

无主栅太阳能电池栅线的设计优化

■ 黄纬¹ 陈喜平^{1*} 李俊斐¹ 何胜¹ 徐跃进² 张驰¹ 孙建洋¹

(1. 浙江正泰太阳能科技有限公司; 2. 海宁正泰新能源科技有限公司)

摘要: 无主栅太阳能电池技术实现了高效率 and 低成本的有效结合。该文采用理论计算的方式, 对不同主栅/金属丝数目的太阳能电池进行了设计优化, 研究了太阳能电池效率随主栅/金属丝数目及细栅宽度变化的关系。结果表明, 随着主栅/金属丝数目的增加, 太阳能电池效率逐渐提升; 其中, 在最优细栅设计下, 相较于 4 主栅太阳能电池, 15 金属丝太阳能电池的效率提升了 0.48%, 正面总体银浆用量节省了 78%。

关键词: 无主栅; 太阳能电池; 电阻; 效率

0 引言

近几年来, 为了提高太阳能电池效率, 太阳能电池主栅/金属丝数目成为研究的重点。太阳能电池厂商从提高效率的角度将主栅数目从 3 根提高到 4 根, 甚至 5 根。为了实现效率和成本的双赢, 早在 2007 年, Day4 Energy technology 提出了无主栅太阳能电池技术^[1], 该技术不再在太阳能电池上印刷主栅, 并采用多根金属丝(≥ 10 根)代替常规焊带, 在实现提升太阳能电池效率的同时, 节省了银浆的用量, 降低了太阳能电池的成本。2011 年, Meyer Burger 在 Day4 Energy technology 技术的基础上, 提出了智能网栅技术, 并形成了该项技术的工艺方案^[2-3]。Braun^[4-5] 和 Schmid 公司结合无主栅太阳能电池技术, 采用红外焊接的方式, 实现了 0.33% 组件效率的提升^[6]。美国的 GT Advanced Technology 公司也发布了名为 Merlin 的无主栅技术^[7], 该技术采用细栅分段结构和金属浮动连接线的技术方案, 进一步提升了无主栅太阳能电池的技术优势。这些技术的进步使得无主

栅太阳能电池技术逐渐成为一个提效方向。因此, 本文从理论计算的方向出发, 结合太阳能电池电极的设计机理, 形成了无主栅太阳能电池的栅线设计方案, 实现了太阳能电池效率提升和正面总体银浆用量的降低。

1 栅线的设计方法

为了计算太阳能电池的效率, 我们采用二极管模型^[8-9]模拟太阳能电池的 $I-V$ 曲线, 以获得太阳能电池的效率。工作电流 I ^[9] 可表示为:

$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{\frac{V + R_s I}{n V_T}} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, I_{sc} 为短路电流; I_0 为反向饱和电流; n 为 p-n 结的品质因子 (这里认为太阳能电池理想, 即 $n=1$); R_s 为太阳能电池串联电阻; R_{sh} 为太阳能电池并联电阻; V_T 为热电压, $V_T = KT/q$, 其中, K 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子电荷。

忽略并联电阻的影响, 太阳能电池的工作电压和工作电流的关系式可表示为:

收稿日期: 2018-05-17

通信作者: 陈喜平 (1986—), 女, 工程师, 主要从事太阳能电池及组件的研发和性能研究、辅料导入等方面的工作。xiping.chen@astronergy.com

$$V = V_T \ln \left(\frac{I_{sc} - I}{I_0} + 1 \right) - IR_s \quad (2)$$

由式(2)可知,在理想条件下,太阳电池的工作电压主要受短路电流和串联电阻的影响。而栅线(主栅/金属丝和细栅线)的遮挡面积会直接影响短路电流。假设无栅线遮挡时的短路电流为 I_{sc0} ,栅线总遮挡面积为 S' ,太阳电池面积为 S_0 ,则应满足式(3):

$$I_{sc} = I_{sc0} \left(1 - \frac{S'}{S_0} \right) \quad (3)$$

同时,太阳电池的串联电阻应满足式(4):

$$R_s = R_{finger} + R_{emitter} + R_{bus} + R_{fc} + R_b + R_{bAl} + R_{bc} \quad (4)$$

式中,各种电阻的含义及表达式^[10-11]如表1所示。

表1 太阳电池电阻的分类及表达式

电阻分类	计算公式
细栅线电阻 R_{finger}	$R_{finger} = \frac{S}{12NL} \cdot \frac{\rho}{w_f h_f} \left(\frac{L}{N} - w_{bus} \right)$
发射极电阻 $R_{emitter}$	$R_{emitter} = \frac{S^2 \rho_e}{12NL \left(\frac{L}{N} - w_{bus} \right)}$
金属丝电阻 R_{bus}	$R_{bus} = \frac{\rho}{12NQ^2} \cdot \frac{L}{w_{bus} h_{bus}}$
前接触电阻 R_{fc}	$R_{fc} = \frac{S \rho_{front}}{L[w_f L + N w_{bus}(S - w_f)]}$
基体电阻 R_b	$R_b = \frac{\rho_{base} w_{base}}{L^2}$
铝背场电阻 R_{bAl}	$R_{bAl} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\rho_{Al}}{L h_{Al} N} \left(\frac{L}{N} - w_{bus} \right)$
背接触电阻 R_{bc}	$R_{bc} = \frac{\rho_{rc}}{L^2}$

注: L 为太阳电池的长度; S 为两个细栅线之间的距离; w_f 为细栅线宽度; h_f 为细栅线高度; w_{bus} 为主栅/金属丝宽度; h_{bus} 为细栅线高度; N 为主栅数/金属丝数目; Q 为主栅分段数; ρ_e 为发射极电阻率; ρ 为细栅线电阻率; ρ_{front} 为前接触电阻率; ρ_{rc} 为背接触电阻率; ρ_{Al} 为铝背场电阻率; ρ_{base} 为硅片的电阻率; w_{base} 为硅片厚度; h_{Al} 为铝背场厚度

由表1可知,太阳电池串联电阻与太阳电池栅线设计相关。根据参考文献^[12-15],本文对太阳电池的栅线进行了设计优化,以实现光损失和电

损失的最小化。为了简化计算,认为太阳电池主栅的线电阻为焊带或金属丝的电阻^[12]。

2 理论计算结果

设计一块边长为 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ 的p型多晶硅太阳电池,结合3主栅太阳电池的试验参数,研究主栅/金属丝和细栅宽度变化对太阳电池效率提升的影响。其中,计算参数参照市场上常见的3主栅太阳电池参数,具体为: $L=156 \text{ mm}$ 、 $S=1.719 \text{ mm}$ 、 $w_f=48 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $h_f=16 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $w_{bus}=1.4 \text{ mm}$ 、 $h_{bus}=13 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $N=3$ 、 $Q=8$ 、 $\rho_e=87 \text{ }\Omega$ 、 $\rho=3 \times 10^{-8} \text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 、 $\rho_{front}=0.5 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ 、 $\rho_{rc}=1 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ 、 $\rho_{Al}=4 \times 10^{-8} \text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 、 $w_{base}=180 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $h_{Al}=5 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $I_{sc}=8.732 \text{ A}$ 。

2.1 主栅/金属丝数目变化对太阳电池效率的影响

和上述作为参考的3主栅太阳电池细栅设计一致,增加主栅/金属丝数目,电流收集路径 $B(B=L/2N)$ 变短,考虑到串联电阻和短路电流的变化,主栅/金属丝的宽度随之减小,主栅/金属丝总宽度随主栅/金属丝数目呈现出先下降后平稳的趋势,具体如图1所示。因此,主栅/金属丝数目的增多可以减少光的遮挡,增加光的利用。

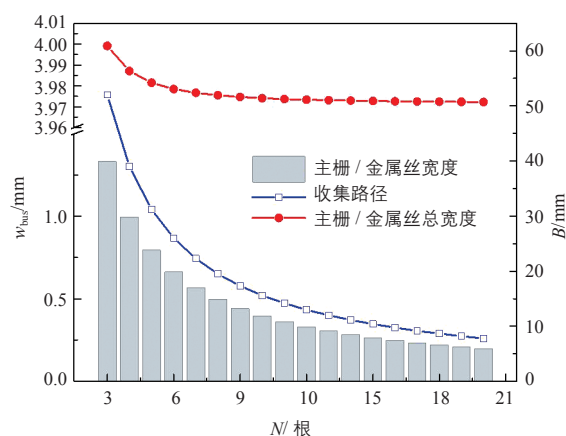
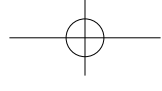


图1 太阳电池电流收集路径 B 和主栅/金属丝宽度 w_{bus} 随主栅/金属丝数目 N 的变化

同时,图2给出了太阳电池串联电阻和效率随主栅/金属丝数目的变化图。从图2可以看



出,随着主栅/金属丝数目的增加,串联电阻呈现先快速下降后缓慢下降的趋势。与之相反,电池效率则呈现先快速增加后缓慢增加的趋势;当金属丝大于11根时,电池效率基本保持不变。同时从图2可知,当太阳电池金属丝增加到15根时,相对于3主栅太阳电池,其效率提升约0.3%,相对于4主栅太阳电池,其效率提升约0.16%。因此,仅通过增加主栅/金属丝的方式,对太阳电池效率的提升不大,所以还需要优化细栅设计。

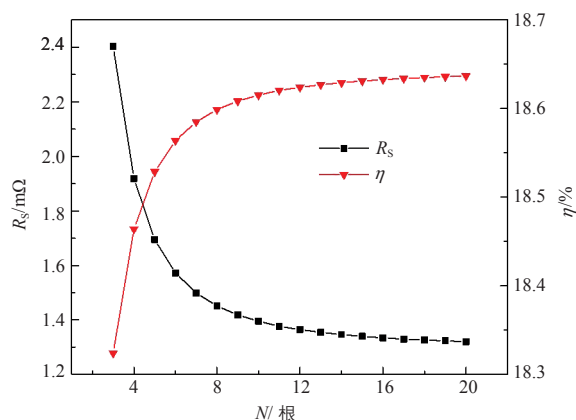


图2 太阳电池串联电阻 R_s 和效率 η 随主栅/金属丝数目 N 的变化

2.2 细栅宽度变化对太阳电池效率提升的影响

保持图1中的主栅/金属丝最优宽度不变,根据现行栅线印刷工艺水平,假定细栅高宽比为0.38,通过优化细栅设计,研究了细栅宽度改变对15金属丝和4主栅太阳电池的细栅间距、正面总体银浆用量节省量和电池效率的影响。

图3为细栅间距和正面总体银浆用量节省量随细栅宽度的变化图。从图3可以看出,随着细栅宽度的降低,4主栅和15金属丝太阳电池的细栅间距逐渐减小,并且二者差距基本呈递增趋势。同时图3显示,随着细栅宽度的减小,相对于4主栅太阳电池,15金属丝太阳电池(无主栅)的正面总体银浆用量节省量 S_{Ag} 逐渐增加;当细栅宽度降为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时,15金属丝太阳电池正面总体银浆用量比4主栅太阳电池正面总体银浆用量节省78%。其中,正面总体银浆用量节省量 S_{Ag} 应满足式(5):

$$S_{Ag} = \frac{(m_{Ag-4} - m_{Ag-15})}{m_{Ag-4}} \quad (5)$$

式中, m_{Ag-4} 、 m_{Ag-15} 分别为4主栅、15金属丝太阳电池正面总体银浆用量。

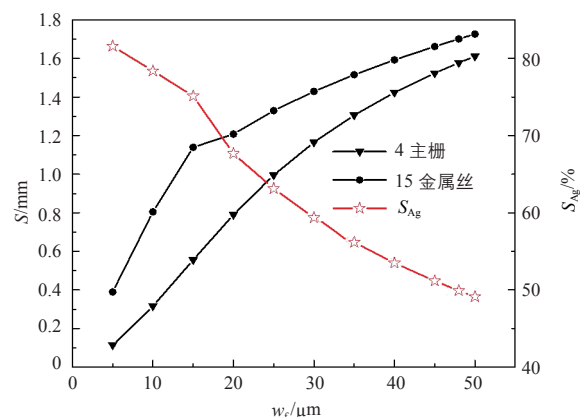


图3 细栅间距 S 和正面总体银浆用量节省量 S_{Ag} 随细栅宽度 w_f 的变化

同时,随着细栅宽度变化,当细栅设计最优化时,太阳电池串联电阻和效率如图4所示。从图4可以看出,随着细栅宽度的降低,4主栅太阳电池串联电阻呈现先下降后上升的趋势;15金属丝时,细栅宽度细化对总电阻的影响较小。与电阻变化相反,随着细栅宽度的减小,4主栅太阳电池的效率呈现先缓慢增加后快速降低的趋势;细栅宽度越小,4主栅和15金属丝太阳电池的效率差距越大,说明细栅技术有利于无主栅太阳电池技术的实施。同时数据给出,当细栅宽度分别为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 及 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时,4主栅、15金属丝太阳电池的效率分别达到最大值,分别为18.54%、19.02%。相对于4主栅太阳电池,在最

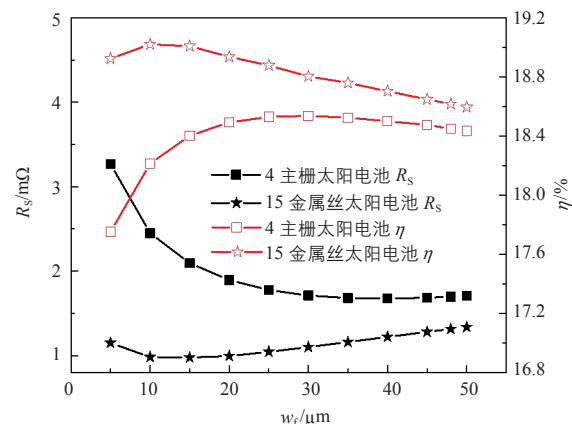


图4 太阳电池串联电阻 R_s 和效率 η 随细栅宽度 w_f 的变化

佳细栅设计时, 15 金属丝太阳电池效率提升了 0.48%。在目前易实现的细栅线宽度 $30\ \mu\text{m}$ 时, 效率仍有 0.27% 的提升。

2.3 组件串接技术的影响

在无主栅光伏组件焊接技术中, 焊丝结构为圆形, 因此, 入射到焊丝上的光线经焊带、EVA、玻璃反射后, 可以再次进入太阳电池进行二次利用。假设 EVA 和玻璃的折射率一致, 不计 EVA 的厚度, 垂直入射的光经焊带反射后的路径如图 5 所示。

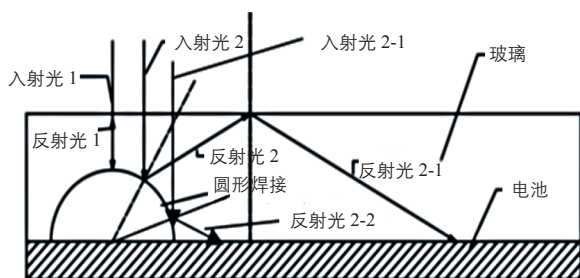


图 5 垂直入射的光经焊带反射后的路径

假设入射光线光强为 a , 入射至焊带上的入射角为 r , 焊带反射光共分 2 种: 1) $2r <$ 玻璃全反射角: 焊带反射光由玻璃面透射出去, 对太阳电池无贡献。2) $2r >$ 玻璃全反射角: 焊带反射光经玻璃全反射后, 一部分入射至太阳电池表面, 入射角为 $2r$, 对太阳电池贡献 $a\cos(2r)$ 的光强; 另一部分直接反射到太阳电池表面。

假设 15 金属丝太阳电池焊丝焊接后截面为半圆形, 半径为 $0.15\ \text{mm}$, 玻璃全反射角为 41° 。考虑焊带的实际反射率和光反射过程中的损失, 经计算, 太阳电池对圆形焊带反射光的有效利用率为 30%, 则圆形焊带反光提升效率为 0.03%。同时根据文献 [16] 可知, 串联电阻损失基本相等, 因此这里不考虑。

3 结论

本文给出了无主栅太阳电池的栅线设计和效率计算的方法。通过对计算数据进行分析可知, 增加主栅 / 金属丝数目, 尤其是匹配细栅宽度优

化, 可大幅提升无主栅太阳电池的效率, 并且降低正面总体银浆用量。同时, 采用圆形金属丝封装技术还可利用光的二次反射, 进一步提高光伏组件效率。文中的计算方法和计算结果可为实际生产提供理论支持。

参考文献

- [1] Schneider A, Rubin L, Rubin G. Solar cell efficiency improvement by new metallization techniques - the Day 4 Electrode Concept[A]. Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference[C]. Hawaii, 2006.
- [2] Faes A, Despeisse M, Levrat J, et al. Smart wire interconnection technology[A]. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition[C]. Amsterdam, 2014.
- [3] Papet P, Andreetta L, Lachenal D, et al. New cell metallization patterns for heterojunction solar cells interconnected by the Smart Wire Connection Technology[J]. Energy Procedia, 2015, (67): 203 - 209.
- [4] Braun S, Hahn G, Nissler R. Multi-Busbar solar cells and modules: high efficiencies and low silver consumption[J]. Energy Procedia, 2013, (38): 334 - 339.
- [5] Braun S, Micard G, Hahn G. Solar cell improvement by using a multi busbar design as front electrode[J]. Energy Procedia, 2012, (27): 227 - 233.
- [6] Johann Walter, Marco Tranitz, Michael Volk. Multi-wire interconnection of busbar-free solar cells[J]. Energy Procedia, 2014, (55): 380 - 388.
- [7] GT Advanced Technologies. Photo Release—GT Advanced Technologies Announces Merlin(TM) Metallization and Interconnect Technology [EB/OL]. <http://www.globenewswire.com/news-release/2014/08/11/657676/10094067/en/Photo-Release-GT-Advanced-Technologies-Announces-Merlin-TM-Metallization-and-Interconnect-Technology.html>, 2014-08-11.
- [8] Chan D S H, Pahang J C H. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from $I-V$ characteristics[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1987, (34): 286 - 293.
- [9] 魏晋云. 太阳电池效率与串联电阻的近似指数关系 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(3): 356 - 358.
- [10] Ansgar Mette. New concepts for front side metallization of industrial silicon solar cells[D]. German: Dissertation University of Freiburg, 2007.
- [11] 王军, 王鹤, 杨宏, 等. 太阳电池串联电阻的一种精确计算方法 [J]. 电源技术, 2008, (10): 681 - 683.
- [12] 杨乐, 高华. 太阳电池栅线的优化设计 [J]. 光电子技术, 2012, 27(1): 41 - 44.
- [13] 任丽, 王倩, 张东, 等. 硅太阳电池的电极优化 [J]. 太阳能学报, 2013, 34(10): 1746 - 1749.
- [14] 朱薇桦. 晶体硅太阳电池电极研究 [D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [15] 高华, 黄其煜. 高方阻密栅太阳电池发射结方阻的优化 [J]. 光电技术应用, 2013, 28(1): 18 - 24.
- [16] 孔凡建, 段永波, 严荣飞. 晶体硅组件的串联电阻损失及改善 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(1): 13 - 17. 太阳