文章编号: 1007 - 4252(2020)04 - 0004 - 257

太阳能电池研究进展

许庆岩,任元文,刘世民*
(大连交通大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116028)

摘要: 太阳能作为一种清洁、无污染且可再生的能源,注定在未来具有很大的应用空间。本文对常见的几种太阳能电池,包括硅基太阳能电池、薄膜太阳能电池和钙钛矿太阳能的转换效率、结构及其稳定性进行了综述和展望,并介绍了新近出现的太阳能电池制作技术,包括多结太阳能电池、石墨烯太阳能电池以及多层太阳能电池。

关键词: 硅基太阳能电池; 薄膜太阳能电池: 钙钛矿太阳能电池; 传输层
中图分类号: TM914.4 **文献标志码:** A

Researchprogress of the solar cells

XU Qing yan, REN Yuan wen, LIU Shi min*
(School of Materials Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China)

Abstract: Solar energy is destined to have great applications in the future as a clean and renewable energy source. In this paper, the efficiency, structure and stability of several common solar cells, including silicon-based solar cells, thin-film solar cells and perovskite solar cells, are reviewed and prospected. Several recent emerging solar cell fabrication technologies are also reviewed including multijunction solar cells, graphene solar cells and multilayer solar cells.

Key words: silicon based solar cell; thin film solar cell; perovskite solar cell; transport layer

0 引言

随着时代的发展以及能源的短缺,人们开始寻找不会枯竭的清洁能源。太阳能电池产业应运而生,根据其区别,人们将太阳能电池划分为三代[1]。第一代太阳能电池是硅基太阳能电池,具有高稳定性和高转换效率,其主要包括单晶硅和多晶硅太阳能电池两种。1954 年 4 月 25 日,贝尔实验室[2]研制出第一块硅基太阳能电池板,转换效率为 6%,这就是硅基太阳能产业的开端。第一代太阳能电池所需材料过多,成本较高。第二代太阳能电池是以 CdTe、CZTS、CIGS 和非晶硅等为代表的薄膜太阳能电池,占据了全球 10% 左右的市场份额,具有材料使用少、价格便宜的特点。钙钛矿太阳能电池作为第三代太阳能电池的典型代表,是继多晶硅太阳能

收稿日期: 2020-05-21; 修订日期: 2020-06-23
基金项目: 辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0096)支持。
通讯作者: 刘世民,教授,研究方向: 纳米材料; 电子邮箱: lsm@djtu.edu.cn

电池、单晶硅太阳能电池、薄膜太阳能电池之后最具发展前景的太阳能电池，具有成本低廉和高转换效率的特点，但该类太阳能电池仍处于实验室研究阶段。

1 硅基太阳能电池

硅基太阳能电池问世以来，组件成本逐渐降低，光伏性能显著改善，其太阳能电池结构主要包括基片电极、p 型层、p－n 结、n 型层、SiO_2 保护膜、电极[3]。由于半导体导带与禁带间具有适合的禁带宽度，对 Si 这种材料进行不同的掺杂处理，可形成 p－n 结。太阳光照射在 p－n 结上，会形成新的空穴－电子对。在 p－n 结内建电场的作用下，光生空穴流向 p 区，光生电子流向 n 区，接通电路后即产生电流，这是光生伏特效应，也是太阳能电池的工作原理。

通常太阳光从电池正面入射，正面的电极会遮挡一部分光线，而其余太阳光线经过电池减反射层被 Si 半导体材料所吸收，然后到达 Si 发射层与 Si 衬底形成的耗尽层区域。在耗尽层区域，能量超过硅禁带宽度的光子激发出电子和空穴，其在内建电场的作用下实现分离，分别到达正面和背面的电极区，最终产生光电流。

1999 年，澳大利亚新南威尔士大学研制的钝化发射极背面局域扩散电池(PERL)效率达到了 25%[4-5]，这是自从硅基太阳能电池诞生以来，转换效率最高的一次记录，一直到 2017 年，Kunta Yoshikawa 等人[6]才将光电转化效率提高到了 26%。

1.1 影响硅基太阳能电池转换效率的因素

硅基太阳能电池的转换效率主要与下面的因素有关：电池结构的优化设计、光吸收性能、光生载流子收集效率、光生载流子复合损耗的抑制以及减小电极的电阻和电极的面积。这些技术催生了一系列高效率的晶体硅太阳电池，如钝化发射极后电池(PERC)、叉指背接触电池(IBC)、本征薄层电池(HIT)和叉指背接触(HBC)异质结太阳电池。

太阳能电池的转换效率也与太阳能电池的制作工艺有关，例如：表面织构化、减反射层的制作，前表面钝化和铝背场结构等。这些关键工艺的突破是提升太阳电池效率的一种关键途径。其中，表面织构化是通过制作表面机械结构的方式来增加电池对光的吸收率，比较常见的是正金字塔结构、倒金字塔结构和纳米微结构等，应用最广的织构化方法是湿法腐蚀，效率较高的织构化为倒金字塔结构[7]。

20 世纪八九十年代，制绒、光刻、钝化发射级、背接触技术、背面局域扩散技术等不断发展，对电池结构和工艺流程的优化使电池效率有很大提升。目前对硅基太阳能电池的研究需要同时兼顾成本和转换效率两个方面，如 PERL 电池虽然取得了效率上的成功，但是受限于成本和工艺的复杂性，该技术未能成为电池产业化的理想化方案。

1.2 硅基太阳能电池研究进展

硅基太阳能电池的稳定性是所有太阳能电池中最好的，占据市场规模的 90% 左右。硅基太阳能电池主要包括单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池，其结构大体相似，但是制作单晶硅太阳能电池需要高纯度的硅，其成本较高。目前我国绝大多数太阳能电站用的都不是单晶硅太阳能电池，而是多晶硅太阳能电池。其制作工艺、成本相对单晶硅太阳能电池低得多，很受中国市场的欢迎。硅基太阳能电池技术是一项相对比较成熟的技术，未来几年，他的主要发展方向仍是降低成本、优化制作工艺，以及将高转换效率与低成本统一起来。

晶硅太阳能电池虽然占据市场份额很大，但是它材料消耗量大，制作成本较高。2019 年，杨长庆等人[8]为了降低成本，开发了一种新的技术，即多晶硅离子喷溅技术，使材料厚度大大降低，同时这种技术制作的太阳能电池光稳定性很好。传统的硅基太阳能电池的硅片光滑，容易对光形成反射，而硅片表面制绒工艺减少了光的反射，增加了光的吸收，从而提高了太阳能电池的转换效率。

Dinesh Kumar 等人[9]利用硅纳米材料制作太阳能电池，它们通过湿法合成硅纳米线(SiNWs)，并用化学蚀刻法将其集成在硅太阳电池中用于制造电池。这种基于 SiNW 阵列作为电极的方法将太阳能电池的短路电流密度(J_{sc})提高了 25－30%。然而，J_{sc}的增加并未提高太阳能的转换效率，需要进一步考虑 SiNW 的形成、扩散等因素的影响。2019 年，王伟丽等人[10]通过实验发现硅纳米线具有很好的陷光作用，于是利用反射率低的硅纳米线与高导电的 PEDOT：PSS 制备了杂化太阳能电池。通过控制

PEDOT：PSS 与硅纳米线的静置时间，改善了异质结的结构。当时间为 2 min 时电池性能最佳，这种工艺降低了硅基太阳能电池的制备成本，为硅基太阳能电池的发展提供了新途径。

近些年来，制作多结结构太阳能电池被认为是改善太阳能电池性能的有效途径。2020 年，Afrasiaba 等人[11] 模拟了由高和低带隙材料组成的多结太阳能电池，其示意图如图 1 所示。MeOTAD/硅制成复合层，氧化锌(ZnO)、硫化镉(CdS) 形成缓冲层，重掺杂的背面用 $n^{++}Si$ 制成表面场层，用于阻止背面的复合，得到的光伏参数为: 开路电压(V_{oc}) = 1.779 V，短路电流密度(J_{sc}) = 20.19mA/cm^2，填充系数(FF) = 82.22%，转换效率(η) = 28.50%。高温对电池的影响很小，比传统的多结结构显示出更好的性能。这样的设计为以后的太阳能电池提供了更多的选择。

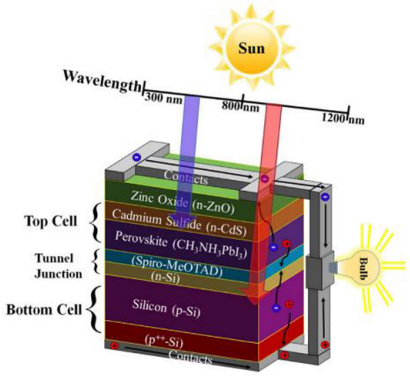

图 1　多结太阳能电池示意图

Fig. 1 Schematic view of the proposed tandem solar cell[11]

Malik Abdul Rehman 等人[12] 发展了一种基于垂直石墨烯纳米丘(VGNH) 的太阳能电池。这种 VGNH 结构是在不使用催化剂的情况下直接生长的。电池结构中含有 VGNH/Si 和 VGNH/Al_2O_3/Si，p 型掺杂 PEDOT-PSS 可使器件的转换效率得到提高。VGNH 比传统的石墨烯厚，但由于其特殊的垂直结构具有高的透射率，结合高吸收率和低电阻率，该类太阳能电池可以产生更多的光生载流子。

2　薄膜太阳能电池

薄膜太阳能电池是缓解能源危机的新型光伏器件，可以利用价格低廉的陶瓷、石墨、金属片等不同材料当基板来制造。由于其较低的材料用量和较高的转换效率而受到青睐。薄膜太阳能电池主要包括非晶硅(α-Si) 薄膜太阳能电池、铜铟镓硒化物(CIGS) 薄膜太阳能电池和碲化镉(CdTe) 薄膜太阳能电池。CIGS 和 CdTe 的组件转换效率几乎可以与多晶硅太阳能电池相媲美[13]。α-Si 因其转换效率低、光致降解等缺点，在陆地应用中几乎绝迹。CIGS 和 CdTe 薄膜太阳能电池占有一定的市场份额。在薄膜太阳能电池用于构建集成光伏系统之前，必须满足长寿命、可靠性、高的消费者认可度和更大的市场投资几个条件。虽然晶硅技术能够满足高转换效率的目标，但薄膜可以同时满足高转换效率和低材料成本的目的。

2.1　CIC(Cd，Ga)S 太阳能电池

由于 CICS 太阳能电池含 Cd，且 Cd 是有害金属，所以最近人们正在研究无 Cd 的 CICS 薄膜太阳能电池。有人用 ZnS 代替 Cd 做缓冲层，但是利用此种方法会降低太阳能电池的转换效率。屈飞等人[14] 结合了这两种方法，提出了 CdS-Zn 的复合缓冲层，这种缓冲层满足了对可见光高透过的大带隙缓冲层，经实验证明沉积 2 min 的 CdS-Zn 复合缓冲层对 300 ~ 600 nm 的光具有很高的透过率。M. Boubakeur[15] 等人利用数值模拟程序研究了超薄 CIGS 太阳电池的吸收层厚度于 CIGS 薄膜中元素占比 Mo/Si/CIGS/ZnS/ZnO 结构性能的影响。结果发现，镓含量的变化会影响光学性质，如吸收和反射系数，当吸收层厚度减小到 0.75 μm 时，镓含量的最佳值等于 20%，实现了转换效率 η = 21.08%。并且，当减少 CIGS 薄膜厚度还会降低太阳能电池成本。

2.2　CdTe 薄膜太阳能电池

CdTe 已成为薄膜光伏市场的主要使用者。CdTe 薄膜的禁带宽度为 1.45eV，能很好的吸收太阳光[16]。当然，合适的背接触仍然是实现高效 CdTe 薄膜太阳电池的关键问题之一。2020 年，Kai Shen 等人[17] 对沉积态 CdTe 薄膜太阳电池进行了系统的对比研究，发现 ZnTe: Cu 缓冲液可以减少背面接触处的肖特基势垒。结合热处理工艺，ZnTe: Cu/Au 有效地激活了反向接触。通过详细的表征和分析，发现界面性质发生了变化: ZnTe: Cu/CdTe 在热处理过程中，界面形成了 Cu_xTe 层。改性后的

界面组成和能带排列降低了缺陷相关的复合，促进了后接触处的空穴传输。这些结果为进一步研究 ZnTe:Cu 接触以及 CdTe 结构的界面特性提供了重要的依据，并为进一步提高 CdTe 电池的性能提供了新的设计策略。

2.3 多结薄膜太阳能电池

近些年来，为了提高薄膜太阳能电池的转换效率，多结太阳能电池技术开始发展，如四结 AlGaInP/AlGaAs/$In_{0.17}Ga_{0.83}As$/$In_{0.47}Ga_{0.53}As$ 的太阳能电池[18]，它们的带隙能分别为 1.92eV、1.53eV、1.18eV、0.82eV，电池横截面图如图 2 所示[18]。为了适应两个 InGaAs 子单元之间的晶格失配，在倒变质(IMM) 4 结太阳电池生长过程中，可采用成分梯度的 AlGaInAs 缓冲层来释放失配应变。目前已经在 50μm 厚的聚酰亚胺(PI) 薄膜上采用临时键合和选择性湿化学腐蚀剥离外延层的方法成功制备了柔性 4 结太阳电池。此太阳能电池的转换效率为 25.76%(AM1.5，开路电压为 3.46V、短路电流密度为 9.07mA/cm^2，在不加防反射涂层(ARC) 的情况下，填充系数为 82.14%，而电弧积分法得到的抗反射涂层比例将高于 32%。4 结柔性太阳电池的质量密度只有 467 g/m^2，比功率高达 550 W/kg。

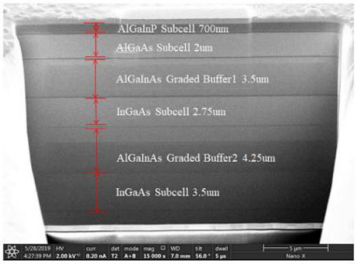

图 2 4 结 IMM 太阳能电池的横截面 FIB-SEM 图像

Fig. 2 Cross-sectional FIB-SEM image of the 4 J IMM solar cell[18]

3 钙钛矿太阳能电池

钙钛矿太阳能电池是最具发展前景的太阳能电池之一，由有机-无机混合卤化物组成，通常被定义为 ABX_3，其中 A 和 B 是阳离子，具有不同的大小(A 大于 B)，X 代表阴离子[19-20]。钙钛矿太阳能电池的制备方法十分丰富，如喷涂热解、浸渍涂层、两步互扩散、化学气相沉积、喷墨打印、旋转涂层、原子层沉积、涂层沉积等[21]。

3.1 钙钛矿太阳能电池的稳定性

尽管钙钛矿太阳能电池具有很大的发展前景，使用这种技术的主要阻碍是钙钛矿太阳能电池(PSCs) 的稳定性较低，相关研究越来越受到人们的关注。为了提高稳定性，必须考虑多种影响因素，包括 HTM 层和电极材料制备、晶体结构设计、钙钛矿的组成、界面工程、薄膜制备方法、模块技术和封装方法等。

据报道，在器件内部不同界面上会同时出现几种钙钛矿层降解现象[22]。这些降解可能是由于水分、紫外线照射、温度升高和暴露在环境大气中的原因，导致材料内部晶体结构不稳定、光降解、有机层氧化和顶电极不稳定，也可能是不存在水或氧时的热应力或光照引起的固有降解所致。

3.2 钙钛矿太阳能电池研究进展

钙钛矿太阳能电池具有主导现代光伏市场的潜力，特别是随着其转换效率和性能的快速提高，这种潜力更加明显。为了创造高效太阳能电池，Monteiro lunardi 等人建议钙钛矿与硅太阳能电池耦合[23]。

3.2.1 石墨烯对钙钛矿太阳能电池转换效率的改善

为了提高钙钛矿太阳能电池转换效率，许多人从钙钛矿太阳能电池的结构出发进行研究。近些年，随着石墨烯材料的兴起，钙钛矿太阳能电池转换效率也有了新的提升空间。目前，钙钛矿太阳能电池的电极材料一般使用 ITO 材料，ITO 是透明导电材料，而石墨烯材料本身具有更好的导电性和透光性，所以用它可以替代 ITO 材料作为钙钛矿太阳能电池的电极，从而提高钙钛矿太阳能电池转换效率。Sung[24] 等人利用化学沉积法(CVD) 制备石墨烯，并将其作为钙钛矿太阳能电池的阳极，缓冲层材料用 MoO_3 和 PEODT：PSS，同时它们也是电极修饰材料，以提高电极性能。经过实验测定，当 MoO_3 为 2nm 时，石墨烯电极具有最佳性能，此时太阳能电池的短路电流和开路电压较高，实验室光电转换效率约为 17.1%。将石墨烯材料作为钙钛矿太阳能电池组的空穴传输材料，也可以提高钙钛矿太阳能电池的性能[25]。王云祥[26] 等人利用 Hummers 法制备氧化石墨烯，用氧化铟锡(ITO) 作为阳极，Ag 作为阴极，将经过特殊处理的氧化石墨烯作为空穴传输层。但由

于其电阻太大，它的光电转换率最高仅为 7.35%。根据这次试验的结果证明将氧化石墨烯材料作为空穴传输材料仍有待商榷。

3.2.2 背接触钙钛矿太阳电池

改性后接触钙钛矿太阳电池的 PCE 性能优于报道的后接触结构电池和传统的 p-i-n 结构电池。最新结果表明，优化后的背接触钙钛矿太阳电池的 PCE 为 28.27% [27]。

TiO_2基钙钛矿太阳能电池(PSC) 有利于提高转换效率，但紫外光区稳定性较差。$Mg_xZn_{1-x}O$ 基(MZO 基) PSC [28]，具有优异的紫外光稳定性。与传统的 TiO_2相比，MZO 具有更高的电子迁移率和更深的导带，可以减少 MZO/钙钛矿界面的电荷积累，增强钙钛矿向 MZO 的电荷转移。此外，降低界面损耗和能量势垒有利于获得更高的开路电压(V oc) 。MZO 基器件的 Voc 值可高达 1.11V，转换效率高达 19.57%，在 1 年空气老化(室温，相对湿度: 40% ~ 80%) 和 8 小时紫外线照射(365 nm，35 W) 后仍保留 76% 的初始 J_{sc}，而在相同条件下，TiO_2基器件仅保留 12% 的初始 J_{sc}。MZO 基器件具有良好的紫外光稳定性，这可能是由于 MZO 的锌间隙和氧空位介导的缺陷位置被有效钝化，从而保护钙钛矿不被降解。

3.2.3 空穴传输层结构的设计

Elnaz Ghahremanirada 等人介绍了 [29] 一种新型钙钛矿太阳电池的设计方案，并对其进行了模拟计算，以增强钙钛矿太阳电池的性能钙钛矿太阳能电池的性能，并分别用 NiO 和 ZnO 作为无机 p 型和 n 型载流子的传输层，结合等离子体技术提高了锌黄锡矿结构钙钛矿太阳电池的吸收率。通过引入近场吸收层的等离子体增强空穴输运的锌黄锡矿结构来提高光的吸收，这使钙钛矿吸收层可以对光进行更好的限制。在没有任何光阱结构的情况下，使裸平板钙钛矿太阳电池的吸收光谱展宽，外量子效率提高 29%。p-i-n 钙钛矿太阳电池的空穴传输层(HTL) 通常由 NiO_x组成。然而，为了获得良好的空穴传输特性，NiOx 需要在 300 ℃下处理 15 min。如此长的加热时间阻碍了连续工业过程的发展。因此，快速加热制备 NiO_x薄膜是实现 PVSCs 商业化的关键。LEE Pei-huan [30] 采用短波近红外光源，在 2500 k 下，系统地研究了近红外强度对溶胶-凝胶 NiO_x薄膜质量的影响。NIR-NiO_x(NIR-NiO_x) 薄膜制备的 PVSCs 具有与传统热板退火 NiO_x(HP-NiO_x) 薄膜相似的转换效率。此外，他们还合成了近红外退火钴掺杂 NiO_x(NIR-Co: NiO_x)，以取代原始的 NiO_x。利用这种新型 NiOx 薄膜制备的 PVSCs 的 PCE 从 15.99% 提高到 17.77%，这是由于有效的空穴提取降低了界面电阻而导致的 V_{oc}损失。

3.2.4 钙钛矿太阳能电池的稳定性

抗湿不稳定性 [31] 是阻碍金属卤化物钙钛矿太阳能电池应用的主要问题之一。利用薄膜封装的方法来提高钙钛矿太阳能电池在潮湿环境下的运行稳定性是一种可行的方法。然而，具有理想气体阻隔性能的封装层往往需要高温和有害前驱体的苛刻制备条件。为此，WANG Hao-ran [31] 提供了一种温和的封装策略，通过使用乙二醇诱导的直接沉积层来保持太阳能电池器件的原始性能，用来减少等离子体、增强的原子层沉积对钙钛矿太阳能电池的损害。有机-无机交替包封结构的水蒸气透过率仅为 $1.3\times10^{-5}g\cdot m^{-2}\cdot 天^{-1}$，这是所报道的薄膜包封结构中的透水率最低的钙钛矿太阳能电池层。钙钛矿太阳能电池在 80% 的相对湿度和 30℃下存放了 2000 多个小时，还保持了 96% 的初始性能。

4 展望

目前，硅基太阳能电池相关技术已经成熟，但是这种电池的用料太多，成本高，且它的转换效率很难继续提高。而薄膜太阳电池的用料少，其转换效率还有提升空间。钙钛矿太阳能电池价格低廉，理论转化效率高，但是由于它的不稳定性，致使它还无法在实际中应用。未来，研究人员们将会更加深入地研究提高其稳定性的方法。

参考文献:

[1] Green M A. Progress in Photovoltaics [J]. Research & Applications, 2001, 9(2): 123-135.

[2] Chapin M, Fuller S, Pearson L. Anew silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power [J]. Appl. Phys, 1954, 25: 676-700.

[3] 邓庆维，黄永光，朱洪亮. 25% 效率晶体硅基太阳能电池的最新进展 [J]. 激光与光电子学进展. 2015，110002.

[4] Zhao J, Wang A, Green M A. 24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates [J]. Prog Photovoltaics: Res Appl, 1999, 7(7): 471-474.

[5] Green M A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2009, 17(3): 183-189.

[6] Kunta Y, Hayato K, Waratu Y, et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% [J]. Nature Energy, 2017: 17032.

[7] ZHANG Li-dian, SHEN Hong-lie, YUE Zhi-hao. The preparation and performance of the polycrystalline silicon antireflection coat [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0631002.

[8] 杨长庆. 薄膜太阳能电池技术的新突破 [J]. 轻工科技, 2019, 35(1): 55-56.

[9] Dinesh Kumar, Sanjay K, Srivastava, et al. Fabrication of silicon nanowire arrays based solar cell with improved performance [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95: 215 - 218

[10] 王伟丽. 硅与聚合物太阳能电池性能提升的研究 [J]. 厦门城市职业学院学报, 2019, 21(3): 73-77.

[11] Afrasiaba, Aimal Daud Khanb, Fazal E. Subhana, et al. Optimization of efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cell [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 208: 164573.

[12] Malik Abdul Rehman, Sanjib Baran Roy, Dham Gwak, et al. Solar cell based on vertical graphene nano hills directly grown on silicon [J]. Carbon, 2020, 16: 235-243.

[13] Shah Arvind, et al. Photovoltaic technology: the case for thin-film solar cells [J]. science, 1999, 285(5428): 692-698.

[14] 屈飞, 李辉, 古宏伟, 张贺. CIGS 太阳能电池 CBD-CdS/Zn(S,O) 复合缓冲层的研究 [J]. 稀有金属, 2018, 42(11): 1172-1177.

[15] M. Boubakeur, A. Aissat, M. Ben Arbia, H, et al. Enhancement of the efficiency of ultra-thin CIGS/Si structure for solar cell [J]. Super lattices and Microstructures, 2019, 138: 106377.

[16] 肖友鹏. CdTe 薄膜太阳能电池结构分析 [J]. 电力科技, 2014, 25: 177-178.

[17] SHEN Kai, WANG Xiao-qing, ZHANG Yu, et al. Insights into the role of interface modification in performance enhancement of ZnTe: Cu contacted CdTe thin film solar cells [J]. Solar Energy, 2020, 201: 55-62.

[18] HUANG Xin-ping, LONG Jun-hua, WU Dong-ying, et al. Flexible four-junction inverted metamorphic AlGaInP/AlGaAs/$In_{0.17}Ga_{0.83}As$/$In_{0.47}Ga_{0.53}As$ solar cell [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells , 2020, 208: 110398.

[19] Green MA, Ho-Baillie A, Snaith HJ. The emergence of perovskite solar cells [J]. Nat Photonics, 2014, 8: 506-514.

[20] Liu M, Johnston M B, Snaith H J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour deposition [J]. Nature, 2013, 501: 395-398.

[21] Emami S, Andrade L, Mendes A. Recent progress in long-term stability of perovskite solar cells [J]. UPorto J Eng, 2015, 1(2): 52-62.

[22] Edri E, Kirmayer S, Henning A, et al. Why lead methylammonium tri-iodide perovskite-based solar cells require a mesoporous electron transporting scaffold (but not necessarily a hole conductor) [J]. Nano Lett, 2014, 14: 1000-1004.

[23] Monteiro Lunardi M, Wing Yi Ho-Baillie A, Alvarez-Gaitan J, et al. A lifecycle assessment of perovskite/silicon tandem solar cells [J]. Prog Photovoltaics, 2017, 25(8): 679-695.

[24] Sung H, Ahn N, Jang MS, et al. Transparent conductive oxide free graphene based perovskite solar cells with over 17% efficiency [J]. Advanced Energy Materials, 2016, 6(3): 1501873.

[25] SHI Jiang-jian, LI Yi-ming. From ultrafast to ultraslow charge-carrier dynamics of perovskite solar cells [J]. Joule, 2018, 2(5): 879-901.

[26] 王云祥, 张继华, 吴艳花等. 基于氧化石墨烯空穴传输层的钙钛矿太阳能电池 [J]. 光子学报, 2019, 48(3):0316001.

[27] Fang, G, Tian, H, Chang, W, et al. Optimized Analysis of Back-Contact Perovskite Solar Cells Architectures [J]. Optik, 2020, 167: 164362.

[28] HAN Fei, WANG Zhong-quan, LUO Jun-sheng, et al. Planar $MgxZn_{1-x}O$-based perovskite solar cell with superior ultraviolet light stability [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2020, 208: 110417.

[29] Elnaz Ghahremanirada, Saeed Olyaeea, Bahram Abdollahi Nejandb, et al. Improving the performance of perovskite solar cells using kesterite mesostructure and plasmonic network [J]. Solar Energy, 2018, 169: 498 - 504.

[30] LEEPei-huan, LI Bo-ting, LEE Chia-feng, et al. High-efficiency perovskite solar cell using cobalt doped nickel oxide hole transport layer fabricated by NIR process [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2020, 208: 110352.

[31] WANG Hao-ran, ZHAO Ye-pin, WANG Zhen-yu, et al. Hermetic Seal for Perovskite Solar Cells: An Improved Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition Encapsulation [J]. Nano Energy, 2019, 69: 104375.