



喷墨打印技术在制备太阳能电池中的应用

黄琦金, 沈文锋, 徐青松, 宋伟杰*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201

* 联系人, E-mail: weijiesong@nimte.ac.cn

2013-12-05 收稿, 2014-01-20 接受, 2014-06-11 网络版发表

国家自然科学基金(21205127)和浙江省自然科学基金(LY12E02009)资助

摘要 随着能源需求与消耗不断增加, 新能源的开发和利用受到各国的重视. 利用光生伏特效应直接将太阳能转化为电能的太阳能电池成为国内外研究的热门项目. 人们采用各种印刷技术用来制备太阳能电池, 其中, 喷墨打印技术作为一种非接触式的数字成型技术, 具有材料利用率高、低成本、适用于在柔性基底沉积等特点而受到广泛关注. 喷墨打印技术被认为是新一代太阳能电池制备技术. 本文从太阳能电池的构造入手, 综述了喷墨打印技术制备太阳能电池的最新进展, 系统介绍了喷墨打印技术制备太阳能电池金属电极、透明电极、吸收层等功能层的应用, 并对该技术制备太阳能电池的前景进行了展望. 喷墨打印技术将成为太阳能电池制备的重要技术.

关键词

喷墨打印
太阳能电池
金属电极
透明电极
吸收层

近年来, 全球对能源的需求与消耗不断增加, 传统的化石燃料, 如煤、石油、天然气等非可再生能源日益枯竭, 新能源的开发和利用受到各国的重视. 太阳能作为一种可再生能源, 是各种可再生能源中重要的基本能源, 太阳能的开发和应用也成为了一项重要研究课题^[1]. 其中, 利用光生伏特效应直接将太阳能转化为电能的太阳能电池是国内外研究的热点. 而降低太阳能电池的生产成本, 提高太阳能电池的转换效率是科研人员为之奋斗的目标. 太阳能电池的制备方法中, 喷墨打印技术被认为是新一代太阳能电池制备技术. 喷墨打印技术是一种非接触式的数字成型技术, 具有材料利用率高、低成本、适用于柔性和刚性衬底等特点而受到人们的广泛关注. 喷墨打印技术已应用于微电机系统^[2]、印刷电路板^[3]、导电路径^[4,5]、发光二极管^[6,7]、无线射频标签^[8-10]、传感器^[11,12]等领域. 本文从太阳能电池的结构入手, 综述了喷墨打印技术制备太阳能电池的研究进展, 并对该技术制备太阳能电池的前景进行了展望.

1 太阳能电池的构造

常见太阳能电池主要有晶体硅太阳能电池、薄膜硅太

阳电池、铜铟镓硒太阳能电池、碲化镉太阳能电池、染料敏化太阳能电池、有机太阳能电池等. 通常, 太阳能电池包括吸收层和电极层. 吸收层的作用是吸收太阳光, 并将其转化为电子-空穴对, 在 P-N 结电场的作用下, 空穴由 N 区流向 P 区, 电子由 P 区流向 N 区, 接通电路后就形成电流; 电极的作用则是将产生的光电流导入外电路. 为了进一步提高太阳能电池的光电转换效率, 通常还有缓冲层和减反层等.

2 电极

2.1 金属电极

目前, 绝大多数商用太阳能电池都是采用丝网印刷的方式来制备金属电极. 但丝网印刷存在几点不足, 一是印刷过程中, 丝网与基底(硅片)接触, 容易造成硅片的破损; 二是丝网印刷往往造成浆料的浪费. 因此, 喷墨打印技术在制备太阳能电池栅线方面越来越受重视. 早在 20 多年前, Teng 等人^[13]就制备了不同物理特性的有机银墨水. 通过理性设计, 利用喷墨打印机制备出银栅线电极. 需要指出的是, 为了让银与硅形成良好的欧姆接触, 该太阳能电池中并没有

引用格式: 黄琦金, 沈文锋, 徐青松, 等. 喷墨打印技术在制备太阳能电池中的应用. 科学通报, 2014, 59: 2033-2038

Huang Q J, Shen W F, Xu Q S, et al. Application of inkjet printing technology in solar cell fabrication (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 2033-2038, doi: 10.1360/N972013-00028

采用减反层(SiN_x); 且在打印银之前, 先在硅上蒸发一薄层 Ti/Pd 合金. 得到该太阳电池的转换效率为 8.18%.

美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)的研究人员也做了许多前瞻性工作. 首先, 采用银墨水打印制备的银图案的电阻率仅为 $2 \mu\Omega \text{ cm}^{[14]}$. 利用该墨水可以在包含减反层(SiN_x)的太阳电池片上打印厚度为 $10 \mu\text{m}$, 宽度为 $250 \mu\text{m}$ 的银栅线, 在空气中 850°C 烧结 10 min, 电池的转换效率为 8%. 之所以采用如此高的烧结温度, 是因为该墨水中并不含有玻璃粉, 高温烧结有利于银穿透减反层, 与硅形成欧姆接触. 为了降低烧结温度, 该实验室研究人员采用先打印蚀刻剂(fire-through agent), 再打印银墨水的方法来制备栅线^[15,16]. 电池的烧结温度降低到 750°C , 电池的平均转换效率为 10%, 电池的最高转换效率提升至 12%.

由此可见, 如何有效的蚀刻减反层(SiN_x), 从而使银与硅形成良好的欧姆接触是研究的一重点. Jang 等人^[17]提出在银墨水制备过程中添加纳米尺寸的玻璃粉来烧蚀 SiN_x 层, 并提高银与硅的附着力. 研究表明, 银墨水中加入粒径为 138 nm , 固含量为 0.16 vol%(vol%, 体积分数)的玻璃粉, 并不影响墨水的可打印性, 在 600°C 烧结, 银图案的电阻率为 $2.52 \mu\Omega \text{ cm}$.

Shin 等人^[18,19]先采用激光刻蚀氮化硅再打印银墨水的方式来实现银与硅的欧姆接触. 在刻蚀之前, 先在氮化硅层上旋涂一层疏水性高分子物质, 防止打印的银墨水在太阳电池片表面扩散, 以降低遮光面积. 需要指出的是, 该墨水也含有玻璃粉; 作者还提到激光刻蚀过程中, 激光器的能量需要控制, 避免对 n 型硅产生破坏. 因为喷墨打印的银线电导率要低于块体银, 所以要想提高电池电极的导电性, 常需要把喷墨打印技术与其他技术相结合. Liu 等人^[20]采用喷墨打印银种子层, 再化学镀厚度为 $1 \mu\text{m}$ 的镍, 最后电镀 $2 \mu\text{m}$ 厚的银来形成太阳电池前电极, 喷墨打印银种子层的目的是诱发化学镀镍.

Hersh 等人^[21]喷墨打印制备了 CIGS 电池的金属银电极. 在 120°C 处理 1 h 后, 太阳电池几乎没效率, 这是由于银没有完全分解, 与下层的接触电阻较大的缘故. 将处理温度提升至 200°C , 电池的转换效率达到 11.4%. 在银墨水的制备中, Ahn 等人^[22]制备出固含量高达 85 wt% 的银颗粒墨水, 将该墨水制备的银线应用在柔性发光二极管或太阳电池中, 即使

多次弯曲变形, 银线仍然保持良好的电导率.

2.2 透明电极

太阳电池常用透明导电氧化物薄膜有氟掺杂氧化锡(FTO)、锡掺杂氧化铟(ITO)和掺杂氧化锌(ZnO), 但这些薄膜通常用磁控溅射等工艺制备, 其成本较高. 所以, 目前采用低廉成本的喷墨打印技术制备氧化物薄膜引起了人们的关注. 美国可再生能源实验室的研究人员^[16]采用喷墨打印技术制备了 SnO_2 薄膜, 在 400°C 的氩气气氛下烧结 1 h, 得到的电阻率为 $0.004 \Omega \text{ cm}$. 韩国庆熙大学的 Kim 研究小组^[23-25]在喷墨打印制备透明电极方面做了系统的研究, 并将采用喷墨打印技术制备的氧化物薄膜应用于有机太阳电池中, 并与磁控溅射制备的薄膜进行了较详细的对比. Jeong 等人^[23]首先采用喷墨打印技术制备了 ITO 薄膜, 该薄膜的电阻率要比磁控溅射的 ITO 薄膜高 100 倍, 使制备的有机太阳电池的转换效率为 2.13%, 要低于磁控溅射 3.78% 的转化效率; Jeong 等人^[24]还采用喷墨打印技术制备了 Ag/ITO 杂化电极. 发现当银栅线的间距为 3 mm 时, 杂化电极的方块电阻为 $2.86 \Omega \square^{-1}$, 透过率为 74.06%; 该小组^[25]采用喷墨打印技术制备了 InZnSnO (IZTO)透明电极, 详细讨论了打印参数对薄膜性能的影响, 最终制备出了方块电阻为 $20.6 \Omega \square^{-1}$, 透过率为 81.29% 的薄膜. 将该薄膜应用于有机太阳电池中, 发现电池的转换效率要低于磁控溅射 ITO 薄膜的电池, 分析原因是由于 IZTO 薄膜在快速退火后出现多孔结构, 影响了电池的开路电流和短路电压.

由于透明导电氧化物薄膜的脆性较大, 喷墨打印制备高分子透明电极也受到广泛的关注. 聚 3, 4-乙撑二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT: PSS)是有机太阳电池常用的透明电极. Eom 等人^[26]采用喷墨打印技术成功制备出了 PEDOT: PSS 透明电极. 研究了添加剂对 PEDOT: PSS 电极形貌及器件性能的影响, 最终发现固含量为 93.8% 的 PEDOT: PSS, 6.0% 的甘油以及 0.2% 的乙二醇丁醚组成的墨水, 使沉积的薄膜获得最优的表面形貌和电导率, 所制备的有机太阳电池获得 3.16% 的转换效率. 美国可再生能源实验室的 Steirer 等人^[27]分别采用旋涂、超声波喷涂和喷墨打印技术制备 PEDOT: PSS 薄膜, 并将该薄膜应用于异质结电池中, 发现其转换效率依次为 3.6%, 3.5% 和 3.3%, 转换效率相差不大, 进一步指出超声波喷

涂和喷墨打印技术在制备有机太阳能电池透明电极方面,可以与旋涂技术相媲美。

2.3 其他方法

澳大利亚新南威尔士大学的 ARC Photovoltaics Centre of Excellence^[28,29]在喷墨打印技术制备太阳能电池领域也起到引导作用,尤其是太阳能电池栅电极制造方面提出了新的见解。首先在太阳能电池上的介电层(SiN_x 或 SiO_2)沉积一层聚丙烯酸溶液,再利用喷墨打印机在聚丙烯酸层上打印含有氟离子的墨水,该墨水中氟离子与聚丙烯酸中的氢离子形成刻蚀液,刻蚀掉介电层,制备出开孔或沟槽,最后用去离子水将残余的聚丙烯酸和刻蚀液冲洗掉。形成的开孔或沟槽可以作为蚀刻硅的掩膜,也可以沉积金属电极,从而与硅形成良好的欧姆接触。

浙江大学的杨德仁课题组^[30,31]制备出硅量子点墨水,然后采用旋涂或打印的方式,将墨水沉积在硅太阳能电池表面,从而提高太阳能电池的效率。太阳能电池表面沉积硅纳米晶体薄膜之后,在短波段(300~400 nm)和长波段(700~1100 nm)电池片的反射率都有降低。长波段反射率降低是由于硅纳米晶体的多孔性结构引起的,它使得各层的折射率之间有更好的匹配性;在短波段光谱区域内,反射率的降低不仅由多孔性的结构引起,也因为在这一区间范围内,硅纳米晶的强烈的吸收引起。电池片在短波段反射率变化较为明显,基本随打印参数值增加,减反效果降低,当打印参数为40 μm 时,减反射效果最好。涂覆有硅纳米晶薄膜的太阳能电池的转换效率由16.9%上升至17.5%,提高约为4%。

3 吸收层

3.1 无机吸收层

2002年前后,Kapur等人^[32,33]就提出溶液法制备铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池的吸收层的方法。采用铜、铟、镓的氧化物粉末分散在水中,通过调节黏度、pH等参数,分别制备出适合刮片、喷墨打印、滚涂以及喷雾的前驱墨水,成膜后,经过气氛烧结以及硒化,得到CIGS吸收层。尽管该电池在玻璃衬底上的转换效率为13.6%,但整个制备过程较复杂,成本较高,该方法并不是制备吸收层的较理想选择。

2011年,美国俄勒冈州立大学的Chang课题

组^[34]采用喷墨打印技术成功地制造出了铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池的吸收层。具体做法是将乙酸铜、乙酸铟和氯化镓,在磁力搅拌的条件下,溶解在乙醇、乙二醇及乙醇胺的混合液中,形成墨水。采用喷墨打印机进行打印,经过硒化处理得到吸收层材料。该方法使原材料浪费减少了90%,显著降低了太阳能电池的制造成本,该电池的转换效率为5.04%。使电池的效率进一步提升的方法有:减少孔洞、位错和杂质等缺陷;提高吸收层/缓冲层界面上Ga的含量,降低界面的粗糙度;降低接触电极的电阻,减少钼层厚度等。从理论上讲,可以获得12%的转化效率,这样就可制造出商业化生产的太阳能电池。

Oh等人^[35]采用喷墨打印与紫外辅助化学烧结相结合的方法来制备染料敏化太阳能电池的光阳极。首先将购买的 TiO_2 纳米颗粒分散在N,N-二甲基甲酰胺中形成墨水,再往该墨水中添加6 vol%钛的有机化合物[二(2-羟基丙酸)二氢氧化二铵合钛,TALH]作为紫外辅助化学烧结源,从而构成 TiO_2 -TALH墨水。打印后的 TiO_2 -TALH薄膜放置在加热盘上,150℃进行加热,并用紫外灯照射,促使钛的有机化合物分解,形成新的 TiO_2 颗粒,并附着在原有 TiO_2 颗粒表面,从而促进了 TiO_2 颗粒间的连接。该方法为制备柔性的染料敏化太阳能电池提供了一种新的思路。

3.2 有机吸收层

2005年,Marin等人^[36]开始了喷墨打印技术用于制备聚合物太阳能电池的探索。采用喷墨打印机将电子给体聚甲基丙烯酸甲酯多吡啶钌共聚物(RuPMMA)和电子受体富勒烯衍生物(PC60BM)喷墨打印到涂覆有PEDOT:PSS薄膜的玻璃电极上,制备了聚合物太阳能电池,并研究了喷墨打印制备的活性层的光学性能和形貌。Hoth等人^[37]报道了新溶剂体系在喷墨打印制备的聚合物太阳能电池中的应用,并分析了聚合物太阳能电池光电损失的原因,为器件形貌的优化和性能的提高提供了有价值的参考。研究表明:采用邻二氯苯/均三甲苯作溶剂时,喷墨打印制备的聚合物太阳能电池的转化效率达到3.5%;相同条件下采用四氢化茶作溶剂时,器件的PCE仅为1.3%。分析原因,喷墨打印是在较低温下成膜,而高沸点溶剂四氢化茶的存在会导致薄膜干燥不均匀,最后导致形成的功能层薄膜不均匀,表面粗糙,器件性能下降。

2010年,Eom等人^[38]在前面研究基础上,采用喷

墨打印技术制备的聚合物太阳能电池的 PEDOT: PSS 电极层和 P3HT: PCBM 功能层, 器件性能得以进一步提高, PCE 达到 3.71%. Jung 等人^[39]在以前研究的基础上综合研究了溶剂组成、蒸汽压、沸点及墨水表面张力等因素对喷墨打印活性层形貌和器件性能的影响, 制备了 PCE 达到 3.8% 的聚合物太阳能电池.

最近, Cantatore 等人^[40]对溶液法制备有机太阳能电池进行了综述, 而 Teichler 等人^[41]则对喷墨打印制备有机电子器件进行了综述, 均提到喷墨打印技术或许是制备有机电子器件中最常用的技术.

4 前景及展望

目前, 喷墨打印技术是一种原材料利用率高, 低成本的制造技术, 并且能够与卷对卷(R2R)技术相结合, 实现器件的大面积制造. 喷墨打印制造太阳能电池主要还是停留在实验研究阶段, 且制造的太阳能电池性能与传统方法相比尚有一定的差距. 遇到的主要技术瓶颈以及优化和改进措施可以从墨水制备, 打印头和打印设备等 3 方面进行考虑, 而这 3 方面又不是彼此孤立, 需要通盘考虑.

(1) 从墨水的制备角度考虑, 不同的打印设备, 墨水的黏度、表面张力、粒径和固含量等物理参数需要满足一定的条件才能进行打印, 也就是说, 打印设

备对墨水具有特定的打印“窗口”. 然而为了对墨水的物理性能进行调控, 许多墨水采用毒性较大的物质作为溶剂; 在打印过程中, 除了考虑墨水与基底的润湿性, 避免出现“咖啡污点”效应外, 还需要考虑打印的墨水在太阳能电池各层界面处的扩散, 这将影响薄膜的均一性, 从而影响太阳能电池的转换效率. 因此, 生产简单调控就能适用不同喷墨打印机的环境友好型墨水和打印后图案薄膜的后处理是重要的研究课题.

(2) 从打印头角度考虑, 为了改变打印设备对墨水物理参数的过分依赖, 打印过程中, 对打印头进行加热, 进而降低墨水的黏度或者改变打印头驱动电压大小或波形, 进而改变打印参数, 使墨水正常喷印; 为了使打印图案的精度更高, 需要降低打印头的直径, 从而降低每次喷出墨滴的体积, 提高精度. 此外, 太阳能电池包括多层结构, 多层结构的打印容易造成打印头的堵塞, 解决打印头的兼容性问题也需要深入研究.

(3) 从打印设备角度考虑, 喷墨打印太阳能电池实现工业化生产, 并且成为主流技术, 必须提高打印效率, 降低打印成本. 制备高固含量且性能稳定的墨水, 从而降低太阳能电池各层的打印时间, 提高打印效率; 降低打印头在内的整个设备成本势在必行.

参考文献

- Habas S E, Platt H A S, van Hest M F A M, et al. Low-cost inorganic solar cells: From ink to printed device. *Chem Rev*, 2010, 110: 6571–6594
- Cox W R, Chen T, Hayes D J. Micro-optics fabrication by ink-jet printers. *Opt Photon News*, 2001, 12: 32–35
- Shin K Y, Lee M, Kang H, et al. Characterization of inkjet-printed silver patterns for application to printed circuit board (PCB). *J Electr Eng Technol*, 2013, 8: 603–609
- Huang Q J, Shen W F, Song W J. Synthesis of colourless silver precursor ink for printing conductive patterns on silicon nitride substrates. *Appl Surf Sci*, 2012, 258: 7384–7388
- Vaseem M, Lee K M, Hong A R, et al. Inkjet printed fractal-connected electrodes with silver nanoparticle ink. *ACS Appl Mater Interf*, 2012, 4: 3300–3307
- Yang Y, Chang S C, Bharathan J, et al. Organic/polymeric electroluminescent devices processed by hybrid ink-jet printing. *J Mater Sci-Mater Electron*, 2000, 11: 89–96
- Yim Y, Park J, Park B. Solution-processed flexible ITO-free organic light-emitting diodes using patterned polymeric anodes. *J Display Technol*, 2010, 6: 252–256
- Yang L, Rida A, Vyas R, et al. RFID tag and RF structures on a paper substrate using inkjet-printing technology. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 2007, 55: 2894–2901
- Rida A, Yang L, Vyas R, et al. Conductive inkjet-printed antennas on flexible low-cost paper-based substrates for RFID and WSN applications. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2009, 51: 13–23
- Virtanen J, Ukkonen L, Bjorninen T, et al. Inkjet-printed humidity sensor for passive UHF RFID systems. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2011, 60: 2768–2777

- 11 Shen W, Zhao Y, Zhang C. The preparation of ZnO based gas-sensing thin films by ink-jet printing method. *Thin Solid Films*, 2005, 483: 382–387
- 12 Shen W. Properties of SnO₂ based gas-sensing thin films prepared by ink-jet printing. *Sensors Actuators B-Chem*, 2012, 166: 110–116
- 13 Teng K F, Vest R W. Metallization of solar cells with ink jet printing and silver metallo-organic inks. *IEEE Transact Compon Hybrids Manuf Technol*, 1988, 11: 291–297
- 14 Rivkin T, Curtis C, Miedaner A, et al. Direct write processing for photovoltaic cells. In: *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002. 1326–1329
- 15 Kaydanova T, van Hest M, Miedaner A, et al. Direct write contacts for solar cells. In: *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2005. 1305–1308
- 16 Curtis C J, van Hest M, Miedaner A, et al. Multi-layer inkjet printed contacts for silicon solar cells. In: *Photovoltaic Energy Conversion of the 2006 IEEE 4th World Conference*, 2006. 1392–1394
- 17 Jang D, Kim D, Lee B, et al. Nanosized glass frit as an adhesion promoter for ink-jet printed conductive patterns on glass substrates annealed at high temperatures. *Adv Funct Mater*, 2008, 18: 2862–2868
- 18 Shin D Y. Fabrication of an inkjet-printed seed pattern with silver nanoparticulate ink on a textured silicon solar cell wafer. *J Micromech Microeng*, 2010, 20: 125003
- 19 Shin D Y, Cha Y K, Ryu H H, et al. Impact of effective volume ratio of a dispersant to silver nano-particles on silicon solar cell efficiency in direct ink-jet metallization. *J Micromech Microeng*, 2012, 22: 115007
- 20 Liu H C, Chuang C P, Chen Y T, et al. Inkjet printing for silicon solar cells. *Water Air Soil Pollut-Focus*, 2009, 9: 495–498
- 21 Hersh P A, Curtis C J, van Hest M F A M, et al. Inkjet printed metallizations for Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ photovoltaic cells. *Prog Photovolt: Res Applicat*, 2011, 19: 973–976
- 22 Ahn B Y, Duoss E B, Motala M J, et al. Omnidirectional printing of flexible, stretchable, and spanning silver microelectrodes. *Science*, 2009, 323: 1590–1593
- 23 Jeong J A, Lee J, Kim H, et al. Ink-jet printed transparent electrode using nano-size indium tin oxide particles for organic photovoltaics. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2010, 94: 1840–1844
- 24 Jeong J A, Kim J, Kim H K. Ag grid/ITO hybrid transparent electrodes prepared by inkjet printing. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2011, 95: 1974–1978
- 25 Kim J, Na S I, Kim H K. Inkjet printing of transparent InZnSnO conducting electrodes from nano-particle ink for printable organic photovoltaics. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2012, 98: 424–432
- 26 Eom S H, Senthilarasu S, Uthirakumar P, et al. Polymer solar cells based on inkjet-printed PEDOT: PSS layer. *Org Electron*, 2009, 10: 536–542
- 27 Steirer K X, Berry J J, Reese M O, et al. Ultrasonically sprayed and inkjet printed thin film electrodes for organic solar cells. *Thin Solid Films*, 2009, 517: 2781–2786
- 28 Lennon A J, Utama R Y, Lenio M A T, et al. Forming openings to semiconductor layers of silicon solar cells by inkjet printing. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2008, 92: 1410–1415
- 29 Lennon A J, Ho-Baillie A W Y, Wenham S R. Direct patterned etching of silicon dioxide and silicon nitride dielectric layers by inkjet printing. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2009, 93: 1865–1874
- 30 Pi X, Li Q, Li D, et al. Spin-coating silicon-quantum-dot ink to improve solar cell efficiency. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2011, 95: 2941–2945
- 31 Pi X D, Zhang L, Yang D R. Enhancing the efficiency of multicrystalline silicon solar cells by the inkjet printing of silicon-quantum-dot ink. *J Phys Chem C*, 2012, 116: 21240–21243
- 32 Kapur V K, Fisher M, Roe R. Nanoparticle oxides precursor inks for thin film copper indium gallium selenide (CIGS) solar cells. *MRS Proceedings*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 668. H2.6
- 33 Kapur V K, Bansal A, Le P, et al. Non-vacuum processing of CIGS solar cells on flexible polymeric substrates. In: *Photovoltaic Energy Conversion of the 2003 IEEE 3th World Conference*, 2003. 465–468
- 34 Wang W, Su Y W, Chang C H. Inkjet printed chalcopyrite CuIn_xGa_{1-x}Se₂ thin film solar cells. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2011, 95: 2616–2620
- 35 Oh Y, Lee S N, Kim H K, et al. UV-assisted chemical sintering of inkjet-printed TiO₂ photoelectrodes for low-temperature flexible dye-sensitized solar cells. *J Electrochem Soc*, 2012, 159: H777–H781
- 36 Marin V, Holder E, Wienk M M, et al. Ink-jet printing of electron donor/acceptor blends: Towards bulk heterojunction solar cells. *Macromol Rapid Commun*, 2005, 26: 319–324
- 37 Hoth C N, Schilinsky P, Choulis S A, et al. Photovoltaic loss analysis of inkjet-printed polymer solar cells using pristine solvent formulations. *Macromol Symp*, 2010, 291-292: 287–292

- 38 Eom S H, Park H, Mujawar S H, et al. High efficiency polymer solar cells via sequential inkjet-printing of PEDOT: PSS and P3HT: PCBM inks with additives. *Org Electron*, 2010, 11: 1516–1522
- 39 Jung J, Kim D, Lim J, et al. Highly efficient inkjet-printed organic photovoltaic cells. *Jpn J Appl Phys*, 2010, 49: 05EB03
- 40 Cantatore E E. *Applications of Organic and Printed Electronics*. Berlin: Springer, 2013
- 41 Teichler A, Perelaer J, Schubert U S. Inkjet printing of organic electronics—Comparison of deposition techniques and state-of-the-art developments. *J Mater Chem C*, 2013, 1: 1910–1925
-

Application of inkjet printing technology in solar cell fabrication

HUANG QiJin, SHEN WenFeng, XU QingSong & SONG WeiJie

Ningbo Institute of Material Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China

With the increasing energy demand and consumption, the development and utilization of new energy have drawn much attention. Solar cell is a device which can convert sunlight energy into electricity by the photovoltaic effect, and solar cell has become a popular research project. Various printing techniques have been adopted in the fabrication of solar cell. Due to the unique advantages such as high material utilization rate, low cost, flexible, noncontact process and digital patterning, inkjet printing is believed to be the next generation solar cell manufacturing technology. The structure of solar cell and the recent progress in the application of inkjet printing technology in solar cell fabrication is reviewed. Detailed introductions to the application in metal electrode, transparent conductors and absorber layer of solar cell are presented. The potential and promising trends of inkjet printing technology in solar cell fabrication are also proposed. Inkjet printing technology will be an extremely important tool in solar cell fabrication in the near future.

inkjet printing technology, solar cell, metal electrode, transparent conductors, absorber layer

doi: 10.1360/N972013-00028