

# 柔性太阳电池发展研究

王辉<sup>1</sup>, 曹越先<sup>1</sup>, 冯江山<sup>2</sup>, 杜敏永<sup>1</sup>, 张豆豆<sup>1</sup>, 王开<sup>1</sup>, 秦炜<sup>1</sup>, 刘生忠<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁大连 116023; 2. 陕西师范大学, 西安 710119)

**摘要:** 柔性太阳电池可应用在卫星、飞艇、无人机、单兵装备、光伏建筑一体化以及可穿戴智能设备上, 极具发展前景。本文介绍了柔性硅薄膜太阳电池、柔性碲化镉太阳电池、柔性铜铟镓硒太阳电池和柔性钙钛矿太阳电池的电池结构、制备方法和发展现状, 分析了柔性太阳电池效率提升以及产业化过程中存在的问题, 并从柔性衬底选择、电池效率提升、产业化装备制造等几个方面, 对柔性太阳电池下一步发展提出了建议。

**关键词:** 柔性太阳电池; 硅薄膜; 铜铟镓硒; 碲化镉; 钙钛矿

**中图分类号:** TM914.4<sup>2</sup> **文献标识码:** A

## Research on the Development of Flexible Solar Cells

Wang Hui<sup>1</sup>, Cao Yuexian<sup>1</sup>, Feng Jiangshan<sup>2</sup>, Du Minyong<sup>1</sup>, Zhang Doudou<sup>1</sup>, Wang Kai<sup>1</sup>,  
Qin Wei<sup>1</sup>, Liu Shengzhong<sup>1,2</sup>

(1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China;

2. Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Flexible solar cells could be applied in fields such as satellites, airships, drones, individual soldier equipment, building integrated photovoltaics (BIPV), and wearable smart devices, which indicates great prospects. This paper introduces cell structures, fabrication methods and current statuses of four types of flexible solar cells respectively, including the flexible silicon thin film solar cell, the flexible CdTe solar cell, the flexible CIGS solar cell, and the flexible perovskite solar cell. This paper also analyses the key issue of efficiency improvement and the main problems in the industrialization of the flexible solar cells. Ultimately, the paper proposes suggestions from aspects of substrate development, efficiency improvement and industrial fabrication.

**Keywords:** flexible solar cell; silicon thin film; CIGS; CdTe; perovskite

### 一、前言

当前, 太阳电池发展的趋势是薄膜化和柔性化。相比于晶体硅太阳电池, 薄膜太阳电池所需原材料更少、能耗更低、成本更低。此外, 薄膜太阳电池可制备在金属箔和塑料衬底上, 形成柔性太阳电池。

柔性太阳电池具有重量轻、可弯曲、便于携带和运输等优点, 可应用在卫星、飞艇、无人机、单兵装备等国防军工领域, 以及光伏建筑一体化、可穿戴智能设备等民用领域, 具有广阔的市场前景 [1]。

目前, 已经商业化的薄膜太阳电池有硅薄膜太阳电池、碲化镉太阳电池和铜铟镓硒太阳电池, 这

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2018-05-31

通讯作者: 刘生忠, 中国科学院大连化学物理研究所, 研究员, 主要研究方向为高效薄膜太阳电池; E-mail: liusz@snnu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09); 创新知识工程项目(Y261261606)

本刊网址: www.enginsci.cn

三种商业化的薄膜太阳能电池均以玻璃为衬底。此外,需要特别指出的是,钙钛矿薄膜太阳能电池是最近薄膜太阳能电池研究的热点。短短9年时间,电池效率从2009年的3.8%[2],提升到现在的22.7%,极具商业化发展潜力。以上四种薄膜太阳能电池均可制备在金属箔和塑料衬底上,形成柔性太阳能电池。本文将分别介绍不同种类柔性太阳能电池的发展现状、存在的问题以及发展的建议。

## 二、柔性太阳能电池的发展现状

目前,柔性太阳能电池主要有柔性硅薄膜太阳能电池、柔性铜铟镓硒太阳能电池、柔性碲化镉太阳能电池和柔性钙钛矿太阳能电池,可用作柔性衬底的材料主要有金属箔(不锈钢、钼、钛、铝、铜等)和塑料(PI、PEN、PET等)。其中,已经有商业化组件的电池是柔性硅薄膜太阳能电池和柔性铜铟镓硒太阳能电池。

### (一) 柔性硅薄膜太阳能电池

硅薄膜太阳能电池是最早进行研究并实现商业化的薄膜太阳能电池。由于硅薄膜带隙在1.1~1.7 eV范围内可调,能够吸收不同波段的太阳光。因此,硅薄膜太阳能电池可制备成单结或多结太阳能电池。

硅薄膜太阳能电池可制备在不锈钢和塑料衬底上,形成柔性硅薄膜太阳能电池。根据衬底的透明

度不同,柔性衬底硅薄膜太阳能电池结构可分为nip型或pin型,电池结构如图1所示。效率最高的柔性硅薄膜太阳能电池是由美国United Solar公司在不锈钢衬底上制备的,最高效率是16.3%[3],面积是0.25 cm<sup>2</sup>;效率最高的柔性硅薄膜太阳能电池组件孔径效率是8.2%,功率是144 W[4],也是由美国United Solar公司制备的。目前,还没有塑料衬底硅薄膜太阳能电池组件问世。

#### 1. 金属衬底柔性硅薄膜太阳能电池

硅薄膜太阳能电池可沉积在不锈钢上,形成金属衬底柔性硅薄膜太阳能电池。由于不锈钢衬底不透明,电池结构为nip结构。美国United Solar公司是最早研究不锈钢衬底柔性硅薄膜太阳能电池的公司,也是唯一实现柔性不锈钢衬底硅薄膜电池商业化的公司。该公司于2002年建立了生产线,产品的孔径效率只有8.2%,之后,该公司制备的a-Si:H/a-SiGe:H/nc-Si:H三结电池,初始效率为16.3%,是效率最高的柔性硅薄膜太阳能电池。

为了进一步提高电池的稳定性 and 降低生产成本,时任United Solar公司高级科学家刘生忠及其团队,采用高速沉积(>1 nm/s)制备的a-Si:H/nc-Si:H/nc-Si:H三结电池,稳定效率为12.41%,面积为1.05 cm<sup>2</sup>。之后,该团队进一步优化电池工艺,制备了大面积电池组件[5],面积为400 cm<sup>2</sup>组件的稳定效率为11.2%,面积为807.8 cm<sup>2</sup>组件的初始效率为11.8%,电池实物图如图2所示。

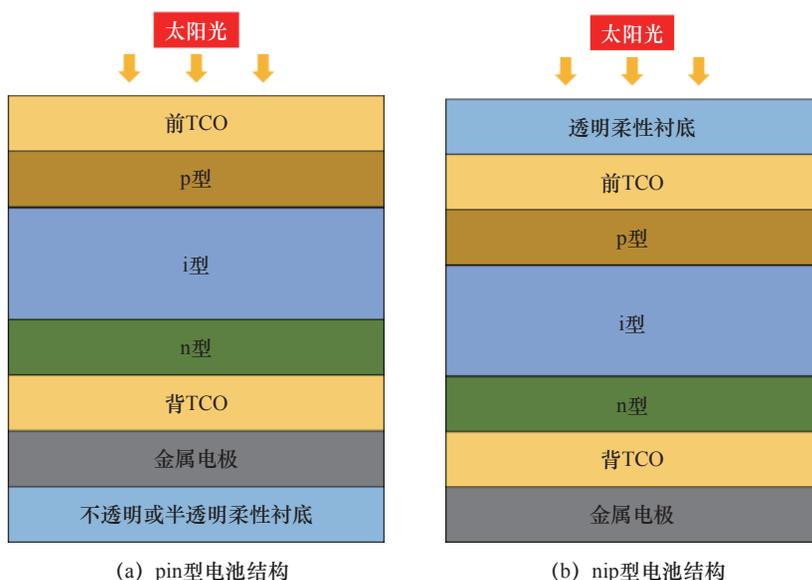


图1 柔性硅薄膜太阳能电池结构图

注: TCO: 透明导电氧化物。

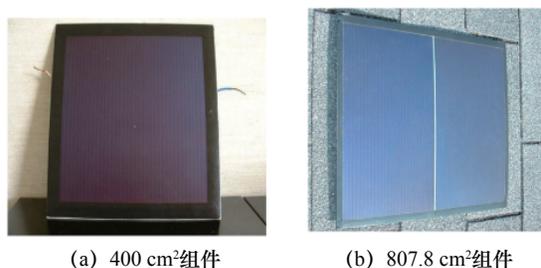


图2 大面积柔性硅薄膜太阳电池组件实物图

中国科学院大连化学物理研究所刘生忠团队，在 30 μm 厚的不锈钢衬底上，制备的 a-Si:H/nc-Si:H 双结电池组件，效率为 11% [6]，面积为 200 cm<sup>2</sup>，这是国内最好的不锈钢衬底柔性硅薄膜太阳电池组件。

### 2. 塑料衬底柔性硅薄膜太阳电池

可做柔性衬底的塑料有 PI、PET 和 PEN。在这三种材料中，PI 的玻璃态转换温度最高（450 °C），PET 的玻璃态转换温度最低（80 °C），但是 PET 的透过率最好，成本最低。所以，以 PI 和 PEN 为衬底制备硅薄膜太阳电池，电池结构为 nip 结构；以 PET 为衬底制备硅薄膜太阳电池，电池结构可为 nip 或 pin 结构。

#### (1) nip 结构柔性硅薄膜太阳电池

Haug 等 [7] 在 50 μm 厚的 PET 和 PEN 衬底上制备了小面积 nip 型单结非晶硅、单结纳晶硅以及双结太阳电池。制备的非晶硅单结电池效率为 8.1%，纳晶硅单结电池效率为 8.7%，双结电池效率为 10.9%。Sodeestorm 等 [8] 在 PEN 衬底上制备的 nip 非晶硅单结电池效率为 8.8%。Marins 等 [9] 在 125 μm 厚的 PI 衬底上制备的微晶硅单结电池效率为 7.5%。Liu 等 [10] 采用转移衬底技术制备非晶硅单结电池，制备的 nip 非晶硅单结电池效率为 7.69%，小组件效率为 6.7%。Li 等 [11] 也采用转移衬底技术制备柔性双结太阳电池，小面积电池效率为 7.8%，面积为 0.16 cm<sup>2</sup>；小组件效率为 7.4%，面积为 25 cm<sup>2</sup>。

#### (2) pin 结构柔性硅薄膜太阳电池

Fenández 等 [12] 以 250 μm 厚的 PET 为衬底，制备了 pin 型单结非晶硅太阳电池，研究表明，当采用较低的沉积功率制备掺铝氧化锌（AZO）膜层时，电池的开路电压和填充因子较大，电池效率为 5.14%。

## (二) 柔性铜铟镓硒太阳电池

铜铟镓硒是一种直接带隙材料，可见光的吸收系数高达 10<sup>5</sup> cm<sup>-1</sup> 数量级，通过调节薄膜中 In 和 Ga 两种元素的比例，带隙宽度可以在 1.04~1.67 eV 范围连续调节。

铜铟镓硒太阳电池可沉积在金属或塑料衬底上，形成柔性铜铟镓硒太阳电池，电池结构如图 3 所示。在电池方面，效率最高的金属衬底柔性铜铟镓硒太阳电池是日本青山学院大学（AGU）在 Ti 衬底上制备的，电池效率为 17.9%，效率最高的塑料衬底柔性铜铟镓硒太阳电池是瑞士联邦材料测试与开发研究所（EMPA）在 PI 衬底上制备的，电池效率为 20.4%；在组件方面，效率最高的柔性铜铟镓硒太阳电池组件是 Miasole 公司在不锈钢衬底上制备的，孔径效率为 16.7%，面积为 2585 mm×1293 mm，功率为 510 W，重量为 6.6 kg。目前，还没有以塑料为衬底的柔性铜铟镓硒太阳电池组件问世。

### 1. 金属衬底柔性铜铟镓硒太阳电池

可用作柔性铜铟镓硒太阳电池金属衬底的有不锈钢、钼、钛、铝、铜等。1992 年，美国国际太阳能技术集团（ISET）以 Mo 为衬底，制备的电池效率为 8.3% [13]；2010 年，日本产业综合技术研究所（AIST）在金属 Mo 衬底上，制备的电池效率为 14.6% [14]；2000 年，德国巴登符腾堡太阳能和氢能研究中心（ZSW）在 Ti 衬底上制备的电池效率为 12% [15]；2009 年，AGU 在 Ti 衬底上，制备的电池效率为 17.9% [16]；德国法兰克福太阳能技术研究所（IST）在 Cu 衬底上制备的电池效率

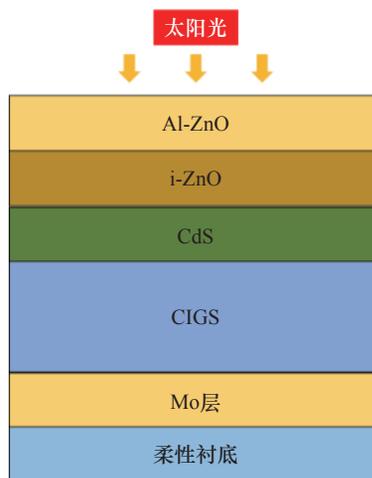


图3 柔性铜铟镓硒太阳电池结构图

低于 10%[17]; 1999 年, 美国国家可再生能源实验室 (NREL) 在不锈钢衬底上, 制备的电池效率为 17.4%[18]; 2012 年, EMPA 在镀 Ti 的不锈钢衬底上, 制备的铜铟镓硒电池效率为 17.7%[19]; Nano-Solar 和 EMPA 在 Al 衬底上制备的电池最高效率为 17.1%。在组件方面, 效率最高的柔性铜铟镓硒太阳能电池组件是 Miasole 公司在不锈钢衬底上, 制备的铜铟镓硒电池组件, 孔径效率为 16.7%, 面积为 2 585 mm×1 293 mm。

### 2. 塑料衬底柔性铜铟镓硒太阳能电池

目前, 只有 PI 衬底可以作为柔性铜铟镓硒太阳能电池衬底。1996 年, ISET 在 PI 衬底上制备的电池效率为 8.7%[20]; 1999 年, EMPA 在 PI 衬底上制备的电池效率为 12.8%; 2011 年, EMPA 又将电池效率提升为 18.7%[21], 并将 8 个子电池集成制作了一个 PI 衬底小组件, 效率为 14.8%, 电池实物图如图 4 所示; 2013 年, EMPA 又将 PI 衬底柔性铜铟镓硒电池效率提升为 20.4%。

## (三) 柔性碲化镉太阳能电池

碲化镉 (CdTe) 材料是一种直接带隙材料, 光学带隙为 1.45 eV, 光吸收系数高 [22], 2 μm 厚的碲化镉材料可吸收 100% 的太阳光 [23]。并且, 在质子和电子辐射下, 材料性能非常稳定。

碲化镉太阳能电池可制备在柔性金属或塑料衬底上, 形成柔性碲化镉太阳能电池。效率最高的金属衬底柔性碲化镉太阳能电池是 EMPA 在金属钼衬底上制备的, 效率为 11.5%, 效率最高的塑料衬底柔性碲化镉太阳能电池也是 EMPA 在 PI 衬底上制备的, 效率为 13.8%, 这两种电池都是小面积电池。目前,

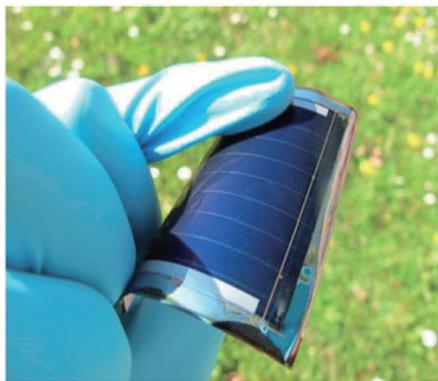


图 4 效率为 14.8% 的 PI 衬底柔性铜铟镓硒小组件实物图

还未有任何柔性碲化镉太阳能电池组件问世。

### 1. 金属衬底柔性碲化镉太阳能电池

金属衬底柔性碲化镉太阳能电池的电池结构如图 5 所示。金属衬底碲化镉太阳能电池效率普遍较低, 一般在 3.5%~8%。直至 2013 年, EMPA 通过调节 CdTe 中的 Cu 掺杂含量, 获得效率为 11.5% 的钼衬底碲化镉太阳能电池。

### 2. 塑料衬底柔性碲化镉太阳能电池

塑料衬底具有一定的透光性, 因此, 可分为上衬底和下衬底两种柔性碲化镉太阳能电池, 电池结构如图 6 所示。然而, 对于上衬底结构电池, 光需要通过塑料衬底进入到电池中, 因此塑料衬底的透光性也是一个考虑因素。

#### (1) 塑料衬底 (上衬底结构) 柔性碲化镉太阳能电池

EMPA 以 10 μm 厚的聚酰亚胺薄膜 (Upilex™) 为衬底制备了上衬底结构的柔性碲化镉太阳能电池, 制备结构如图 7 所示。该方法制备的柔性碲化镉太阳能电池效率为 11.38%。相比玻璃衬底碲化镉太阳能电池, 聚酰亚胺的透光率较低, 因此, 进一步提高聚酰亚胺的透光率是该结构电池下一步研究的重点。

#### (2) 塑料衬底 (下衬底结构) 柔性碲化镉太阳能电池

相比于塑料衬底 (上衬底结构) 柔性碲化镉太阳能电池, 下衬底结构碲化镉太阳能电池的一个优势就是聚酰亚胺的透光性对电池性能没有影响。EMPA 采用商业化的聚酰亚胺薄膜 (Upilex™) 制备下衬底结构柔性碲化镉太阳能电池, 制备流程如图 8 所

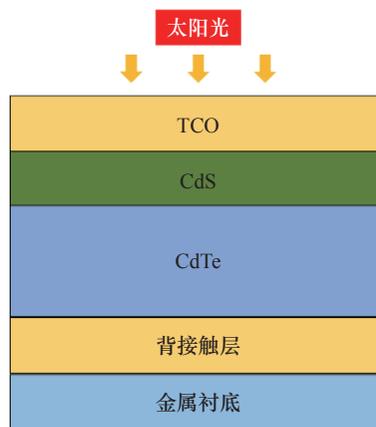


图 5 金属衬底柔性碲化镉太阳能电池结构图

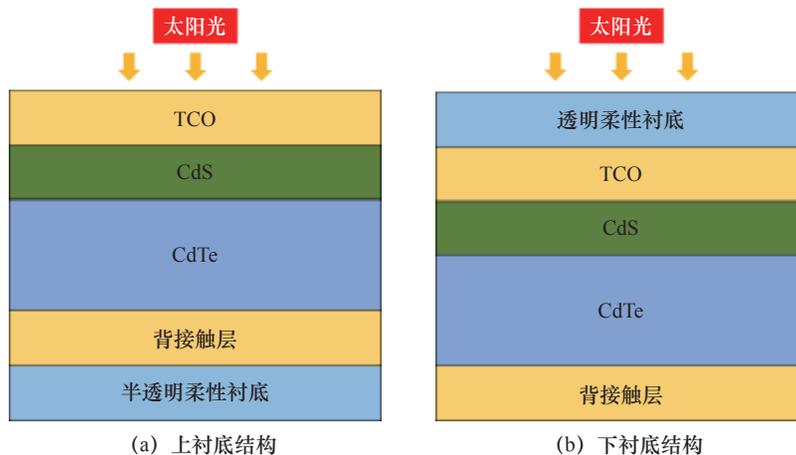


图6 塑料衬底柔性碲化镉太阳电池结构图

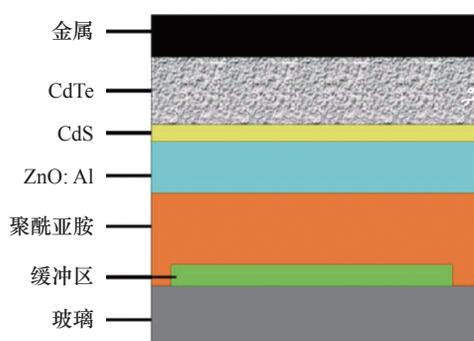


图7 上衬底结构柔性碲化镉太阳电池制备结构图

示。采用这种方法，分别获得了效率为 7.3% 和 6% (TCO 分别为 FTO 和 AZO) 的柔性碲化镉太阳电池。因此，在未来通过优化电池工艺可以制备更高效率的电池。

#### (四) 柔性钙钛矿太阳电池

钙钛矿太阳电池是太阳电池最近研究的热点。自 2009 年制备出第一个钙钛矿太阳电池，短短 9 年时间内，电池效率从 3.8% 提升到 22.7%，并且由于制备工艺简单，原材料成本低廉，极具商业化潜力，并有可能取代晶体硅太阳电池。

钙钛矿电池也可制备在塑料和金属衬底上，形成柔性钙钛矿电池。根据钙钛矿层基底不同，柔性钙钛矿太阳电池可分为 nip 型和 pin 型两种结构 [24]，电池结构如图 9 所示。目前，效率最高的柔性钙钛矿太阳电池，是中国科学院大连化学物理研究所与陕西师范大学刘生忠团队在 PET 衬底上制备的，电池效率为 18.4% [25]。

##### 1. 塑料衬底柔性钙钛矿太阳电池

在塑料衬底上，可制备 nip(正式)结构或 pin(反式)结构的柔性钙钛矿太阳电池。柔性钙钛矿太阳电池的塑料衬底一般为 PET、PEN 等聚酯塑料，不能承受高温。因此，采用低温制备 TiO<sub>2</sub> 薄膜或其他电子传输层是塑料衬底柔性钙钛矿太阳电池首要考虑的问题。

##### (1) nip 结构塑料衬底柔性钙钛矿太阳电池

Giacomo 等 [26] 在 PET/ITO 衬底上实现低温 (150 °C) 制备 TiO<sub>2</sub>，电池效率为 8.4%，面积为 0.12 cm<sup>2</sup>；Kim 等 [27] 在 PEN/ITO 衬底上制备致密 TiO<sub>x</sub> 层，电池效率为 12.2%；2015 年，Yang 等 [28] 在柔性 PET 基底上 (室温下) 制备出具有良好透光性和合适能级的优质 TiO<sub>2</sub> 电子传输层，结合自



图8 下衬底结构柔性碲化镉太阳电池制备流程图

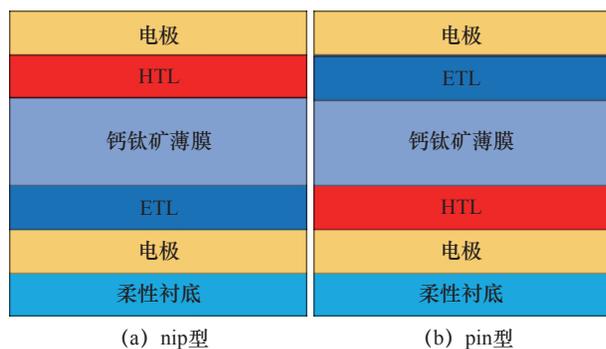


图 9 柔性钙钛矿太阳能电池结构图  
注: HTL: 空穴传输层; ETL: 电子传输层。

主研发的真空交替沉积法制备的柔性钙钛矿电池效率突破世界纪录, 达到 15.07%, 电池实物图如图 10 所示。之后, 该团队通过对  $\text{TiO}_2$  薄膜进行界面修饰, 研制的柔性电池效率达到 16.09% [29]。2017 年, Wang 等 [30] 利用二氧化锡作为电子传输层将柔性钙钛矿太阳能电池效率提高到 18.3%。同年刘生忠团队利用电子束蒸发五氧化二铌作为柔性钙钛矿太阳能电池电子传输层并对钙钛矿吸收层进行修饰得到柔性钙钛矿太阳能电池小面积 ( $0.052 \text{ cm}^2$ ) 效率提高到 18.4%, 大面积 ( $1.2 \text{ cm}^2$ ) 效率提高到 13.35%, 该效率都是现阶段柔性钙钛矿太阳能电池世界最高效率 [25]。

#### (2) pin 结构塑料衬底柔性钙钛矿太阳能电池

柔性钙钛矿电池也可以在 PET、PEN 等塑料上制备为 pin 结构, 基本结构为: 柔性衬底 / 电极 / PEDOT:PSS / 钙钛矿 / PCBM / 电极。Roldán-carmona 等 [31] 在涂有 AZO/Ag/AZO 的 PET 衬底上, 制备的电池效率为 7%。Docampo 等 [32] 在 PET/ITO 衬底上制备了 pin 结构钙钛矿电池, 效率为 6.3%。You 等 [33] 在 PET/ITO 衬底上制备了 pin 结构钙钛矿电池, 效率为 9.5%。总体而言, pin 结构的钙钛矿电池比 nip 结构的电池性能要差。

#### 2. 金属衬底柔性钙钛矿太阳能电池

理论上, 在金属衬底上可以制备 nip 结构和 pin 结构电池, 但是, 由于 PEDOT:PSS 本身具有酸性而且容易腐蚀的电极, 因此, 金属衬底钙钛矿太阳能电池多为 nip 结构。

Lee 等 [34] 在  $127 \mu\text{m}$  厚的金属 Ti 上制备 nip 结构钙钛矿电池, 电池效率最高为 6.15%。Troughton 等 [35] 也在金属 Ti 上制备 nip 结构钙钛矿电池, 电池效率为 10.3%。Wang 等 [36] 在镀有  $\text{TiO}_2$  纳米管的 Ti 衬底上制备了钙钛矿电池, 电池效率

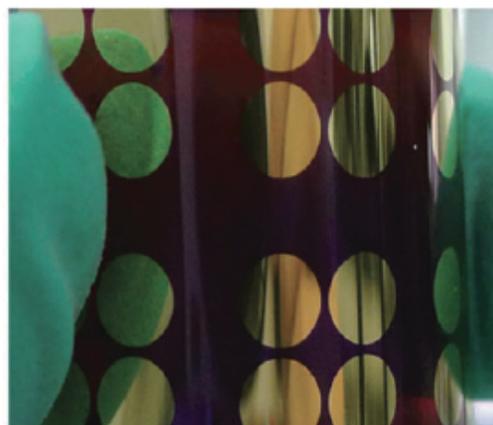


图 10 效率为 15.07% 柔性钙钛矿太阳能电池实物图

为 8.31%。Qiu 等 [37] 以直径为  $127 \mu\text{m}$  的不锈钢为基底, 制备了 nip 结构的纤维状钙钛矿太阳能电池, 电池效率为 3.3%, 是效率最高的纤维状太阳能电池。

截至目前, 柔性衬底钙钛矿电池比导电玻璃衬底钙钛矿电池效率要低, 这主要是由于柔性钙钛矿薄膜中的不完美的界面以及结构、化学上的缺陷造成的。因此, 研究适用于柔性衬底制备的 ETL 和 HTL 材料以及界面修饰, 是柔性钙钛矿太阳能电池研究的一个重要方向。此外, 开发非溶液法制备钙钛矿电池技术, 可以扩展 ETL 和 HTL 层的选择, 是另一个重要研究方向。另外, 钙钛矿太阳能电池的稳定性是限制钙钛矿太阳能电池产业化和应用的关键因素, 也是必须要解决的问题。

### 三、柔性太阳能电池发展建议

经过几十年的发展, 柔性太阳能电池取得了很大进展。在电池方面, 柔性硅薄膜太阳能电池最高效率为 16.3%, 柔性铜铟镓硒太阳能电池最高效率为 20.4%, 柔性碲化镉太阳能电池的最高效率为 13.8%, 柔性钙钛矿太阳能电池最高效率为 18.4%。在组件方面, 已经实现商业化的组件有 United Solar 公司的柔性硅薄膜太阳能电池和汉能集团的柔性铜铟镓硒太阳能电池, 组件的孔径效率分别为 8.2% 和 16.7%。遗憾的是, 由于经营不善, United Solar 公司已于 2012 年倒闭, 汉能集团的柔性铜铟镓硒太阳能电池, 是目前市场上唯一可见的柔性太阳能电池组件, 但由于价格太高 (30 元/W), 销量很少。由此可见, 转换效率较低和生产成本太高是制约柔性太阳能电池发

展的两大因素。提高转换效率和降低生产成本可从以下几个方面进行。

### 1. 开发新型柔性衬底材料

作为柔性太阳电池的衬底，需要满足几个条件：具有与电池材料相同或相近的热膨胀系数，能够承受电池制备工艺温度，表面粗糙度小，轻质，成本低等。目前，常用作柔性衬底的材料有不锈钢箔、PI、PEN、PET。其中，不锈钢箔能够承受电池制备工艺温度，但是衬底表面粗糙度大，并且其中的金属杂质会在制备过程中向电池中扩散，影响电池效率。PI、PEN、PET 三种材料表面粗糙度小，更加轻质，但是不能承受高温工艺，电池效率也会受到影响。因此，开发新型轻质、廉价、耐高温的柔性衬底材料，不仅有助于进一步降低成本，也会对提高电池效率有帮助。

### 2. 开发电池制备新型工艺

电池材料的结构、性能与衬底的结构形貌有着直接的关系，太阳电池的制备温度不同，电池性能也不同。因此，针对粗糙度较大，不能承受高温的柔性衬底，需要开发新型制备工艺，设计新型结构，从而提高太阳电池的效率。

### 3. 提高产业化装备制造水平

柔性太阳电池的产业化生产需要卷到卷生产设备，当前，国内外卷到卷设备制造水平普遍较低。大面积柔性太阳电池组件生产节拍较慢、良率较低，这也造成了柔性太阳电池成本较高。因此，提高产业化装备制造水平有助于降低柔性太阳电池的生产成本，有助于推进柔性太阳电池的产业化生产和应用。

## 四、结语

柔性太阳电池可应用在卫星、飞艇、无人机、单兵装备等国防军工领域以及光伏建筑一体化、可穿戴智能设备等民用领域，具有广阔的市场前景。经过多年的发展，柔性太阳电池效率得到很大提升，柔性硅薄膜太阳电池最高效率为 16.3%，柔性铜铟镓硒太阳电池最高效率为 20.4%，柔性碲化镉太阳电池的最高效率为 13.8%，柔性钙钛矿太阳电池最高效率为 18.4%。并且，已经有商业化的柔性硅薄膜太阳电池和柔性铜铟镓硒太阳电池组件问世，显示出柔性太阳电池具有巨大的发展潜力。然而，柔

性太阳电池还没有形成大规模产业化，效率和成本是制约柔性太阳电池发展的两大因素。开发新型柔性衬底材料、开发电池制备新型工艺与结构、提高卷到卷装备制造水平，将有助于提高柔性太阳电池转换效率，降低生产成本，从而推进柔性太阳电池的产业化发展。

### 参考文献

- [1] Pagliaro M, Ciriminna R, Palmisano G. Flexible solar cells [J]. *ChemSusChem*, 2008, 1(11): 880–891.
- [2] Kojima A, Teshima K, Shirai Y, et al. Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(17): 6050–6051.
- [3] Yan B, Yue G, Sivec L, et al. Innovative dual function nc-SiO<sub>x</sub>:H layer leading to a >16% efficient multi-junction thin-film silicon solar cell [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(11): 860.
- [4] Yan B, Yang J, Guha S. Amorphous and nanocrystalline silicon thin film photovoltaic technology on flexible substrates [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum Surfaces & Films*, 2012, 30(4):04D108-104D108-110.
- [5] Banerjee A, Liu F S, Beglau D, et al. 12.0% efficiency on large-area, encapsulated, multijunction nc-Si:H-Based solar cells [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2012, 2(2): 104–108.
- [6] 中国科学院. 中国学科发展战略·光化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [7] Haug F J, Söderström T, Python M, et al. Development of micromorph tandem solar cells on flexible low-cost plastic substrates [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93(6–7): 884–887.
- [8] Soderstrom T, Haug F J, Terrazoni-Daudrix V, et al. Optimization of amorphous silicon thin film solar cells for flexible photovoltaics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(11): 27–33.
- [9] Marins E, Warzecha M, Michard S, et al. Flexible n-i-p thin film silicon solar cells on polyimide foils with textured ZnO:Ga back reflector [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 571(A): 9–12.
- [10] Liu Y, Rath J K, Schropp R E I. Development of micromorph tandem solar cells on foil deposited by VHF-PECVD [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201: 9330–9333.
- [11] Li H, Werf C H M V D, Borreman A, et al. Flexible a-Si:H/nc-Si:H tandem thin film silicon solar cells on plastic substrates with i-layers made by hot-wire CVD [J]. *Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, 2008, 2(4): 157–159.
- [12] Fernández S, Santos J D, Munuera C, et al. Effect of argon plasma-treated polyethylene terephthalate on ZnO:Al properties for flexible thin film silicon solar cells applications [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, 133: 170–179.
- [13] Başol B M, Kapur V K, Halani A, et al. Copper indium diselenide thin film solar cells fabricated on flexible foil substrates [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 1993, 29(2): 163–173.
- [14] Niki S, Contreras M, Repins I, et al. CIGS absorbers and processes

- [J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2010, 18(6): 453–466.
- [15] Hartmann M, Schmidt M, Jasenek A, et al. Flexible and light weight substrates for Cu(In,Ga)Se/sub 2/ solar cells and modules [C]. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002: 638–641.
- [16] Yagioka T, Nakada T. Cd-free flexible Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells with ZnS(O,OH) buffer layers on Ti foils [J]. *Applied Physics Express*, 2009, 2(7): 072201.
- [17] Penndorf J, Winkler M, Tober O. CuInS<sub>2</sub> thin film formation on a Cu tape substrate for photovoltaic applications [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 1998, 53(3–4): 285–298.
- [18] Contreras M A, Egaas B, Ramanathan K, et al. Progress toward 20% efficiency in Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> polycrystalline thin-film solar cells [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 1999, 7(4): 311–316.
- [19] Pianezzi F, Chirilă A, Blösch P, et al. Electronic properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells on stainless steel foils without diffusion barrier [J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2012, 20(3): 253–259.
- [20] Kessler F, Herrmann D, Powalla M. Approaches to flexible CIGS thin-film solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 480(3): 491–498.
- [21] Chirilă A, Buecheler S, Pianezzi F, et al. Highly efficient Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells grown on flexible polymer films [J]. *Nature Materials*, 2011, 10(11): 857–861.
- [22] Hodges D R. Development of CdTe thin film solar cells on flexible foil substrates [D]. Florida: University of South Florida (Doctoral dissertation), 2009.
- [23] Ferekides C S, Balasubramanian U, Mamazza R, et al. CdTe thin film solar cells: Device and technology issues [J]. *Solar Energy*, 2004, 77(6): 823–830.
- [24] 肖立新, 邹德春. 钙钛矿太阳能电池 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2016.
- Xiao L X, Zou D C. Perovskite solar cells [M]. Beijing: Peking University Press, 2016.
- [25] Feng J, Yang Z, Yang D, et al. E-beam evaporated Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as an effective electron transport layer for large flexible perovskite solar cells [J]. *Nano Energy*, 2017, 36: 1–8.
- [26] Giacomo F D, Zardetto V, D’Epifanio A, et al. Flexible perovskite photovoltaic modules and solar cells based on atomic layer deposited compact layers and UV-irradiated TiO<sub>2</sub> scaffolds on plastic substrates [J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(8): 1–9.
- [27] Kim B J, Dong H K, Lee Y Y, et al. Highly efficient and bending durable perovskite solar cells: Toward a wearable power source [J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(3): 916–921.
- [28] Yang D, Yang R, Zhang J, et al. High efficiency flexible perovskite solar cells using superior low temperature TiO<sub>2</sub> [J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(11): 3208–3214.
- [29] Yang D, Yang R, Ren X, et al. Hysteresis-suppressed high-efficiency flexible perovskite solar cells using solid-state ionic-liquids for effective electron transport [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(26): 5206–5213.
- [30] Wang C, Guan L, Zhao D, et al. Water vapor treatment of low-temperature deposited SnO<sub>2</sub> electron selective layers for efficient flexible perovskite solar cells [J]. *Acs Energy Letters*, 2017, 2(9): 2118–2124.
- [31] Roldán-carmona C, Malinkiewicz O, Soriano A, et al. Flexible high efficiency perovskite solar cells [J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(3): 994–997.
- [32] Docampo P, Ball J M, Darwich M, et al. Efficient organometal trihalide perovskite planar-heterojunction solar cells on flexible polymer substrates [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(7): 2761.
- [33] You J, Hong Z, Yang Y M, et al. Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility [J]. *Acs Nano*, 2014, 8(2): 1674.
- [34] Lee M, Jo Y, Kim D, et al. Flexible organo-metal halide perovskite solar cells on a Ti metal substrate [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(8): 4129–4133.
- [35] Troughton J, Bryant D, Wojciechowski K, et al. Highly efficient, flexible, indium-free perovskite solar cells employing metallic substrates [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(17): 9141–9145.
- [36] Wang X, Li Z, Xu W, et al. TiO<sub>2</sub> nanotube arrays based flexible perovskite solar cells with transparent carbon nanotube electrode [J]. *Nano Energy*, 2015, 11: 728–735.
- [37] Qiu L B, Deng J, Lu X, et al. Integrating perovskite solar cells into a flexible fiber [J]. *Angewandte Chemie*, 2014, 53(39): 10425–10428.