

用于晶硅异质结太阳电池的透明导电薄膜研究进展

王梦笑^{1,2}, 王光红^{1,2}, 赵 雷^{1,2}, 莫丽珍¹, 刁宏伟¹, 王文静^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所太阳能光伏与热利用重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 提升晶硅异质结(HJT)太阳电池的电流有望进一步提高电池效率,透明导电氧化物薄膜(TCO)是影响HJT太阳电池电流的重要功能层。该文首先介绍了TCO薄膜的自身特性,包括掺杂元素和掺杂比例、制备技术对薄膜特性的影响。同时总结了薄膜特性对HJT太阳电池性能的影响。最后阐述了TCO薄膜应用的最新进展及发展趋势,增加盖帽层或多层TCO薄膜有望改善薄膜整体特性及电池性能。以期指导TCO薄膜特性的优化,从而进一步提高HJT太阳电池效率,加快HJT太阳电池产业化进程。

关键词: 晶硅异质结; 太阳电池; 透明导电氧化物薄膜; 多层TCO薄膜; 载流子迁移率; 功函数

中图分类号: O472

文献标志码: A

0 引 言

2022年,隆基创造了晶硅异质结(heterojunction, HJT)太阳电池 26.50%(274.3 cm²)的世界纪录^[1],进一步推进了HJT电池产业化的进程。HJT太阳电池发射结为掺杂磷或硼的非晶硅薄膜,电阻率高,需要在其表面沉积透明导电氧化物薄膜(transparent conductive oxide, TCO)收集光生载流子,同时用作减反层,降低表面的光反射损失。此外,TCO还用作阻挡层禁止银电极等金属扩散进硅层。在HJT太阳电池制备优化过程中,TCO要兼具高的载流子迁移率和透过率,同时要调控功函数实现良好的界面接触。

HJT太阳电池中主要是锡掺杂氧化铟(indium tin oxide, ITO)薄膜。ITO是具有代表性的n型TCO薄膜,其可见光透过率高达85%以上,电阻率低至10⁻⁴ Ω·cm^[2],且具有硬度高、耐磨、耐化学腐蚀等特点,被广泛应用于发光二极管、平板液晶显示器和太阳电池中。In₂O₃基薄膜由于含有稀有金属In,价格昂贵、资源储量少,且In的回收工艺繁琐^[3],为降低生产成本,也在采用ZnO基TCO薄膜做HJT太阳电池的电极。

1 TCO薄膜的掺杂

TCO薄膜是通过掺入金属元素掺杂剂电离出自由电子实现导电。目前,常用的掺杂元素主要有Ga、In、Zr、Sn等^[4-8]。In₂O₃基TCO薄膜,其金属元素的掺杂通常满足的条件是:1) 价态高于3,满足施主掺杂;2) 离子半径接近In³⁺。

Kanai^[9]研究得到不同掺杂元素的In₂O₃基TCO薄膜的电阻率及载流子浓度随掺杂原子和铟原子数量比例的变化关

系,如图1所示^[9]。其电阻率随掺杂原子和铟原子数量比例的增大逐渐降低,而载流子浓度逐渐增加,当增大到一定的掺杂比例时均达到饱和状态。

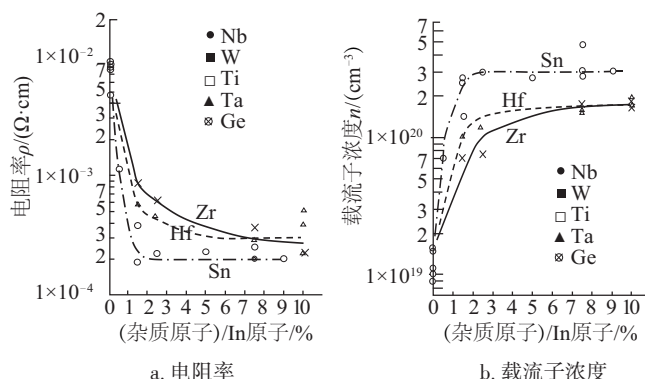


图1 不同掺杂元素的In₂O₃基TCO薄膜的电阻率及载流子浓度随掺杂原子和铟原子数量比例的变化关系^[9]

Fig. 1 Relationship between resistivity and electron concentration vs atomic ration of impurity/In of TCO films based on In₂O₃ with different impurity elements^[9]

一些研究尝试掺杂多种元素调控薄膜能带结构、功函数和载流子浓度等。Al-Ga、Al-Ti和Ga-B等^[10-12]共掺杂ZnO薄膜的研究表明:共掺杂ZnO基TCO薄膜呈现出低电阻率和高透过率,具有广阔的应用前景。

2 TCO薄膜的制备技术及性能

TCO薄膜制备方法可分为真空沉积和非真空沉积。非

收稿日期: 2022-07-24

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U21A2072); 国家自然科学基金(62174161; 61904180); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA21060500)

通信作者: 王光红(1976—), 女, 博士、副研究员, 主要从事太阳电池方面的研究。wangguanghong@mail.iee.ac.cn

真空沉积法如超声喷雾及溶胶-凝胶法^[13]等;真空沉积如磁控溅射(magnetron sputtering, MS)^[14]、反应等离子体沉积(reactive plasma deposition, RPD)^[15]及原子层沉积等。在 HJT 太阳电池中,制备 TCO 薄膜多采用 MS 和 RPD 技术^[14-15]。

MS 技术对靶材有较高的要求,无法使用不能压制成高密度陶瓷靶材的 TCO 材料,如氧化钨掺杂氧化铟(tungsten doped indium oxide, IWO),这是 MS 制备 TCO 薄膜需要解决的问题。

目前,对铟锡质量分数比例为 90:10 的 ITO 靶材研究较多^[16-17],也有研究采用 97:3 及 95:5^[6]。黄梅等^[16]采用 MS 技术和单变量控制方法,其他参数不变,适量升高氧含量,使电阻率降至 $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$,透过率升至 89%。ITO 对氧非常敏感,适量的氧可提高电导率和透过率;但过高的氧含量,会使载流子浓度变小,电阻率增加。Koida 等^[18]与 Barraud 等^[19]采用 MS 技术,通过在沉积 In_2O_3 薄膜过程中引入水汽,钝化 ITO 薄膜中缺陷,达到提升迁移率的目的;Nishimura 等^[20]在采用 MS 沉积 ITO 薄膜过程中引入水汽,降低 ITO 薄膜的择优取向,使薄膜迁移率提升至 $40 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$;Fujiwara 等^[18]使用 In_2O_3 陶瓷靶并通入 Ar 、 O_2 和 H_2O ,实现对 In_2O_3 薄膜的 H 掺杂,在不加热的衬底上采用 MS 沉积薄膜后,进行 $100 \sim 200^\circ\text{C}$ 、2 h 的真空退火处理,得到迁移率高于 $100 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的 IO:H 薄膜。

RPD 技术具有低离子损伤、高生长速率及高薄膜结晶度等优点,但设备成本较高。相比于 MS,RPD 对衬底的轰击弱,靶材物质通过升温蒸发生成薄膜沉积活性基元,几乎不存在高能粒子对衬底表面的轰击损伤,镀膜质量更易控制。RPD 可降低非晶硅表面的损伤,不会使非晶硅钝化后硅片的少子寿命降低。RPD 类似蒸发的原理使其可以制备的材料种类受到限制,高蒸发温度的材料难用 RPD 进行镀膜。目前,适合 RPD 技术的 TCO 材料主要有掺镓的氧化锌(gallium-doped zinc oxide, GZO)、ITO、掺钨的氧化铟(IWO)及掺铈的氧化铟(cerium-doped indium oxide, ICO)等,其中 IWO 及 ICO 与 ITO 相比具有更高的载流子迁移率^[8,15]。不同于 MS 技术,RPD 为便于实现蒸发,所采用的靶材结构相对疏松,致密度小。常用的 IWO 靶振实密度只有约 60%,使用 MS 技术很难匹配这种低密度靶材,只能采用 RPD 技术。

石建华等^[8]采用 RPD 技术制备不同厚度的 ICO (3% CeO_2 , 质量分数)薄膜,载流子浓度和迁移率对厚度显示出强烈的依赖性,厚度为 30 nm 时,迁移率最高为 $153.7 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。孟凡英等^[15]采用 RPD 技术制备 IWO (1% WO_3 , 质量分数)薄膜,氧分压为 $9.6 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 时,632.8 nm 波长处的折射率为 2.01,禁带宽度为 3.83 eV,迁移率最大为 $89 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,载流子浓度为 $1.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,用于 HJT 电池实现 20.8 % 的效率。沈磊磊等^[21]采用 RPD 技术制备 IWO 薄膜,获得了 $60 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的迁移率,经过高温退火处理后,迁移率可达到 $120 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。周忠信等^[22]采用 RPD 技术,ICO 靶材及 Ar 稀释的 H_2 混合气体制备 ICOH 薄膜,获得了 $94 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的迁移率。Kobayashi 等^[23]采用 RPD 技术, CeO_2 及 H_2 共掺杂 In_2O_3 薄膜,获得了迁移率高达 $142 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 的 ICOH 薄膜。Shirakata 等^[24]采用 RPD 技术制备 Ga 掺杂 ZnO 薄膜,180 nm 厚的

GZO 薄膜迁移率为 $27 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。黄伟等^[25]采用 RPD 技术在室温下实现 W 和 H_2O 共掺杂 In_2O_3 制备 IWOH 薄膜,在空气中退火使迁移率从 $43.7 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 提高至 $65.2 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。

图 2^[26]给出了不同制备技术不同掺杂成分 In_2O_3 及 ZnO 基 TCO 薄膜的电阻率、载流子浓度和迁移率。RPD 技术制备的 TCO 薄膜迁移率相对较高,Ce 和 H 共掺杂的 In_2O_3 薄膜迁移率高达 $160 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,且电阻率小于 $3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。此外,经过固相结晶(solid-phase crystallization, spc)的 TCO 薄膜,无论采用 MS 或 RPD 技术制备,都获得了较高的迁移率,这主要得益于其具有较长的弛豫时间^[26-27]。Koida 等^[28]将 MS 低温工艺制备的非晶 IO:H 薄膜真空退火处理,薄膜由非晶转变为多晶,证明了固相结晶的发生。

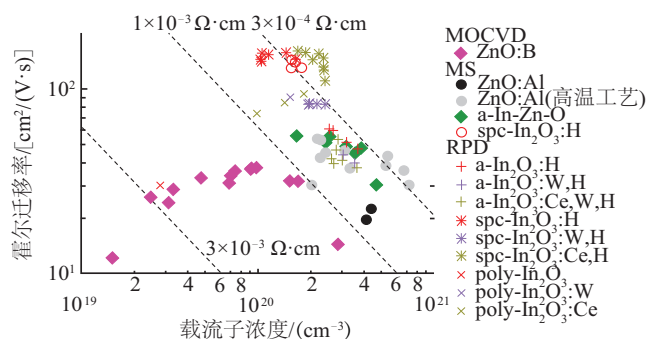


图2 不同制备技术不同掺杂成分 In_2O_3 及 ZnO 基 TCO 薄膜电阻率、载流子浓度及其迁移率^[26]

Fig. 2 Resistivity, electron concentration and mobility of TCO films based on In_2O_3 and ZnO with different preparation techniques and impurities^[26]

3 TCO 薄膜对 HJT 太阳电池性能的影响

目前,很多公司和科研机构制备的 HJT 太阳电池的效率均已超过 20%,部分已达到 24 % 以上,TCO 性能如表 1 所示。

表1 HJT 电池前后电极及其性能

Table 1 Front and rear electrodes of HJT solar cells and their properties

电极		迁移率/ [$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]	效率/ %	制备 技术	参考 文献
前电极	背电极				
ITO	AZO		20.30		[29]
ITO/IO:H		55/132	20.40	MS	[30]
ITO			20.80	MS	[31]
IWO	IWO	89	20.80	RPD	[15]
ITO	AZO	17.9	23.60	MS	[32]
IWTO		92.1	23.80	RPD	[33]
ITO:H	ITO:H	36.3	22.97	MS	[34]
ICO:H		141	24.10	RPD	[23]
ITO	ITO	32.2	24.34	MS	[6]
ITO	ITO		25.11	MS	[35]

作为减反射层,TCO 薄膜的折射率一般约为 2,根据薄膜在 600 nm 波长处反射率最小进行测算,其厚度约为 75 nm。Cruz 等^[36]通过软件模拟了太阳光从电池前表面或后表面入射时,具有不同 TCO 薄膜载流子浓度及厚度的太阳电池电子和空穴输运功率、电流、及总体功率损失,如图 3 所示^[36]。TCO 薄膜载流子浓度为 $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 较小值或 $4.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 较大值,其厚度为 20 或 80 nm 时,太阳光从电池前表面及背表面辐照,电流及功率损失均较大。当 TCO 薄膜厚度较小时,其电阻较大,而厚度较大时又具有较高的光学吸收损失。

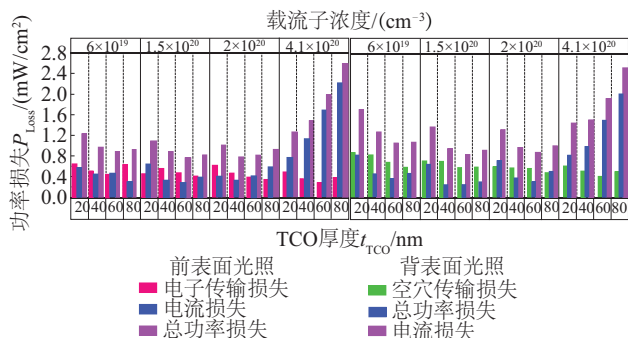


图3 软件模拟太阳光从电池前表面或后表面入射时,TCO 薄膜不同载流子浓度及厚度下太阳电池的电子和空穴输运功率、电流及总体功率损失^[36]

Fig. 3 Simulated electron/hole transport power losses, current loss and total power loss of solar cells under different carrier concentrations and thicknesses of TCO films when sunlight is incident from front or rear surface of cells^[36]

TCO 薄膜和掺杂硅层薄膜的良好接触特性可通过提高掺杂硅层的掺杂浓度增强载流子隧穿能力来获得,但非晶硅薄膜的掺杂效率远低于晶体硅,因此较难实现。可以对 TCO 的功函数进行控制,功函数决定费米能级的位置,从而确定结区内的电场方向。文献[37]较详细研究了 TCO/掺杂非晶硅肖特基结对 HJT 太阳电池的影响,通常与 p 型薄膜硅接触的 TCO 需要具有较大的功函数,与 n 型薄膜硅接触的 TCO 功函数较小。图 4 为不同 TCO 功函数的 HJT 太阳电池

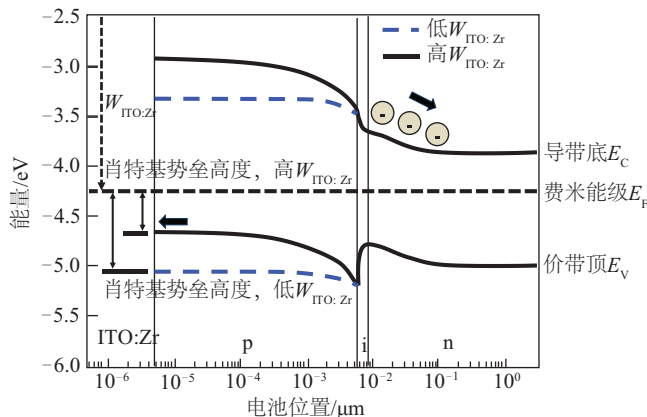


图4 不同TCO功函数的HJT太阳电池能带结构示意图^[38]

Fig. 4 Schematic diagram of electronic band structure of HJT solar cells with different TCO work functions^[38]

(ITO:Zr/a-Si:H(p)/a-Si:H(i)/c-Si(n))的能带结构示意图^[38]。各层材料功函数的不同导致能带弯曲。ITO:Zr 层的功函数低于 a-Si:H 层,但其增大可提高空穴从 a-Si:H(p)到 ITO:Zr 层的输运,使填充因子增加,内建电场的增强提高了电池的开路电压,因此电池性能得到提高。总之,ITO:Zr/a-Si:H(p)接触界面肖特基势垒高度的降低导致了空穴载流子收集的增强。

赵雷等^[39]采用 AFORS-HET 软件模拟得到 TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p)太阳电池性能随 TCO 功函数变化的关系,如图 5 所示^[39],TCO 功函数高于 4.1 eV 时,太阳电池性能随着功函数的增加迅速降低。当 TCO 功函数较低时,TCO/a-Si:H(n)肖特基接触的内建电场方向与 a-Si:H(n)/c-Si(p)相同;反之,当 TCO 功函数较高时,内建电场方向相反。TCO 功函数的增加会导致 TCO/a-Si:H(n)接触的内建电势增大,使得发射极内的耗尽区变宽。如果发射极厚度较小,以至于 TCO/a-Si:H(n)与 a-Si:H(n)/c-Si(p)接触区重叠,将使得 a-Si:H(n)/c-Si(p)接触的内建电势降低,从而导致太阳电池开路电压和填充因子减小,效率变差。

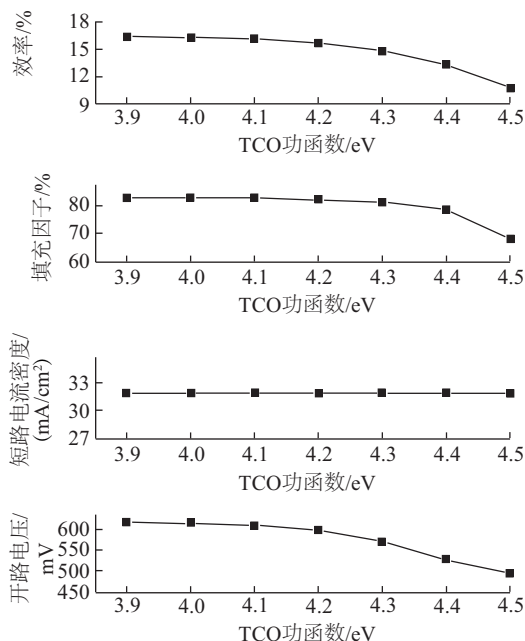


图5 模拟得到TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p)太阳电池性能随 TCO 功函数变化关系^[39]

Fig. 5 Relationship between performance of TCO/a-Si:H(n)/c-Si(p) solar cell and TCO work function obtained through simulation^[39]

Bivour 等^[40]模拟了不同掺杂浓度 a-Si:H(p)层与接触层功函数不匹配对 HJT 电池填充因子的影响,如图 6 所示^[40]。通常 TCO 的功函数小于 a-Si:H(p)层的功函数,在界面处甚至 a-Si:H(p)层内会出现耗尽区或反型区。在耗尽区或反型区,3 种掺杂的 a-Si:H(p)层接触层功函数不匹配导致电池填充因子均较低;在平带时,接触层功函数匹配,因此功函数对结的性能影响较小;在积累区,因 a-Si:H(p)层的高掺杂,降

低了界面接触层功函数的不匹配程度,有利于电池填充因子的改善。

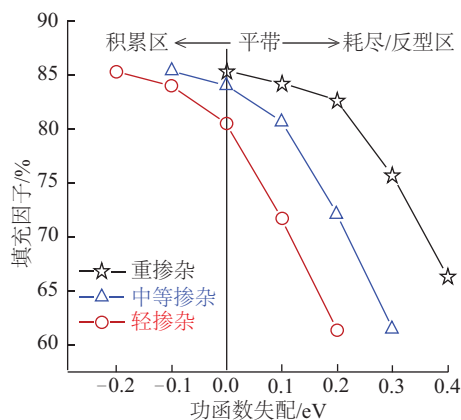


图6 不同掺杂浓度a-Si:H(p)层与接触层功函数不匹配对HJT电池填充因子的影响^[40]

Fig. 6 Effect of work function mismatch between a-Si:H (p) layers and contact layers with different doping concentrations on fill factor of HJT solar cells^[40]

4 TCO 薄膜应用的最新进展及发展趋势

目前,用于HJT电池的ITO薄膜主要是单层ITO薄膜,在兼顾高透过率、低电阻率和良好接触时,会舍弃掉一些优异的性能。改进TCO的一个重要方法是采用多层薄膜,以此来提高电池效率或降低成本。一些学者基于ITO进行薄膜结构上的调整,如增加盖帽层或多层ITO薄膜,以期获得薄膜整体性能的改进。采用多层TCO除了提高薄膜自身特性,还具有如下优点。

4.1 降低成本

德国HZB研究了在ITO外侧覆盖一层SiO₂盖帽层可改善HJT电池效率^[41]。如图7所示^[41],在ITO外侧覆盖50 nm的SiO₂盖帽层,有效增加了ITO中的氢含量,提高了薄膜载流子浓度和迁移率。从SIMS分析来看,氢原子主要来源于非晶硅层,退火使非晶硅层中的氢向ITO扩散,但ITO外表面的氢原子会向真空中逸出,使用盖帽层可有效阻止这种逸出。

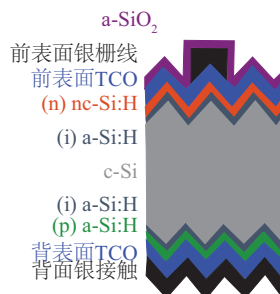


图7 采用a-SiO₂盖帽层的硅异质结太阳电池结构^[41]

Fig. 7 HJT solar cell structure with a-SiO₂ as capping layer^[41]

ITO/SiO₂或ITO/SiN_x复合膜组成减反射结构,可降低ITO用量,从而降低成本。Meyer Burger公司提出HJT 2.0的概念^[42],如图8所示,在ITO上镀SiN_x膜,SiN_x和ITO共同作减反射层,ITO起导电作用,电池性能明显提高,且可降低成本。

4.2 降低接触电阻

多层TCO薄膜有利于降低TCO和衬底的接触电阻^[43]。汉能公司创造世界纪录的效率为25.1%的HJT太阳电池使用了多层ITO薄膜,包含缓冲层、种子层和导电层,其中缓冲层主要用于减少a-Si(n)/TCO的接触电阻,种子层用于改善TCO的结晶特性和光电特性,如图9所示^[44]。使用多层TCO使电池效率大幅提高0.51%,这主要归功于短路电流和填充因子的提高。

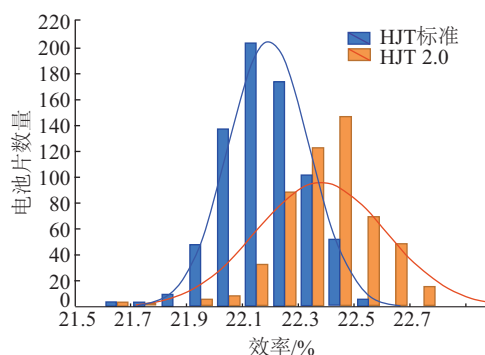


图8 Meyer Burger公司HJT 2.0与常规结构HJT性能对比^[38]

Fig. 8 Performance comparison between HJT 2.0 and conventional structure prepared by Meyer Burger^[38]

TCO	TCO薄膜	Eff/%	V _{oc} /V	I _{sc} /A	FF/%
多层TCO	基线工艺TCO	22.56	0.735	9.283	80.17
	多层TCO 1	22.69	0.736	9.322	80.14
	多层TCO 2	23.07	0.738	9.361	80.95

图9 汉能公司在其HJT电池中使用多层TCO膜^[40]

Fig. 9 Multilayer TCO film of HJT solar cell prepared by Hanergy^[40]

4.3 提高电池稳定性

氢作为施主杂质可提高TCO薄膜(如掺氢的氧化铜,IO:H)载流子浓度,降低电阻率,适量引入氢可钝化晶界缺陷,提高迁移率,改善薄膜电学特性^[18-20]。但薄膜内的氢易脱附,导致薄膜性能降低。因此,在IO:H薄膜上覆盖一层ITO可增强薄膜的稳定性,双层膜迁移率的衰减在双85实验中远小于IO:H单层膜^[45]。

5 结论

HJT太阳电池中的TCO薄膜起着导电、减反射及阻挡层的作用,其优化需要从高迁移率特性入手。选择合适的金属元素掺杂剂实现高导电特性,RPD技术制备的In₂O₃:Ce:H薄膜迁移率高达160 cm²/(V·s),电阻率小于3×10⁻⁴ Ω·cm。TCO薄膜的产业化制备技术需要满足高效率低成本的需求,目前

产业化主要采用 MS 及 RPD 技术。TCO 薄膜与掺杂薄膜硅之间的良好欧姆接触主要通过调节 TCO 的功函数来实现,与 p 型和 n 型非晶硅掺杂层接触的 TCO 分别需要有高的功函数和低的功函数。对 TCO 薄膜的最新进展及发展趋势进行讨论,多层 TCO 薄膜是未来提高 HJT 电池性能及其稳定性的趋势之一。

[参考文献]

- [1] GERRN M A, DUNLOP E D, SIEFER G, et al. Solar cell efficiency tables (Version 61)[J]. Progress in photovoltaics: research and application, 2023, 31(1): 3-16.
- [2] ALI D, BUTT M Z, MUNEEER I, et al. Correlation between structural and optoelectronic properties of tin doped indium oxide thin films[J]. Optik, 2017, 128: 235-246.
- [3] 刘明, 王磊, 于书魁, 等. 高效硅基异质结太阳能电池铜回收技术研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(4): 137-141.
- LIU M, WANG L, YU S K, et al. Study of recovery technology for indium in efficient crystalline silicon heterojunction solar cells[J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(4): 137-141.
- [4] YU J, BIAN J T, DUAN W Y, et al. Tungsten doped indium oxide film: ready for bifacial copper metallization of silicon heterojunction solar cell[J]. Solar energy materials and solar cells, 2016, 144: 359-363.
- [5] PARTHIBAN S, GOKULAKRISHNAN V, RAMAMURTHI K, et al. High near-infrared transparent molybdenum-doped indium oxide thin films for nanocrystalline silicon solar cell applications[J]. Solar energy materials and solar cells, 2009, 93(1): 92-97.
- [6] GONG W B, WANG G H, GONG Y B, et al. Investigation of $\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$ films with different doping ratio and application as transparent conducting electrode in silicon heterojunction solar cell[J]. Solar energy materials and solar cells, 2022, 234: 111404.
- [7] KHOKHAR M Q, HUSSAIN S Q, PHAM D P, et al. ITO: Zr bi-layers deposited by reactive O_2 and Ar plasma with high work function for silicon heterojunction solar cells[J]. Current applied physics, 2020, 20(8): 994-1000.
- [8] SHI J H, MENG F Y, BAO J, et al. Surface scattering effect on the electrical mobility of ultrathin Ce doped In_2O_3 film prepared at low temperature [J]. Materials letters, 2018, 225: 54-56.
- [9] KANAI Y. Electrical properties of In_2O_3 single crystals doped with metallic donor impurity[J]. Japanese journal of applied physics, 1984, 23(1): 127.
- [10] JIANG M H, LIU X Y. Structural, electrical and optical properties of Al- Ti codoped ZnO (ZATO) thin films prepared by RF magnetron sputtering[J]. Applied surface science, 2008, 255(5): 3175-3178.
- [11] LEE W, SHIN S, JUNG D R, et al. Investigation of electronic and optical properties in Al- Ga codoped ZnO thin films[J]. Current applied physics, 2012, 12(3): 628-631.
- [12] ABDUEV A K, AKHMEDOV A K, ASVAROV A S. The structural and electrical properties of Ga-doped and Ga, B codoped ZnO thin films: the effects of additional boron impurity[J]. Solar energy materials and solar cells, 2007, 91(4): 258-260.
- [13] EO I S, HWANGBO S, KIM J T, et al. Photoluminescence of chemical solution- derived amorphous ZnO layers prepared by low-temperature process [J]. Current applied physics, 2010, 10(1): 1-4.
- [14] KHATAMI S, FEKRI AVAL L, BEHZADI POUR G. Investigation of nanostructure and optical properties of flexible AZO thin films at different powers of RF magnetron sputtering [J]. Nano, 2018, 13(6): 1850062 (1-9).
- [15] MENG F Y, SHI J H, LIU Z X, et al. High mobility transparent conductive W-doped In_2O_3 thin films prepared at low substrate temperature and its application to solar cells [J]. Solar energy materials and solar cells, 2014, 122: 70-74.
- [16] HUANG M, HAMEIRI Z, VENKATARAJ S, et al. Characterisation and optimisation of indium tin oxide films deposited by pulsed DC magnetron sputtering for heterojunction silicon wafer solar cell applications[J]. Energy procedia, 2013, 33: 91-98.
- [17] 何永才, 董刚强, 张小燕, 等. 高效硅基异质结太阳能电池的 ITO 薄膜研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 1-6.
- HE Y C, DONG M G, ZHANG X Y, et al. Investigation on high quality ito films used for SHJ solar cell [J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(4): 1-6.
- [18] KOIDA T, FUJIWARA H, KONDO M. High- mobility hydrogen-doped In_2O_3 transparent conductive oxide for a-Si: H/c- Si heterojunction solar cells [J]. Solar energy materials and solar cells, 2009, 93(6/7): 851-854.
- [19] BARRAUD L, HOLMAN Z C, BADEL N, et al. Hydrogen-doped indium oxide/indium tin oxide bilayers for high-efficiency silicon heterojunction solar cells[J]. Solar energy materials and solar cells, 2013, 115: 151-156.

- [20] NISHIMURA E, OHKAWA H, SONG P, et al. Microstructures of ITO films deposited by DC magnetron sputtering with H₂O introduction [J]. *Thin solid films*, 2003, 445(2): 235-240.
- [21] 沈磊磊, 孟凡英, 石建华, 等. 高迁移率 IWO 薄膜特性及其在薄膜硅/晶体硅异质结太阳能电池中的应用研究 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(5): 1329-1334.
- SHEN L L, MENG F Y, SHI J H, et al. Study of high mobility IWO thin films and its application to SHJ solar cells [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2018, 39(5): 1329-1334.
- [22] 周忠信, 陈新亮, 张云龙, 等. RPD 技术生长 ICO:H 薄膜及其在晶体硅异质结太阳能电池中的应用 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(1): 50-55.
- ZHOU Z X, CHEN X L, ZHANG Y L, et al. RPD-grown ICO: H thin films for crystalline silicon heterojunction solar cells [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(1): 50-55.
- [23] KOBAYASHI E, WATABE Y, YAMAMOTO T, et al. Cerium oxide and hydrogen co-doped indium oxide films for high-efficiency silicon heterojunction solar cells [J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2016, 149: 75-80.
- [24] SHIRAKATA S, SAKEMI T, AWAI K, et al. Electrical and optical properties of large area Ga-doped ZnO thin films prepared by reactive plasma deposition [J]. *Superlattices and microstructures*, 2006, 39 (1/2/3/4): 218-228.
- [25] HUANG W, SHI J H, LIU Y Y, et al. Effect of crystalline structure on optical and electrical properties of IWOH films fabricated by low-damage reactive plasma deposition at room temperature [J]. *Journal of alloys and compounds*, 2020, 843: 155151.
- [26] KOIDA T. Environmental and thermal stability of high-mobility In₂O₃-based transparent conducting oxide films fabricated at low process temperatures [C]//Research Center for Photovoltaics, AIST, 1st SHJ Workshop. Shanghai, China, 2018.
- [27] KOIDA T, NOMOTO J. Effective mass of high-mobility In₂O₃-based transparent conductive oxides fabricated by solid-phase crystallization [J]. *Physical review materials*, 2022, 6(5): 055401.
- [28] KOIDA T, KONDO M, TSUTSUMI K, et al. Hydrogen-doped In₂O₃ transparent conducting oxide films prepared by solid-phase crystallization method [J]. *Journal of applied physics*, 2010, 107(3): 033514.
- [29] LACHAUME R, FAVRE W, SCHEIBLIN P, et al. Influence of a-Si:H/ITO interface properties on performance of heterojunction solar cells [J]. *Energy procedia*, 2013, 38: 770-776.
- [30] SCHERG-KURMES H, KÖRNER S, RING S, et al. High mobility In₂O₃:H as contact layer for a-Si:H/c-Si heterojunction and μ c-Si:H thin film solar cells [J]. *Thin solid films*, 2015, 594: 316-322.
- [31] KIM S, IFTIQUAR S M, LEE D, et al. Improvement in front-contact resistance and interface passivation of heterojunction amorphous/crystalline silicon solar cell by hydrogen-diluted stacked emitter [J]. *IEEE journal of photovoltaics*, 2016, 6(4): 837-845.
- [32] WU Z P, DUAN W Y, LAMBERTZ A, et al. Low-resistivity p-type a-Si:H/AZO hole contact in high-efficiency silicon heterojunction solar cells [J]. *Applied surface science*, 2021, 542: 148749.
- [33] HUANG W, SHI J H, LIU Y Y, et al. High-performance Ti and W co-doped indium oxide films for silicon heterojunction solar cells prepared by reactive plasma deposition [J]. *Journal of power sources*, 2021, 506: 230101.
- [34] QIU D P, DUAN W Y, LAMBERTZ A, et al. Effect of oxygen and hydrogen flow ratio on indium tin oxide films in rear-junction silicon heterojunction solar cells [J]. *Solar energy*, 2022, 231: 578-585.
- [35] RU X N, QU M H, WANG J Q, et al. 25.11% efficiency silicon heterojunction solar cell with low deposition rate intrinsic amorphous silicon buffer layers [J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2020, 215: 110643.
- [36] CRUZ A, ERFURT D, WAGNER P, et al. Optoelectrical analysis of TCO+Silicon oxide double layers at the front and rear side of silicon heterojunction solar cells [J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2022, 236: 111493.
- [37] ZHAO L, ZHOU C L, LI H L, et al. Design optimization of bifacial HIT solar cells on p-type silicon substrates by simulation [J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2008, 92(6): 673-681.
- [38] HUSSAIN S Q, KIM S, AHN S, et al. Influence of high work function ITO:Zr films for the barrier height modification in a-Si:H/c-Si heterojunction solar cells [J]. *Solar energy materials and solar cells*, 2014, 122: 130-135.
- [39] ZHAO L, ZHOU C L, LI H L, et al. Role of the work function of transparent conductive oxide on the performance of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells studied by computer simulation [J]. *Physica status solidi (a)*, 2008, 205(5): 1215-1221.

- [40] BIVOUR M, REICHEL C, HERMLE M, et al. Improving the a-Si:H(p) rear emitter contact of n-type silicon solar cells [J]. Solar energy materials and solar cells, 2012, 106: 11-16.
- [41] STANNOWSKI B, ERFURT D, CRUZ A. TCOs for SHJ solar cells [C]//3rd International Workshop on SHJ Solar cell, Web. Meeting, 2020.
- [42] BÄTZNER D L, PAPET P, LEGRADIC B, et al. Alleviating performance and cost constraints in silicon heterojunction cells with HJT 2.0 [C]//2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Chicago, USA, 2020: 1471-1474.
- [43] LUDERER C, TUTSCH L, MESSMER C, et al. Influence of TCO and a-Si: H doping on SHJ contact resistivity [J]. IEEE journal of photovoltaics, 2021, 11(2): 329-336.
- [44] CHRIS X X. Micro-crystalline silicon oxide front contact layer for silicon heterojunction solar cells [C]//2nd International Workshop on SHJ Solar Cells. Chengdu, China, 2019.
- [45] TOHSOPHON T, DABIRIAN A, DE WOLF, et al. Environmental stability of high- mobility indium- oxide based transparent electrodes [J]. APL materials, 2015, 3 (11): 116105.

RESEARCH PROGRESS OF TCO FILMS FOR SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS

Wang Mengxiao^{1,2}, Wang Guanghong^{1,2}, Zhao Lei^{1,2}, Mo Libin¹, Diao Hongwei¹, Wang Wenjing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System of Chinese Academy of Sciences, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Increasing the current of the silicon heterojunction(HJT) solar cell is expected to further improve its efficiency. Transparent conductive oxide film (TCO) is an important functional layer that affects the current of the HJT solar cell. In this paper, the characteristics of TCO films are firstly introduced, including the effects of doping elements, doping ratios and preparation techniques on the film properties. Moreover, the influence of film properties on the performance of HJT cells is summarised. Finally, the latest progress and development trend of TCO film application are described. Increasing the cap layer or adopting multilayer TCO film structure is expected to improve the characteristics of TCO films and solar cell performance. It is expected to guide the optimization of TCO films characteristics, so as to further improve the efficiency of HJT solar cell and accelerate its industrialization process.

Keywords: silicon heterojunction; solar cells; transparent conductive oxide films; multilayer TCO films; carrier mobility; work function