

基于硅基太阳能电池栅极多次喷印优化技术的研究

马清霞, 张逸新

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 以不增加印刷材料成本和栅线电阻值为前提, 提出了采用变墨滴体积多次喷印工艺方案。采用该方案印刷硅基太阳能电池, 主要通过减小太阳能电池栅线的线宽, 来达到提高太阳能电池能量转换效率的目的。

关键词: 多次喷印; 变墨滴体积; 能量转换效率

中图分类号: TS853+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)21-0127-03

Optimization of Multi-pass Ink-jet Printing Technology for Si-Solar Cell

MA Qing-xia, ZHANG Yi-xin

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Multi-pass ink-jet printing is one of the main ways to improve the efficiency of solar cells. However, grid line width broadening is one of the difficult points of the technology. In order not to increase the cost of printing materials and grid line resistance, multi-pass ink-jet printing process with variable volume ink drops was put forward. Printed silicon-based solar cell using this process is to improve the energy conversion efficiency of solar cells, mainly by reducing the grid lines width of solar cells.

Key words: multi-pass ink-jet printing; variable volume ink drop; energy conversion efficiency

太阳能作为一种可再生能源具有其他能源无法比拟的优势, 如何充分利用太阳能已成为重点开展的研究课题^[1]。由于太阳能电池金属栅极线宽直接影响到太阳能电池的最终光电转换效率, 所以电池金属栅极印刷是优化太阳能电池光电转换效率的关键环节^[2]。为此人们对栅极的印制进行了大量研究^[3-9]。Denis Erath 等人首次在太阳能电池金属化工艺流程中采用“二次印刷”方法^[3], 希望在不增大串联电阻的前提下减小栅极覆盖面积, 从而获得更高的太阳能捕获能力。M. Galiazzo 等人^[4]通过多次印刷与一次印刷的对比性研究, 提出了“II 代二次印刷”(DP-II)的概念, 其研究结果表明, 通过 2 次印刷, 最终实现太阳能电池片光电转换效率 0.12 的增长幅度, 即由 16.01 增大至 16.13。Eric Kossen 等人^[5]研究了孔版印刷细栅丝网印刷主栅和二次丝印叠印工业用二次印刷, 指出对比于一次印刷采用二次印刷法可在不增大银浆使用量的情况下, 实现效率 0.4% 以上的增长幅度。Minkyu Ju 等人^[6]实验研究了二次丝网印刷, 得

出在电极梳形结构宽度从 80 μm 减小至 30 μm 的情况下, 硅太阳能电池转换效率分别达到 17.66% 和 18.06%。文献[7]和文献[8]通过在对多晶硅太阳能电池工业生产工艺条件下, 二次丝网印刷技术硅太阳能电池转换效率进行了研究, 指出采用二次丝网印刷可以获得更好的电极线高宽比, 短路电流 J_{sc} 和开路电压 V_{oc} 获得一定的提升, 从而使得太阳能电池的转换效率得到了一定的提高。不过二次丝网印刷存在栅线线宽精度难控制等问题, 为此有学者研究多次等墨体积喷墨印刷方法来提高硅太阳能电池栅线高宽比^[9], 然而, 如同二次丝网印刷技术所存在的问题一样, 在 5 次以内的喷墨印刷每次都会产生栅线扩展, 最终栅线宽度是单次印刷的 2 倍以上。目前尚无采用变墨点体积多次喷印栅极提高栅极线高宽比和太阳能电池转换效率研究报道。

笔者依据喷墨栅线印刷扩展规律, 提出采用变墨点进行多次喷印的栅极优化喷墨工艺。

收稿日期: 2013-06-03

作者简介: 马清霞(1988-), 女, 山东潍坊人, 江南大学硕士生, 主攻硅基太阳能电池金属栅极的喷墨印刷技术。

通讯作者: 张逸新(1956-), 男, 博士, 江南大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为微电子印刷技术和量子光通信。

1 太阳能电池多次喷印栅线展宽和变墨滴喷墨优化

1.1 单次喷墨印刷墨滴直径

设喷墨印刷机喷出体积为 V , 由体积为 V 的球形墨滴体积关系 $V = 4\pi(D_0/2)^3/3$ 得出直径为 $D_0 = 2(3V/4\pi)^{1/3}$ 的墨滴, 墨滴印刷在硅基上的初始形状是直径为 D'_0 的球冠, 墨滴铺展后的接触角为 θ (见图 1)。

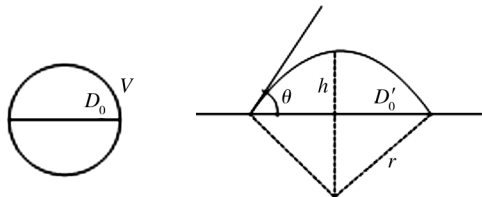


图 1 一次喷印

Fig. 1 Once ink-jet printing

铺展后球冠墨滴体积公式 $V = \pi h^2(3r-h)/3$, 其中 $r = \frac{D'_0}{2\sin\theta}$, 在忽略油墨干燥过程中的铺展可以得出干燥墨点直径为:

$$D'_0 = 2 \left[\frac{3V \sin \theta (1 + \cos \theta)}{\pi (1 - \cos \theta) (2 + \cos \theta)} \right]^{1/3} \quad (1)$$

墨点高度为:

$$h = \frac{(1 - \cos \theta)}{\sin \theta} \left[\frac{3V \sin \theta (1 + \cos \theta)}{\pi (1 - \cos \theta) (2 + \cos \theta)} \right]^{1/3} = \frac{(1 - \cos \theta)}{2 \sin \theta} D'_0 \quad (2)$$

1.2 等墨点体积多次喷印工艺设计

为了增加硅片受光面积, 采用类似二次丝网印刷技术^[4-6]的多次喷印技术, 通过增加栅线厚度、减少栅线宽度来减少栅线阴影面积。为此设多次喷印栅线宽度是单次喷印的 0.6 倍, 即为 $0.6D'_0$ 。设第 1 次喷印固化墨滴近似为圆柱体。Y. T. Gizachew 等^[9]通过大量实验得出: 在采用固定喷印墨滴体积的多次喷印工艺中, 第 2 次喷印最终固化墨点的平均直径是第 1 次印刷的 1.5 倍。也就是说, 当采用单次喷印线宽的 0.6 倍进行多次喷印时, 第 2 次喷刷后的实际线宽达到 $1.5 \times 0.6D'_0 = 0.9D'_0$, 而高度是单次喷印线高的 1.2 倍, 见图 2。2 次喷印的墨滴体积和高度计算关系分别为:

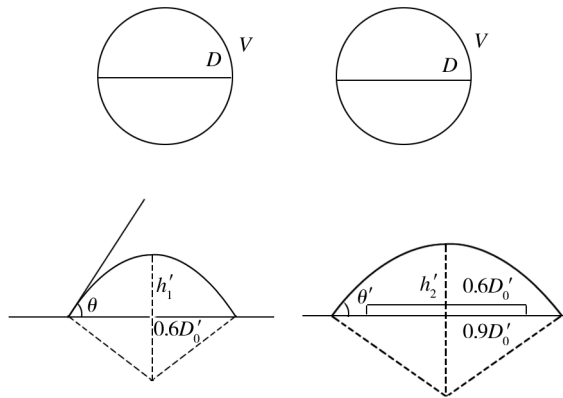


图 2 等大喷嘴直径的二次喷印

Fig. 2 Twice ink-jet printing with equal nozzle diameters

$$V'_1 = \frac{(0.6D'_0/2)^3 \pi (1 - \cos \theta) (2 + \cos \theta)}{3 \sin \theta (1 + \cos \theta)} \quad (3)$$

$$V'_2 = \frac{(0.9D'_0/2)^3 \pi (1 - \cos \theta') (2 + \cos \theta')}{3 \sin \theta' (1 + \cos \theta')} \quad (4)$$

由 $V'_1 = V'_2$ 得出:

$$\frac{(1 - \cos \theta') (2 + \cos \theta')}{3 \sin \theta' (1 + \cos \theta')} = \frac{8}{27} \times \frac{(1 - \cos \theta) (2 + \cos \theta)}{3 \sin \theta (1 + \cos \theta)} \quad (5)$$

$$h'_1 = \frac{(1 - \cos \theta)}{2 \sin \theta} 0.6D'_0 \quad (6)$$

$$h'_2 = 0.9D'_0 \quad (7)$$

由 $h'_1 = h'_2$, 得出:

$$\frac{(1 - \cos \theta')}{2 \sin \theta'} = 0.8 \frac{(1 - \cos \theta)}{2 \sin \theta} \quad (8)$$

1.3 变墨点体积多次喷印工艺设计

为了使多次喷印后栅线线宽保持设计线宽, 文中提出采用改变后续喷印墨点体积来优化喷印工艺。类似于单次喷印, 第 1 次印刷铺展前墨滴体积 V'_1 为:

$$V'_1 = \frac{(0.6D'_0/2)^3 \pi (1 - \cos \theta) (2 + \cos \theta)}{3 \sin \theta (1 + \cos \theta)} \quad (9)$$

此时形成的墨点高度近似为:

$$h''_1 = \frac{(1 - \cos \theta)}{2 \sin \theta} 0.3D'_0 = 0.6h \quad (10)$$

考虑到如果第 2 次喷印仍用第 1 次喷印相同墨滴直径的墨滴喷印时, 二次喷印的墨滴扩展^[9], 最终墨点要展宽到 $0.9D'_0$, 达不到设计的目的。可以采用缩小印刷机喷出墨滴直径的补偿方法解决此问题, 即以固化后的栅线宽度(墨滴直径)仍为 $0.6D'_0$ 为目标

选择二次喷墨墨滴体积,见图3。

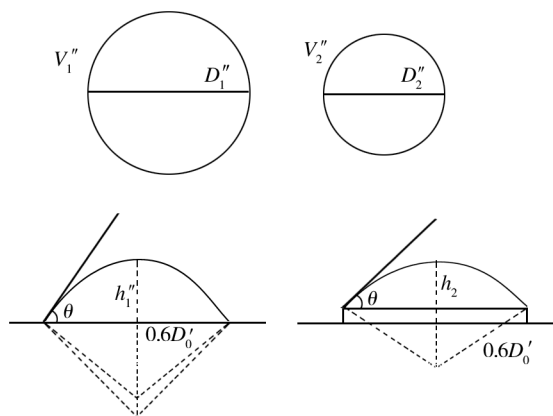


图3 不同喷嘴直径的多次喷印

Fig. 3 Multi-pass ink-jet printing with different nozzle diameters

由1.2节讨论,从式(5)可到第2次喷印所需墨滴体积为:

$$V_2'' = \frac{(0.6D_0'/2)^3 \pi (1 - \cos \theta') (2 + \cos \theta')}{3 \sin \theta' (1 + \cos \theta')} = \frac{8(0.6D_0'/2)^3 \pi (1 - \cos \theta') (2 + \cos \theta')}{81 \sin \theta (1 + \cos \theta)} \quad (11)$$

而相应的第2次喷印所形成墨点高度近似为:

$$h_2'' = \frac{(1 \cos \theta')}{\sin \theta'} 0.3D_0' = 0.48h \quad (12)$$

二次印刷总高度为:

$$h_2 = h' + h'' = 1.08h \quad (13)$$

由电阻理论可知,仅当单次印刷和多次印刷所形成的栅线横截面相同时,栅线的阻值才相同。这时电池才不会因栅线阻值升高,而抵消因栅线变窄形成的电池片捕获阳光增加所带来的电池光电效益的提高,即在完成第2次喷印后,栅线的横截面小于单次喷印横截面, $h_2 \times 0.6D_0' = 0.648h \times D_0' < h \times D_0'$, 所以必须进行第3次喷印。

由多次喷印栅线横截面与单次喷印栅线横截面相同的要求,即 $x \times 0.6D_0' = h \times D_0'$, 可以计算出多次喷印栅线高度设计值 $x = 1.67h$ 。由于第3次喷印线高和第2次喷印线高相同,而第2次喷印线高为单次喷印的 $0.48h$,所以需要喷印4次。前3次喷印栅线高度为 $1.56h$,则第4次喷印栅线高度应设定为 $0.11h$ 。第4次喷印铺展后的球冠(近似认为底面是圆形的半个椭圆)墨滴体积为:

$$V_4'' = \left(\frac{4\pi}{3} 0.3D_0' \times 0.3D_0' \times 0.11h \right) / 2 = 0.0264\pi h \times$$

$$\left[\frac{3V \sin \theta (1 + \cos \theta)}{\pi (1 - \cos \theta) (2 + \cos \theta)} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (14)$$

2 讨论

由文献[8]可知,一次印刷中采用直径为 $50 \mu\text{m}$ 的细栅宽度,二次印刷中2次均采用直径为 $35 \mu\text{m}$ 的细栅宽度,在没有控制栅线展宽的情况下,太阳能电池的光电转换效率提高了 0.276% ,这对于太阳能电池来说是很大的提高。

文献[4-6]采用减少栅线宽度提高太阳能电池片捕获太阳能和文献[9]采用固定喷墨墨滴多次喷印平均栅线达到单次喷印栅线1.5倍的实验研究的基础上,提出采用多次变墨滴体积喷印优化多次喷墨印刷工艺的方法,得出了多次喷墨印刷的最佳墨滴体积选择的理论模型。

3 结语

采用变墨滴多次喷墨印刷技术能减小栅线线宽,提高太阳能电池的受光面积及不增加栅线电阻损耗,从而达到提高太阳能电池的光电转换效率的目的。

参考文献:

- [1] 胡建波,朱谱新. 喷墨打印技术制备聚合物太阳能电池的研究进展[J]. 功能高分子学报,2011,24(3):323-327.
HU Jian-bo, ZHU Pu-xin. Progress in Polymer Solar Cells Fabricated by Inkjet Printing[J]. Journal of Functional Polymers, 2011, 24(3):323-327.
- [2] 张博,秦海滨. 太阳能电池金属电极材料的现状与发展[J]. 科技创新与生产力,2011(212):39-41.
ZHANG Bo, QIN Hai-bin. Status and Development of Material of Metal Electrode of Solar Battery[J]. Taiyuan Science and Technology, 2011(212):39-41.
- [3] ERATH D, FILIPOVIC A, RETZLAFF M, et al. Advanced Screen Printing Technique for High Definition Front Side Metallization of Crystalline Silicon Solar Cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94(1):57-61.
- [4] GALIAZZO M, et al. Reliable Double Printing of Ag Contacts for C-Si Cell Manufacturing, 2nd Workshop on Metallization of Crystalline Si Solar Cells, Konstanz (2010).

- [53] 黄开金,周金鑫,谢长生. 裂纹修复与激光技术[J]. 金属热处理,2002(3):1-4.
HUANG Kai-jin, ZHOU Jin-xin, XIE Chang-sheng. Crack Repair and Laser Technology[J]. Heat Treatment of Metals,2002(3):1-4.
- [54] BROCHU A B W, CHYAN W J, REICHERT W M. Microencapsulation of 2-octylcyanoacrylate Tissue Adhesive for Self-healing Acrylic Bone Cement. Journal of Biomedical Materials Research Part B-applied Biomaterials[J]. 2012, 100(7):1764-1772.
- [55] 李岚,袁莉. 微胶囊技术及其在复合材料中的应用[J]. 塑料工业,2006(5):287-289.
LI Lan, YUAN Li. Microcapsule Technology and Its Application to Composite[J]. China Plastics Industry,2006(5):287-289.
- [56] 童晓梅,张敏,张婷. 微胶囊自修复技术及其在聚合物基复合材料中的应用[J]. 塑料,2009,38(1):29-32.
TONG Xiao-mei, ZHANG Min, ZHANG Ting. Technology of Self-healing with Microcapsule and Its Application to Polymer Matrix Composites[J]. Plastics,2009,38(1):29-32.
- [57] WALTER H, WADDEN 等. 微胶囊包覆的抗臭氧剂[J]. 橡胶科技市场,2008(7):17-24.
WALTER H, WADDEN, et al. Microencapsulation of Antiozonant[J]. China Rubber Science and Technology Market,2008(7):17-24.
- [58] 律微波,刘小兰,李金辉,等. 压敏型粘合剂用微胶囊的研制[J]. 中国胶粘剂,2006,15(10):32-34.
LYU Wei-bo, LIU Xiao-lan, LI Jing-hui, et al. Development of Microcapsules Applied in Pressure-sensitive Adhesive[J]. China Adhesives,2006,15(10):32-34.

(上接第 126 页)

- [9] 周强,卢寿慈. 表面活性剂在浮选中的复配增效作用[J]. 金属矿山,1993(8):28-31.
ZHOU Qiang, LU Shou-ci. The Complex Synergism of Surfactants in Floating[J]. Metal mine, 1993(8):28-31.
- [10] ROSEN M J. 两元表面活性剂混合物的协同作用[J]. 日用化学工业译丛,1989(1):14-19.
ROSEN M J. The Synergistic Effects of Binary Surfactant Mixtures[J]. Daily-use Chemical Industry Translations, 1989(1):14-19.
- [11] 荆忠胜. 表面活性剂概论[M]. 北京:中国轻工业出版社,1999.
JING Zhong-sheng. The Introduction of Surface Active Agents[M]. Beijing:China Light Industry Press,1999.
- [12] 王慎敏,唐冬雁. 日用化学品化学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001.
WANG Shen-min, TANG Dong-yan. The Chemistry of Daily Chemicals[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press,2001.

(上接第 129 页)

- [5] KOSSEN E, HEURTAULT B, STASSEN A F. Comparison of Two Step Printing Methods for Front Side Metallization, Conference Proceedings, 25th EUPVSEC, Valencia(2010).
- [6] JU M, LEE Y, LEE J, et al. Double Screen Printed Metallization of Crystalline Silicon Solar Cells as Low as 30 μm Metal Line Width for Mass Production[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells,2012(100):204-208.
- [7] 黄婷婷,张逸新. 二次丝网印刷对产业化太阳能电池效率的影响[J]. 包装工程,2012,33(17):133-135.
HUANG Ting-ting, ZHANG Yi-xin. Influence of Twice Screen Printing on Conversion Efficiency of Industrial Solar Cell[J]. Packaging Engineering,2012,33(17):133-135.
- [8] 黄婷婷,张逸新. 丝网叠印展宽对晶体硅太阳能电池填充因子及其最终转换效率的影响[J]. 太阳能学报(待发表).
HUANG Ting-ting, ZHANG Yi-xin. The Influence of Overprint Expand on the Fill Factor and Finally Conversion Efficiency of Crystalline Silicon Solar Cells[J]. Acta Energaie Solaris Sinica(in press).
- [9] GIZACHEW Y T, ESCOUBAS L, SIMON J J, et al. Towards Ink-jet Printed Fine Line Front Side Metallization of Crystalline Silicon Solar Cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells,2011,95(S):70-82.