文章编号: 1007 - 4252(2020)03 - 0003 - 226

多晶硅光伏组件的光电结构提升其光电转换性能研究

邱小永[1,2],赵庆国[1,2],姚春梅[1,2],高拥刚[1],何一峰[2],周海权[1,2],金德琳[1],陆波[2],吕文辉[2,3*]
(1. 浙江创盛光能源有限公司,浙江湖州 313008; 2. 浙江贝盛光伏股份有限公司,浙江湖州 313008;
3. 湖州师范学院应用物理系,浙江湖州 313000)

摘要: 在工业产线上制备了多晶硅光伏组件,并研究了半片电学结构与光学增益结构对其光电转换性能的影响。结果表明: 半片电学结构提升了多晶硅光伏组件的填充因子,光学增益结构提升了多晶硅光伏组件的短路电流。二者叠加使多晶硅光伏组件的光电转换效率提升到了 19.26%,最大发电功率超过 313 W。集成的光电结构提升多晶硅光伏组件性能的物理原因可归结为半片电学结构降低了组件的串联电阻及光学增益结构提升了组件中的光利用。

关键词: 多晶硅光伏组件; 半片电学结构; 光学增益结构; 光电转换效率
中图分类号: TN40 **文献标志码:** A

Enhanced power conversion performance of multi-crystalline silicon photovoltaic modules with half-cell electronic structure and optical gain structure

QU Xiaoyong[1,2], ZHAO Qingguo[1,2], YAO Chunmei[1,2], GAO Yonggang[1], HE Yifeng[2], ZHOU Haiquan[1,2], JIN Delin[1], LU Bo[1,2], LU Wenhui [2,3]
(1. Zhejiang Trunsun Solar Co., Ltd, Huzhou, Zhejiang 313008, China; 2. Zhejiang Beyondsun PV Co., Ltd., Huzhou, Zhejiang 313008, China; 3. Department of Applied Physics, Huzhou University, Huzhou, Zhejiang 313000, China)

Abstract: Multi-crystalline silicon (mc-Si) photovoltaic modules with a half-cell electronic structure and an optical gain structure are successfully fabricated on an industrial scale. The mc-Si photovoltaic modules exhibit enhanced fill factor and short-circuit current, resulting in high power conversion efficiency of up to 19.26%. The enhanced optoelectronic conversion is attributed to reduced series resistance loss by the half-cell electronic structure and enhanced light absorption by the optical gain structure in the mc-Si photovoltaic modules.

Key words: Multi-crystalline silicon photovoltaic modules, Half-cell electronic structure, Optical gain structure, Power conversion efficiency

收稿日期: 2020-05-26; **修订日期:** 2020-06-25
基金项目: 湖州市科技计划项目(NO.2018ZD2009); 南太湖创新团队资助项目.
作者简介: 吕文辉(1981-),男,博士,教授,从事晶硅太阳电池材料、物理及高效器件研究(E-mail: whlv2016@189.cn).

0　引言

光伏发电可实现低能量密度太阳能至高能量密度电能的高效转换，受到了全世界的关注和应用。晶硅太阳电池与光伏组件的光电转换效率高、使用寿命长，市场占有率超过 90%。可是，晶硅光伏发电的度电成本依然高于传统燃煤标杆上网电价，无法实现平价上网，成为限制光伏发电产业的瓶颈问题。因此，如何降低晶硅光伏发电系统的综合成本，成为当前学术界和产业界共同关注的课题。提高光伏组件的光电转换效率是降低晶硅光伏发电系统综合成本的一个重要推手，可有效地降低光伏发电的单瓦成本。

针对多晶硅光伏组件，提升其光电转换效率有两个途径：(1) 研发高光电转换效率多晶硅太阳电池的关键制造技术，(2) 寻找降低多晶硅光伏组件封装能量损耗有效方法。传统 Al-BSF 多晶硅太阳能电池存在原理性结构缺陷[1,2]，其前表面光反射损失大、背表面长波太阳光子寄生吸收损耗和表面载流子复合损耗高，限制了其光电转换效率进一步提升。特别是低成本金刚线切割[3,4]的低成本多晶硅太阳电池前表面光反射损失大成为一个产业瓶颈问题。针对多晶硅太阳电池前表面的光电损耗，学术界和产业界开发及产业化了新型纳米绒面陷光技术[5-7]，并匹配集成多层氮化硅减反光技术、浅结高方阻技术及多主栅密细栅二次印刷技术[8,9]，有效地降低了电池前表面的光电损失。针对多晶硅太阳电池背表面的光电损耗，学术界和产业界开发及示范了新结构和新技术的晶硅太阳电池，如：纳米绒面叠加 PERC 电池结构和技术[10]、TOP-Con 电池结构和技术[11]等。有效地降低了电池背表面的光电损耗，光电转换效率获得了显著提升。另一方面，多晶硅电池封装成组件后光电损耗大。其中，组件中电池产生的光电流要流经串联的电池串，电池内阻将导致欧姆损耗，组件的填充因子和光电转换效率降低。另外，组件中电池片间隙、角落、空白边缘及电池串联焊带等区域为非光活性区，面积高达总组件总面积的 12-15%，造成光学浪费。上述两方面的光电损耗是限制光伏组件光电转换效率进一步提升的重要因素。

本文针对多晶硅光伏组件的光电损耗，产线上集成了半片电学结构及光学增益结构，制备了工业尺寸的多晶硅光伏组件。通过降低组件串联电阻导致的欧姆损耗及增益了非光活性区域的光利用，提升了组件的光电转换效率及发电功率。在此基础上，表征和分析了半片电学结构及光学增益结构的提效能力。

1　实验

本研究选用高转换效率的纳米绒面 PERC 多晶硅太阳电池片封装多晶硅光伏组件，其标准产线封装工艺流程如图 1 所示。主要包括串焊、排版、端焊、EL 检测、层压、装框、清洗及光电转换性能测试。其中，电池片为整片或采用激光切割成半片，分别制备整片和半片多晶硅光伏组件。标准的整片多晶硅光伏组件由 60 片多晶硅电池串联组成，形成 10×6 的整片电池矩阵。半片多晶硅光伏组件由 120 片半片多晶硅电池组成，分成上下两部分，各由 60 片半片多晶硅电池串联组成，形成两个 10×6 的半片电池矩阵，从而降低电学损耗。两部分 60 片半片多晶硅电池串在外部并联，以获取与整片多晶硅光伏组件相近的电流和电压。为了增加电池片间隙、角落及空白边缘区域入射太阳光的吸收利用，将组件背面传统高透 EVA 替换为高反光率白色 EVA，增益组件中电池片光吸收。同时，在电池片串焊工艺中在主栅线焊带表面贴增反光膜，提高对焊带上入射光的高反射利用，进一步增益组件中电池片光吸收。本研究获得三种多晶硅光伏组件，包括：整片多晶硅光伏组件、半片多晶硅光伏组件以及具有光增益结构(叠加焊带贴增反光膜及白色 EVA) 的半片多晶硅光伏组件。在模拟太阳光照下分别测试三种组件的光伏特性(电流 vs 电压) 曲线，获得关键光电参数，表征组件的光电转换性能。

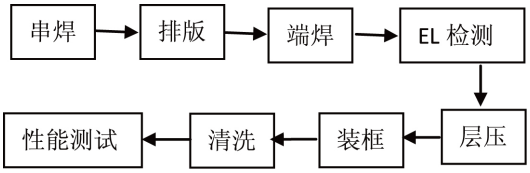

图 1　多晶硅光伏组件的制备过程

Fig.1 Fabrication process of the multi-crystalline silicon photovoltaic modules.

2　结果与讨论

图 2 为整片和半片组件的光伏特性曲线，中间插入了两种组件的电致发光照片。从图中可以看

出，两个组件的短路电流和开路电压变化不大。在光伏特性曲线弯曲处，半片相对整片多晶硅光伏组件的光伏特性曲线明显凸起，说明半片多晶硅光伏组件具有更大的填充因子和更大发电功率。表 1 统计了整片和半片两种多晶硅光伏组件的关键光电参数。相对于整片多晶硅光伏组件，半片多晶硅光伏组件的开路电压 V_{oc} 和短路电流 I_{sc} 均有所提升，分别提高了 0.06 V 和 0.061 A，提升比率分别为 0.15%和 0.63%，增加比例不大。但半片多晶硅光伏组件的填充因子 FF 相对于整片多晶硅光伏组件提升显著，从 78.23 增加到 79.73%，提升比率达 1.92%。综合短路电流、开路电压及填充因子三个因素，半片多晶硅光伏组件的光电转换性能明显提高，光电转换效率 PEC 和最大发电功率 P_{max} 分别达到了 18.80% 和 305.6 W。相对于整片多晶硅光伏组件，其光电转换效率和最大发电功率分别绝对增加0.49%和 8.0 W。光电转换性能改善的主要因素是半片多晶硅光伏组件的填充因子得到了有效地提升。

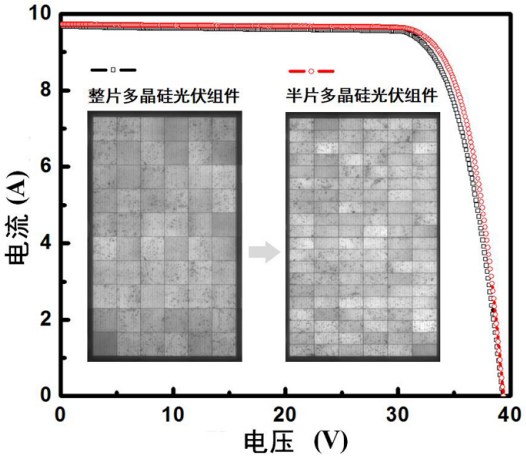

图 2 整片和半片多晶硅光伏组件的光伏特性(电流 vs 电压)曲线，插图为整片和半片多晶硅光伏组件的电致发光照片

Fig.2 The current density-voltage curves of the multi-crystalline silicon photovoltaic modules with full-cell or half-cells

表 1 整片和半片多晶硅光伏组件的关键光电参数

Tab. 1 The performance parameters of the multi-crystalline silicon photovoltaic modules with full-cells or half-cells

/	*Voc*	*Isc*	*FF*	R_s	P_{max}	*PCE*
整片组件	39.34 V	9.668 A	78.23%	399.5 mΩ	297.6 W	18.31%
半片组件	39.40 V	9.729 A	79.73%	333.1 mΩ	305.6 W	18.80%
增加值	0.06 V	0.061 A	1.50%	−66.4 mΩ	8.0 W	0.49%
提升比率	0.15%	0.63%	1.92%	−16.6%	2.69%	2.68%

整片和半片两种多晶硅光伏组件的差异是电池面积和数量不同，如图 2 插入的电致发光照片所示。半片多晶硅光伏组件分上下两部分，二者外部并联使得两部分电流叠加，形成与整片多晶硅光伏组件相近的电流和电压。但在半片组件上下两个部分中，串联的半片电池片产生半数光电流通过的路径小于整片多晶硅光伏组件中串联的整片电池片产生光电流通过的路径，使得组件串联电阻降低。实验中，整片和半片两种多晶硅光伏组件的串联电阻分别为 399.5 mΩ 和 333.1 mΩ，半片多晶硅光伏组件的串联电阻相对降低了 66.4 mΩ，降低比率达 16.6%。太阳电池或光伏组件的填充因子可表示为[12]：

$$FF = FF_0(1-r_s) = FF_0(1-R_s/R_{ch}) \quad (1)$$

其中，FF_0 为忽略串联电阻的填充因子，R_s 为串联电阻，R_{ch} 为最大功率点的电阻。结合两种组件的串联电阻及公式(1)，半片多晶硅光伏组件的填充因子提升原因可归结为半片电学结构使其具有较低的串联电阻。

图 3 为引入光学增益结构前后的半片多晶硅光伏组件的光伏特性曲线。其中插图为光学增益结构，包括主栅焊带贴增反光膜及传统透光 EVA 替换为白色高反光率 EVA。从图中可以看出，引入光学增益结构的半片多晶硅光伏组件的短路电流明显增加。表 1 统计了两种组件的关键光电参数。引入光学增益结构前后的半片多晶硅光伏组件的短路电流从 9.729 A 增加到了 9.991 A，增加比率达 2.69%。同时，引入光学增益结构的半片多晶硅光伏组件的开路电压几乎不变，填充因子略有降低，降低比例仅 0.3%。综合短路电流、开路电压及填充因子三个因

素，引入光学增益结构的半片多晶硅光伏组件的光电转换性能改善，光电转换效率 *PEC* 和最大发电功率 P_{max} 分别达到了 19.26%和 313.0 W。引入光学增益结构后，半片多晶硅光伏组件的光电转换效率和最大发电功率分别绝对增加 0.46%和 7.5 W。光电转换性能改善的主要因素是短路电流得到了有效地提升。

太阳电池或光伏组件的短路电流取决于内量子效率和电池吸收光谱响应范围内的太阳光子数。在本研究，两种组件所用电池片档位相同，其内量子效率基本一致。从光吸收角度分析，半片多晶硅光伏组件中电池片间隙、角落及其四周空白边缘区域将常规透光 EVA 优化为白色高反光率 EVA，能够提高对入射光的反射。反射光随后经上表面再次反射后将进入到电池片中，提高了电池片对太阳光的吸收。同时，电池片主栅上增加了反光焊带，能够提高对入射光的反射。随后，反射光经上表面再次反射进入到电池片中，提高了电池片对太阳光的吸收。综合上述两个方面的光学增益，提升了叠加光学增益结构的半片多晶硅光伏组件的短路电流。

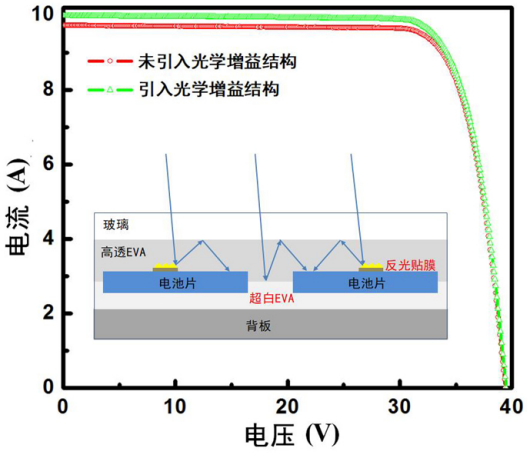

图 3　引入光学增益结构前后的半片多晶硅光伏组件的光伏特性(电流 vs 电压) 曲线，插图为光学增益结构，包括焊带贴增反光膜及传统 EVA 替换为高反光率白色 EVA

Fig.3 The current density-voltage curves of the multi-crystalline silicon photovoltaic modules before and after introducing optical gain structure.

3　结论

通过引入半片电学结构、焊带增反光膜及高反光率白色 EVA，提升了多晶硅光伏组件的光电转换性能。半片电学结构降低了组件的串联电阻，提高了组件的填充因子和光电转换效率，最大发电功率可提升 8.0 W。焊带增反光膜及白色 EVA 能够增益组件中电池的光吸收，提高了组件的短路电流和光电转换效率，最大发电功率可提升 7.4 W。集成半片电学结构和光学增益结构的多晶硅光伏组件有效地降低了光电损失，光电转换效率和最大发电功率分别达到了 19.26%和 313.0 W。

表 2　引入光学增益结构前后的半片多晶硅光伏组件的关键光电参数

Tab. 2 The performance parameters of the multi-crystalline silicon photovoltaic modules before and after introducing optical gain structure.

/	*Voc*	*Isc*	*FF*	R_s	P_{max}	*PCE*
常规半片组件	39.40 V	9.729 A	79.73%	333.1 mΩ	305.6 W	18.80%
贴膜+白色 EVA 半片组件	39.41V	9.991 A	79.48%	327.4 mΩ	313.0 W	19.26%
增加值	0.01 V	0.262 A	-0.25%	5.7 mΩ	7.4 W	0.46%
提升比率	0.03%	2.69%	-0.31%	1.7%	2.42%	2.45%

参考文献:

[1] J. J. Liu, Y. Yao, S. Q. Xiao, et al., Review of status developments of high efficiency crystalline silicon solar cells [J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2018, 51, 123001.

[2] F. Fertig, R. Lantzsch, A. Mohr, M. Schaper, et al., Mass production of p-type Cz silicon solar cells approaching average stable conversion efficiencies of 22% [J]. Energy Pro-

cedia 2017, 124 388-354.

[3] J. Walters, K. Sunder, O. Anspach, et a1., Challenges associated with diamond wire sawing when generating reduced thickness mono-crystalline silicon wafers [C]. IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2016, 0724-0728.

[4] W. H. Lu, X. Y. Qiu, Q. G. Zhao, et a1., Enhanced optoelectronic conversion in diamond-wire sawing multi-crystalline silicon solar cells through nanotexture-induced photon management [J]. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2018, 185, 439-444.

[5] J. Oh, H. C. Yuan, H. M. Branz, An 18.2% - efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures [J]. Nat. nanotech., 2012, 7, 743-748.

[6] X. Y. Ye , S. Zou , K. X. Chen , Jianjiang Li, et a1., 18.45% - Efficient Multi - Crystalline Silicon Solar Cells with Novel Nanoscale Pseudo-Pyramid Texture [J]. Adv. Funct. Mater., 2014, 24, 6708-6716.

[7] W. H. Lu, X. Y. Qiu, Q. G. Zhao, et a1., Enhanced optoelectronic conversion in diamond-wire sawing multi-crystalline silicon solar cells through nanotexture-induced photon management [J]. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 2018, 185, 439-444.

[8] S. Brauna, G. Hahna, R. Nissler, et a1., Multi-busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption [J]. Energy Procedia 2013, 38: 334 - 339.

[9] W. K.W. Huang, T. S. Chen, C. T. Tsai, et a1., Updates on some technologies for c-Si based solar cells manufacturing [J]. Energy Procedia 2011, 8, 435 - 442.

[10] J. S. Jin, H. Shen, P. T. Zheng, et a1., >20.5% diamond wire sawn multicrystalline silicon solar cells with maskless inverted pyramid like texturing [J]. IEEE J. Photovoltaics 2017, 7, 1264-1269.

[11] F. Schindler, B. Michl, P. Krenckel, et a1., How to achieve efficiencies exceeding 22% with multicrystalline n-type silicon solar cells [J]. Energy Procedia 2017, 124, 777 - 780.

[12] M. A. Green, Solar cell fill factors: General graph and empirical expressions [J]. Solid State Electron., 1981, 24, 788 - 789.