



一种具有减反射性能的 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 太阳能电池透明导电氧化物薄膜

敬婧 李致朋 卢伟胜 王宏宇 杨祖安 杨毅 尹祺圣 杨馥菱 沈晓明 曾建民 詹锋

Transparent conductive oxide film with antireflective properties for $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ solar cells

Jing Jing Li Zhi-Peng Lu Wei-Sheng Wang Hong-Yu Yang Zu-An Yang Yi Yin Qi-Sheng Yang Fu-Ling Shen Xiao-Ming Zeng Jian-Min Zhan Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 237801 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200897

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200897>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

H, Cl和F原子钝化 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4(112)$ 表面态的第一性原理计算

First-principles study of H, Cl and F passivation for $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4(112)$ surface states

物理学报. 2018, 67(16): 166401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180626>

$\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ 氧化物异质结太阳电池的研究进展

Progress of $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ oxide heterojunction solar cells

物理学报. 2018, 67(11): 118401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172037>

一种新的基于频域有限差分方法的小周期有机太阳能电池的光电特性

Optical and electrical properties of short-pitch solar cells with finite-difference frequency-domain method

物理学报. 2018, 67(17): 178102 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180821>

单靶溅射制备铜锌锡硫薄膜及原位退火研究

Fabrication of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ thin films by sputtering quaternary compound target and the research of in-situ annealing

物理学报. 2017, 66(22): 226801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.226801>

基于聚多巴胺/氧化锌复合阴极缓冲层的倒置聚合物太阳能电池的研究

Mechanism of inverted polymer solar cells based on poly(dopamine)/ ZnO as composite cathode buffer layer

物理学报. 2017, 66(19): 198201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.198201>

反式卤素钙钛矿太阳能电池光伏性能的理论研究

Theoretical study of photovoltaic performance for inverted halide perovskite solar cells

物理学报. 2020, 69(11): 118801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200089>

一种具有减反射性能的 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 太阳能电池透明导电氧化物薄膜*

敬婧¹⁾ 李致朋³⁾ 卢伟胜²⁾ 王宏宇¹⁾ 杨祖安¹⁾ 杨毅¹⁾
尹祺圣¹⁾ 杨馥菱¹⁾ 沈晓明¹⁾ 曾建民¹⁾ 詹锋^{1)2)†}

1) (广西大学, 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 南宁 530004)

2) (中信大锰矿业有限责任公司, 南宁 530028)

3) (Zynergy 技术公司, 弗里蒙特 94538, 美国)

(2020年6月11日收到; 2020年7月20日收到修改稿)

通过研究一种新型透明导电氧化物薄膜 (transparent conductive oxide, TCO) 的减反射作用, 探索增加入射光进入 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) 太阳能电池从而提高太阳能电池效率的新途径. 在 AM1.5 光照条件下, 设计了一种在宽波长范围内具有更好的减反射性能的 TCO 薄膜, 即 SiO_2/ZnO 减反射 TCO 薄膜 (antireflective transparent conductive oxide, ATCO). 为了衡量 300—800 nm 波长范围内的减反射效果, 引入了有效平均反射率方法 (effective average reflectance, EAR) 进行测算. 为充分考虑折射率色散的影响以及 TCO, ATCO 薄膜与有源层的耦合, 本文采用多维光学传输矩阵对各关键材料层的耦合及膜厚进行了优化, 以准确衡量最优的减反射效果. 最后, 通过比较常规 CZTSSC 和 ATCO-CZTSSC 的减反射性能, 得到了新型 ATCO 膜, 可以有效地减少光损耗并提高光电转换效率的结论.

关键词: 减反射膜, 透明导电氧化物, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 太阳能电池, 有效平均反射率

PACS: 78.20.-e, 78.20.Bh, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.69.20200897

1 简介

随着太阳能电池技术的发展, 降低太阳能电池材料的成本和减少环境污染变得越发重要. CuInGaSe_2 (CIGS) 和 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) 太阳能电池作为铜基 II-VI 电池的典型代表, 获得了研究者的关注. CZTS 太阳能电池 (CZTS solar cell, CZTSSC) 是 CIGS 的一种无毒衍生电池, 是一种环保、低成本的太阳能电池材料. 它通过使用锌、锡、硫和其他资源丰富且不含有毒成分的元素替

代 CIGS 太阳能电池中的铜、镓、硒等元素而得到. 因此, 如何提高 CZTSSC 性能的相关研究十分具有吸引力.

通常情况下, 能否降低入射光在太阳能电池器件表面的反射率是影响太阳能电池性能的关键因素. 因此, 设计减反射结构已经成为制备太阳能电池研究的重要环节^[1-9]. 对于平面太阳能电池, 在其表面沉积一些透明的化学物质以形成减反射涂层 (antireflective coating, ARC)^[7-12] 是一种合适的选择. 在太阳光较宽的光谱范围内, 减少入射光在太阳能电池表面的反射, 可以提高太阳能电池的

* 广西自然科学基金 (批准号: 2018GXNSFAA138186, 2014GXNSFAA118025, 2013GXNSFBFA019019)、国家自然科学基金 (批准号: 11364003)、广西有色金属及特色材料加工重点实验室系统性研究项目 (批准号: GKN13-051-02) 和广西有色金属及特色材料加工国家重点实验室培育基地开放基金 (批准号: GXKFJ12-01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fzhan_gxu@126.com

能量转换效率. 因此, 宽波段 ARC 是太阳能电池在宽光谱范围内高效运行的必要条件.

目前, 宽频 ARC 有许多种, 一般平面 ARC 有双层、三层或四层. 前面的研究表明, 单层 ARC 的性能在所需光谱范围内表现得不够理想, 而多层 ARC^[9-12] 对宽波段太阳能电池的性能具有更好的提升作用. 在对 CZTS 太阳能电池的减反射结构进行测试时也发现, 传统 CZTS 电池的 TCO 减反射性能并不理想. 因此, 设计了一种新型 TCO 薄膜, 该 ATCO 薄膜在较宽的波长范围内具有更好的减反射效果, 并提出了一种减反射膜减反射效果的测算理论和衡量方法. 同时应用多维光学特征矩阵代表多层薄膜, 考虑了每一层光学薄膜的光学折射率色散效应, 综合测算了光学膜系统的反射率. 更进一步地, 引入了一种有效平均反射率 (R_e) 计算方法 (effective average reflectance, EAR), 它是在常用的加权平均反射率法的基础上改进而来的, 用于优化 ATCO 和 TCO 薄膜. 最后, 用 EAR 法对分别应用了 TCO 和 ATCO 薄膜的 CZTS 太阳能电池的性能进行了比较和分析. 结果表明, 在可见光强度 AM1.5 条件下, 新型 ATCO 薄膜对入射光减反射的效果更好.

2 材料和方法

传输矩阵法是研究电磁场在分层介质中传播的方法, 可分析基片上不同膜层的厚度 (d)、折射率 (n) 和消光系数 (k) 对反射率的影响, 被广泛应用于光学研究, 可用于建立减反射层的模型.

通常研究光线在太阳能电池的上表面垂直入射时的反射率. 如图 1 所示, ATCO, TCO 薄膜在 CdS 层上, n_j 是折射率, k_j 是消光系数, d_j 是每一层的厚度, n_0 是空气的折射率 ($n_0 = 1$). 所有薄膜组分的光学参数都是在参考实验数据基础上由三次插值确定的. 其中包括 Wang 等^[13] 通过溶胶凝胶沉积法制备的 SiO_2 薄膜并测量给出的光学参数; Dumont 等^[14] 通过射频溅射法制备得到 ZnO 薄膜, 测量得到的光学参数; Seol 等^[15] 采用真空沉积法制备 CZTS 薄膜并得到的光学参数; Park^[16] 采用化学镀液沉积法在碱性溶液中制备 CdS 薄膜并利用椭圆偏振光谱法测得的光学参数; 同时该 ATCO-CZTS 太阳能电池体系还参考了其他文献^[17,18] 的光学参数.

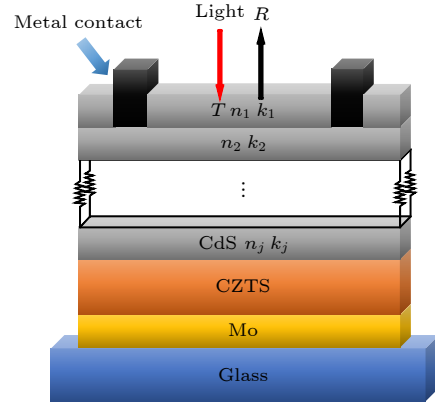


图 1 $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ 太阳能电池示意图

Fig. 1. Schematic diagram of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ solar cells.

一般情况下菲涅耳方程可以计算光在两种介质之间的单一界面上的反射. 然而, 如图 1 所示, 当存在多个界面时, 反射光也同时会在其他界面上产生部分透射和反射. 根据具体路径长度, 这些反射可能会产生相消干涉或相长干涉. 因此, 多层结构的整体反射是许多反射的总和. 分解到单层来看, 为了决定一个光波在分层媒质中的传播, 通常会给该媒质确定一个适当的 2×2 单位模矩阵 M_j , 于是每一个 M_j 就可看作每层膜的光学特性矩阵, 可近似地表示为

$$\begin{bmatrix} \cos\delta_j & i \sin\delta_j/n_j \\ i n_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, δ_j 是该层在给定波长下的有效光学厚度 (与 n_j , d_j 有关), $2\delta_j$ 等于两个相邻相干光束之间的相位差. 考虑到折射率色散效应, δ_j , n_j 均为随波长变化的数据阵列, 则有

$$M = \prod_{j=1}^N M_j, \quad (2)$$

当若干减反膜层、光吸收层排成序列, 入射光每经过一层功能层即叠加一个光学矩阵. 为了确定新型 ATCO 结构的优化值, 从传统单层减反射膜 ZnO 出发, 用三维光学矩阵在三维空间找出减反射结构的最佳值, 再在该传统最佳值的基础上加一维新增的 ATCO 层光学矩阵, 进行了数据降维简化, 通过优化设计使其所需减反射性能进一步增强. 综合得到其计算式如下^[19,20]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} &= \left\{ \prod_{j=1}^N \begin{bmatrix} \cos\delta_j & i \sin\delta_j/n_j \\ i n_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

$Y = C/B$ 是光学导纳, 最后通过 Y 得到反射系数:

$$R = \left| \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right|^2. \quad (4)$$

太阳光谱具有较广的波长范围, 作为衡量太阳能电池中入射光反射率的一种方法, 须将材料在较大波长范围里的内量子效率和太阳光谱的特性变化作为反射率计算的因素. 整个光谱的加权平均反射率 R_w 通常由入射光子通量 $F(\lambda)$, 太阳能电池的内量子效率 $Q(\lambda)$ 和单色光 $R(\lambda)$ 的反射率确定^[7,21]:

$$R_w = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) R(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) Q(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

其中, λ_1 表示频谱响应的下限, 而 λ_2 表示上限. 研究中选择 $\lambda_1 = 300 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 800 \text{ nm}$ 作为 CZTS 太阳能电池的理想光谱范围.

在实际应用中, 不同单色光 $Q(\lambda)$ 的变化并不大, 假设 $Q(\lambda)$ 相等不会影响结果的可靠性. 因此, 在加权平均反射率 R_w 上调整 $Q(\lambda)$ 值相等以获得较便捷的设计方法. 由此可以得出有效平均值反射率 R_e ^[22]:

$$R_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) d\lambda}. \quad (6)$$

3 实验结果

本节将展示在 AM1.5 光照条件下 CZTS 太阳能电池中 TCO 和 ATCO 薄膜的有效平均反射率的优化结果

3.1 常规 CZTS 太阳能电池 (300—800 nm)

图 2 所示的三维数据是在 AM1.5 光照条件下, 常规 CZTS 太阳能电池 TCO 薄膜 (ZnO(Al 掺杂))/i-ZnO/CdS 的优化参数, ZnO(Al) 和 i-ZnO 薄膜可看作一个 ZnO 层. 图 3 所示是通过 R_e 优化后的 TCO 薄膜在 300—800 nm 波长范围内的反射率曲线, 是通过取到最低有效平均反射率找出最佳核心层 CdS, ZnO 薄膜厚度搭配后, 展示在此膜系下反射率随入射光波长变化的曲线, 这可以看出反射率波谷落在光子数最多的波段, 是很有效的. 优化 CZTS 太阳能电池得到最低反射率的 ZnO/CdS 薄膜参数如表 1 所示.

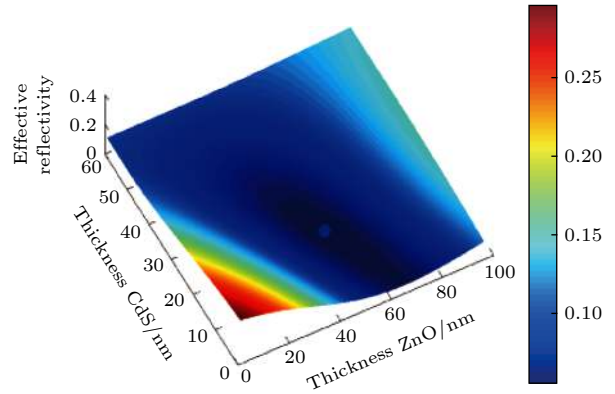


图 2 传统的 TCO 膜的 R_e 与膜厚的关系图

Fig. 2. Conventional TCO film R_e vs. film thickness.

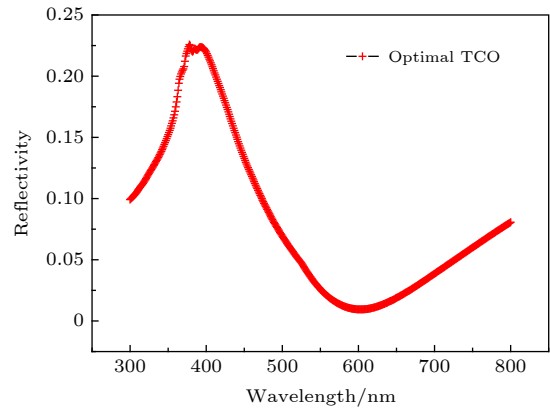


图 3 优化后 TCO 膜的反射率与波长的关系

Fig. 3. Reflectivity of optimal TCO film vs. wavelength.

表 1 通过 EAR 方法优化的用于 CZTS 太阳能电池的常规 TCO 和新 ATCO 膜的参数

Table 1. Parameters of conventional TCO and new ATCO films for CZTSSC optimized by EAR method.

	常规TCO (图2和图3)	新ATCO (图4和图5)	变化比 例/%
SiO ₂ 厚度/nm	—	70	—
ZnO 厚度/nm	50	50	0
CdS 厚度/nm	20	20	0
最低反射率 (400—500 nm)/%	6.9	1.6	-5.3
有效平均反射率(R_e)/%	5.6	3.8	-1.8

3.2 具有减反射 TCO(ATCO) 膜 (300—800 nm) 的 CZTS 太阳能电池

为了降低 CZTS 太阳能电池前表面的反射率, 在 AM1.5 光照条件下, 设计了 SiO₂/ZnO 减反射 TCO(ATCO) 膜. 同时, 为充分考虑 ATCO 层与有源层的耦合效应, 有源层的优化也很重要, 因此, 由 CdS, CZTS 层组成的有源层的薄膜参数取自前

面已优化的常规 CZTS 太阳能电池. 图 4 展示了 AM1.5 光照条件下 CZTS 太阳能电池的 SiO₂/ZnO (ATCO) 薄膜的最佳参数. 图 5 为通过 R_e 优化的 ATCO 薄膜的反射率曲线图, 其中虚线 (a) 来自图 3, 代表优化后 TCO 膜的反射率与波长的关系, (b) 代表新型 ATCO 膜的反射率和波长的关系. 通过将两条反射曲线合并到图 5, 可观察对 TCO 薄膜和 ATCO 薄膜在不同波长情况下的反射率的差别. 优化 CZTS 太阳能电池得到最低反射率的 ATCO 薄膜模拟参数汇总如表 1 所列.

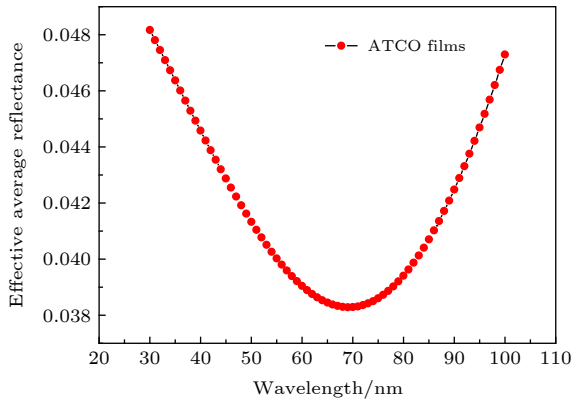


图 4 SiO₂/ZnO ATCO 薄膜的 R_e 与 SiO₂ 厚度的关系
Fig. 4. SiO₂/ZnO ATCO films R_e vs. SiO₂ thickness.

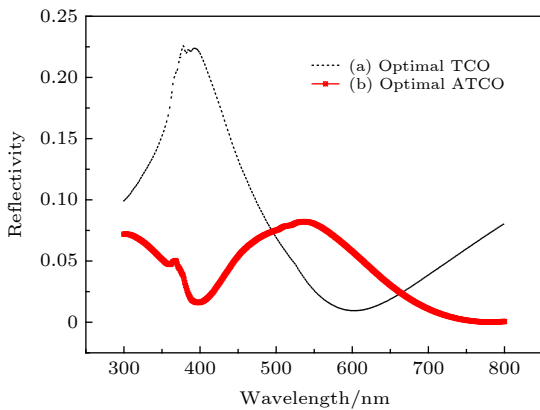


图 5 (a) 最佳 TCO 膜反射率与波长的关系; (b) 最佳 SiO₂/ZnO ATCO 膜反射率与波长的关系

Fig. 5. (a) Optimal TCO film reflectivity vs. wavelength; (b) optimal SiO₂/ZnO ATCO films reflectivity vs. wavelength.

4 结果讨论

对于常规 CZTS 太阳能电池中的 TCO 薄膜而言, 其反射率较大. 当太阳光射到太阳能电池上时, 大部分入射光光子会被 TCO 表面反射回空气

中. 如图 3 所示, 在入射光波长为 400 nm 左右的位置出现反射率峰值, 即在太阳光通量主要分布的波长范围 400—500 nm 出现高反射率. 如表 1 所示, 常规 CZTS 太阳能电池的最低反射率为 6.9%, 平均反射率为 5.6%, 说明该常规 TCO 层并不能很好地减少入射光的反射, 这使入射光光子并不能充分被利用, 导致常规 CZTS 太阳能电池的光电性能并没有得到显著提高.

在 TCO 薄膜上添加一层 SiO₂ 薄膜后, 得到新的减反射薄膜 ATCO, 由于 ATCO 薄膜的折射率从空气到 TCO 涂层逐渐变化, 使得新型 CZTS 太阳能电池的器件表面反射率显著降低. 当光入射到太阳能电池上时, 更多的光子会通过 ATCO 表面传输到电池中. 由于色散效应的存在, 可以看到常规 CZTS 太阳能电池中 TCO 薄膜的最佳有效平均反射率为 5.6%, 并且在 400—500 nm 的波段中的最低反射率为 6.9%, 而添加 SiO₂ 薄膜后, 有效平均反射率和最低反射率分别降为 3.8% 和 1.6%, 分别降低了 1.8% 和 5.3% (表 1). 这是由于在添加 SiO₂ 薄膜后, 实现了对不同波长可见光折射率的互补, 从而使色散效应减弱, 增加了入射光透过率. 如图 5 所示, 常规 TCO 薄膜在 400—500 nm 的可见光波长范围内存在一个反射率峰值, 而对于添加 SiO₂ 后的 ATCO 薄膜, 在 400—500 nm 可见光波长范围内的反射率非常低, 这说明 SiO₂ 薄膜对于该波段的可见光有更强的透过率, 它与 TCO 薄膜共同作用, 从而降低了太阳能电池在该波段中对可见光的整体反射率, 而该波段范围正是太阳光子通量主要分布的范围; 同样地, 在 500—700 nm 波长范围内, 常规 TCO 薄膜更低的反射率弥补了 SiO₂ 薄膜在该波段的高反射率.

不同波段反射率的互补降低了太阳能电池对入射光整体的有效平均反射率, 使 CZTS 太阳能电池在工作波段中的有效平均反射率降低了 1.8%, 从而提升了其光电性能.

5 结 论

本研究在 AM1.5 光照条件下, 对 CZTS 太阳能电池 TCO 和 ATCO 薄膜进行了优化并进行了对比. 结果表明, 在常规的 TCO 层和用 EAR 方法优化后的新型 ATCO 层之间, 最终的最佳反射率存在很大差异. 在常规 CZTS 太阳能电池中, TCO

层的最佳有效平均反射率为 5.6%, 在 400—500 nm 的波段中的最低反射率为 6.9%. 而在具有新型 ATCO 层的 CZTS 太阳能电池中, 其最低反射率和最佳有效平均反射率分别为 3.8% 和 1.6%. 这些反射率的明显变化对于提高电池效率是有吸引力的. 因此, 可以说明新型 ATCO 薄膜可以有效减少光反射并提高光伏转换效率.

参考文献

- [1] Siddique R H, Gomard G, and Holscher H 2015 *Nat. Commun.* **6** 6909
- [2] Jonathan S M, Wang G Y, John R M, James R H 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 823
- [3] Neeraj K, Choudhury S, Polley D, Acharya R, Sinha J, Barman A, Mitra R K 2017 *Opt. Lett.* **42** 1764
- [4] Cao G Y, Zhang C, Wu S L, Ma D, Li X F 2018 *Chin. Phys. B* **27** 124202
- [5] Li L, Wu S L, Yu D, Wang W, Liu W C, Wu X S, Zhang F M 2016 *Chin. Phys. B* **25** 028401
- [6] Jayasinghe R C, Perera A G U, Zhu H, Zhao Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 4302
- [7] Zhan F, He J F, Shang X J, Li M F, Ni H Q, Xu Y Q, Niu Z C 2012 *Chin. Phys. B* **21** 037802
- [8] Leem J W, Jun D H, Heo J, Park W K, Park J H, Cho W J, Kim D E, Yu J S 2013 *Opt. Express* **21** A821
- [9] Richards B S 2003 *Sol. Energ. Mat. Sol. C* **79** 369
- [10] Algora C, Alcaraz M F 1997 *IEEE T. Electron Dev.* **44** 1499
- [11] Sun H T, Wang X P, Kou Z Q, Wang L J, Wang J Y, Sun Y Q 2015 *Chin. Phys. B* **24** 047701
- [12] Ali B, Shahram M, Nima J A 2014 *Chin. Phys. B* **23** 028803
- [13] Wang N F, Kuo T W, Tsai Y Z, Lin S X, Hung P K, Lin C L, Houng M P 2012 *Opt. Express* **20** 7445
- [14] Dumont E, Dugnoille B, Bienfait S 1999 *Thin Solid Films* **353** 93
- [15] Seol J S, Lee S Y, Lee J C, Nam H D, Kim K H 2003 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **75** 155
- [16] Park W D 2012 *Trans. Electr. Electron. Mater.* **13** 196
- [17] Teng C W, Muth J F, Özgür Ü, Bergmann M J, Everitt H O, Sharma A K, Jin C, Narayan J 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 979
- [18] Palik E D 1997 *Handbook of Optical Constant of Solids* (New York, USA: Academic Publishing)
- [19] Born M, Wolf E. 1999 *Principles of Optics* (Cambridge, UK: Cambridge University Press) p70
- [20] Macleod H A 2006 *ThinFilm Optical Filters* (London, UK: Institute of Physics Publishing) p86
- [21] Zhan F, Li Z P, Shen X M, He H, Zeng J M 2014 *Sci. World J.* **26** 5351
- [22] Yuan H R, Xiang X, Chang X, Lu D 2000 *Acta Energ. Sol. Sin.* **21** 371

Transparent conductive oxide film with antireflective properties for $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ solar cells*

Jing Jing¹⁾ Li Zhi-Peng³⁾ Lu Wei-Sheng²⁾ Wang Hong-Yu¹⁾
Yang Zu-An¹⁾ Yang Yi¹⁾ Yin Qi-Sheng¹⁾ Yang Fu-Ling¹⁾
Shen Xiao-Ming¹⁾ Zeng Jian-Min¹⁾ Zhan Feng^{1)2)†}

1) (*Key Lab of New Processing Technology for Nonferrous Metal and Materials of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China*)

2) (*CITIC Dameng Mining Industries Limited, Nanning 530028, China*)

3) (*Zynergy Technology Incorporation, Fremont 94538, USA*)

(Received 11 June 2020; revised manuscript received 20 July 2020)

Abstract

At present, there are several kinds of broadband antireflection coatings (ARCs). For the flat multilayer ARC, it usually contains double, triple, or up to 4 layers. It has been demonstrated that the performance of a single layer coating is not good enough across the desired spectral range. Multiple layer ARCs have much better performance for broadband solar cells (SCs). When inspecting the antireflection structure of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ solar cells (CZTSSCs), it is shown that the transparent conductive oxide (TCO) of traditional CZTSSCs does not have an satisfactory antireflective performance. This paper aims to investigate a way to increase the incident light transmitted into CZTSSCs, and thus improving the efficiency of solar cells by studying the use of the antireflective effect of a TCO film. It introduces a new type of TCO film with better antireflective properties across a wide wavelength range. An SiO_2/ZnO antireflective TCO (ATCO) is designed under AM1.5 illumination. In order to measure the antireflective effect over the 300–800 nm wavelength range, an effective average reflectance method (EAR) is introduced. Considering the effect of the refractive index dispersion and the coupling of the TCO or ATCO films with the active layer, in this paper we use a multi-dimensional transfer matrix to optimize the thickness of each key layer to accurately confirm the best antireflective effect. In addition, the optimized TCO film and the optimized ATCO film in CZTSSCs are compared and analyzed by means of EAR. The result shows, through the comparison of the antireflection between conventional TCO CZTSSCs and ATCO CZTSSCs, that there are considerable differences in final optimal reflectivity between TCO layer and ATCO film. For the conventional CZTSSC, the optimal effective average reflectance of TCO layer is 5.6%, and the lowest reflectivity in the waveband from 400 nm to 500 nm is 6.9%. In addition, the corresponding values obtained in the new ATCO CZTSSC are 3.8% and 1.6% respectively. These apparent changes in reflectivity are appealing in that the new ATCO films can effectively reduce light loss and improve the efficiency of photovoltaic conversion.

Keywords: antireflective films, transparent conductive oxide, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ solar cells, effective average reflectance

PACS: 78.20.-e, 78.20.Bh, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.69.20200897

* Project supported by the Natural Science Foundation of Guangxi Province, China (Grant Nos. 2018GXNSFAA138186, 2014GXNSFAA118025, 2013GXNSFBA019019), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11364003), the Systematic Research Project of Key Laboratory of Processing for Non-ferrous Metal and Featured Materials of Guangxi Province, China (Grant No. GKN13-051-02), and the Open Fund of Ministry-Province Jointly-Constructed Cultivation Base for State Key Laboratory of Processing for Non-ferrous Metal and Featured Materials, Guangxi Province, China (Grant No. GXKFJ12-01).

† Corresponding author. E-mail: fzhan_gxu@126.com