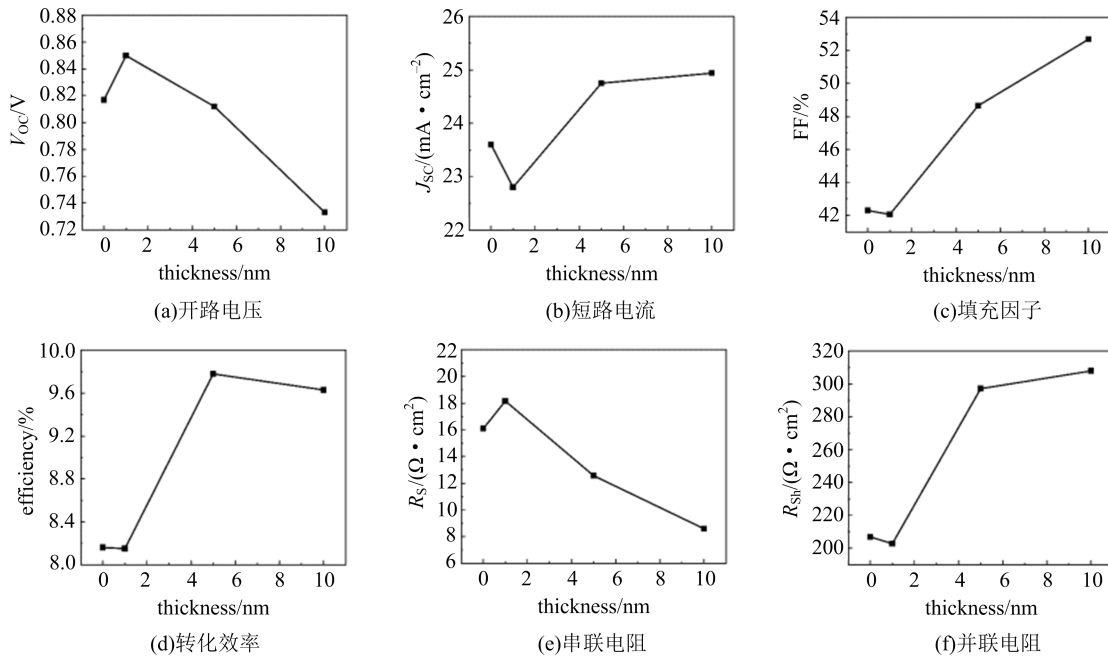
2.4 SnO₂ 厚度对电池性能的影响

我们制备了不同厚度 SnO₂ 钝化层的 MZO/SnO₂/CdTe 太阳能电池. 由于量子尺寸效应,随着 SnO₂ 钝化层厚度的增加,SnO₂ 禁带宽度将逐渐减小最后趋近 3.6 eV,这会导致 SnO₂ 和 CdTe 界面导带带阶从 0.21 eV 逐渐下降至 -0.3 eV. 如图 8 所示,随着 SnO₂ 厚度增加,电池 J - V 曲线中“S-

kink”逐渐消失. 电池性能参数和转化效率随 SnO₂ 厚度的改变如图 9 所示. 如图 9(a)所示,电池开路电压随 SnO₂ 厚度的增加而下降,表明了界面处导带带阶减小,对界面载流子复合的抑制减弱,使得电池开路电压随着导带带阶的减小而逐渐降低. 从图 9(b)、(c)和 (f)中可以看出,电池短路电流密度、填充因子和并联电阻随着 SnO₂ 厚度的增加都明显得

图 8 不同 SnO₂ 厚度太阳能电池的 J - V 曲线Fig. 8 J - V curves of the CdTe solar cells with different SnO₂ layer thickness

到改善. 从图 9(c)和图 9(e)中可以明显看出填充因子和串联电阻呈负相关关系. 通过霍尔测试,我们发现 MZO 薄膜因电阻率过大无法通过霍尔测试得到其载流子浓度,其薄膜电阻率为 $1.8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$. SnO₂ 薄膜载流子浓度较高达到 $5.12 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,薄膜电阻率也较低仅 $10.89 \Omega \cdot \text{cm}$. 随着 SnO₂ 厚度的增加,薄膜连续性逐渐变好,覆盖程度增大,电池串联电阻迅速下降,串联电阻的下降使得电池填充因子得到改善,由 42% 提升至 52%,“S-kink”现象减弱. 与此同时,电池的短路电流密度和填充因子得到改善,电池转化效率呈现出提高趋势,如图 9(d)所示,在 SnO₂ 厚度为 5 nm 时,电池转化效率从 8.2% 提升至 9.7%. 然而电池开路电压的下降,制约了电池转化效率的提升,当 SnO₂ 厚度超过 5 nm 后,电池转化效率逐渐呈下降趋势.

图 9 CdTe 太阳能电池参数随 SnO₂ 厚度的变化情况Fig. 9 The performance and parameters of the CdTe solar cells with different SnO₂ layer thickness

3 结论

本文将 Al₂O₃ 和 SnO₂ 薄膜作为 CdTe 太阳能电池前电极钝化层,制备了标准 MZO/CdTe 太阳能电池和具有不同钝化层的太阳能电池. 通过 TRPL 测试表明 Al₂O₃ 具有较强的钝化作用,但是 Al₂O₃ 钝化层反而造成了电池性能的下陷,其电池 J - V 曲线出现严重的“S-kink”. 通过 XPS 测试表明 Al₂O₃ 和 CdTe 界面存在 2.83 eV 的导带带阶,较大的导带带阶阻碍光生载流子的传输,是导致“S-kink”最主要的原因. 通过制备不同厚度 SnO₂ 钝化

层太阳能电池,我们发现随着 SnO₂ 厚度增加,SnO₂ 薄膜与 CdTe 界面的导带带阶逐渐减小,电池开路电压逐渐降低,但填充因子不断增加, J - V 曲线中的“S-kink”逐渐消失. SnO₂ 薄膜厚度为 5 nm 时,电池转化效率从 8.2% 提升至 9.7%. 本文证明了导带带阶过大是导致“S-kink”产生的重要原因之一,适当减小导带带阶可以有效改善电池 J - V 曲线的“S-kink”. 在选取合适 SnO₂ 厚度的基础上,后续研究还可以通过无氧生长 CdTe 薄膜,进一步优化导带带阶和减小界面复合速率,从而使得电池性能得到进一步提升.

参考文献(References)

- [1] GREEN M A, HISHIKAWA Y, DUNLOP E D, et al. Solar cell efficiency tables (version 52) [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2018, 26(7): 427-436.
- [2] MUNSHI A H, KEPHART J, ABBAS A, et al. Polycrystalline CdSeTe/CdTe absorber cells with 28 mA/cm² short-circuit current [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2017, 8(1): 310-314.
- [3] METZGER W K, GROVER S, LU D, et al. Exceeding 20% efficiency with in situ group V doping in polycrystalline CdTe solar cells[J]. *Nature Energy*, 2019, 4(10): 837-845.
- [4] ZHENG X, KUCIAUSKAS D, MOSELEY J, et al. Recombination and bandgap engineering in CdSeTe/CdTe solar cells [J]. *APL Materials*, 2019, 7(7): 071112.
- [5] KEPHART J M, MCCAMY J W, MA Z, et al. Band alignment of front contact layers for high-efficiency CdTe solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 157: 266-275.
- [6] ABLEKIM T, PERKINS C, ZHENG X, et al. Tailoring MgZnO/CdSeTe interfaces for photovoltaics [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2019, 9(3): 888-892.
- [7] DELAHOY A E, PENG S, PATRA P, et al. Cadmium tin oxide and zinc magnesium oxide prepared by hollow cathode sputtering for CdTe photovoltaics [J]. *MRS Advances*, 2017, 2(53): 3203-3214.
- [8] LI D B, SONG Z, AWNI R A, et al. Eliminating S-kink to maximize the performance of MgZnO/CdTe solar cells[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2019, 2(4): 2896-2903.
- [9] KEPHART J M, KINDVALL A, WILLIAMS D, et al. Sputter-deposited oxides for interface passivation of CdTe photovoltaics [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2018, 8(2): 587-593.
- [10] NOWICKI R S. Properties of rf-sputtered Al₂O₃ films deposited by planar magnetron[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1977, 14(1): 127-133.
- [11] CHOW S. Engineering the fixed charge of aluminum oxide for field-assisted passivation in heterojunction solar cells [C]// 2015 NNIN REU Research Accomplishments. Ithaca, NY: National Nanotechnology Infrastructure Network, 2015: 168-169.
- [12] BANSAL A, SRIVASTAVA P, SINGH B R. On the surface passivation of c-silicon by RF sputtered Al₂O₃ for solar cell application [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2015, 26(2): 639-645.
- [13] BAKBAK B, GEDIK S, KOKTEKIR B E, et al. Structural and functional assessment in patients treated with systemic isotretinoin using optical coherence tomography and frequency-doubling technology perimetry [J]. *Neuroophthalmology*, 2013, 37(3): 100-103.
- [14] SIMON D K, JORDAN P M, MIKOLAJICK T, et al. On the control of the fixed charge densities in Al₂O₃-based silicon surface passivation schemes [J]. *ACS applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(51): 28215-28222.
- [15] PUDOV A O, SITES J R, CONTRERAS M A, et al. CIGS J-V distortion in the absence of blue photons[J]. *Thin Solid Films*, 2005, 480: 273-278.
- [16] WANG T, REN S, LI C, et al. Exploring window buffer layer technology to enhance CdTe solar cell performance[J]. *Solar Energy*, 2018, 164: 180-186.
- [17] LI X, SHEN K, LI Q, et al. Roll-over behavior in current-voltage curve introduced by an energy barrier at the front contact in thin film CdTe solar cell[J]. *Solar Energy*, 2018, 165: 27-34.
- [18] SHEN K, LI Q, WANG D, et al. CdTe solar cell performance under low-intensity light irradiance [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 144: 472-480.
- [19] WANG M, LI X, WANG D. Ultrathin CdTe solar cells with absorber layer thinner than 0.2 microns[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2018, 83(2): 20101.
- [20] XIAO D, LI X, WANG D, et al. CdTe thin film solar cell with NiO as a back contact buffer layer[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 169: 61-67.
- [21] SHEN K, YANG R, WANG D, et al. Stable CdTe solar cell with V₂O₅ as a back contact buffer layer[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 144: 500-508.
- [22] XU X, ZHUANG J, WANG X. SnO₂ quantum dots and quantum wires: controllable synthesis, self-assembled 2D architectures, and gas-sensing properties [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(37): 12527-12535.
- [23] SONG T, KANEVCE A, SITES J R. Emitter/absorber interface of CdTe solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 119(23): 233104.