

· 光电器件与材料 ·

太阳电池栅线优化设计

杨 乐, 高 华

(上海超日太阳能科技股份有限公司, 上海 201406)

摘 要: 优化设计太阳电池的电极图形可以获得高的光电转换效率。文中以实例介绍了晶体硅太阳电池上丝网印刷电极的优化设计, 讨论了电池的功率损耗与扩散薄层电阻及细栅线宽度的关系, 在原始设计的基础上设计出了理想尺寸的太阳电池栅线。经过优化改进的太阳电池可降低由电极设计引起的总功率损失, 并且提高了电池片的光电转化效率。

关键词: 太阳电池; 栅线设计; 功率损失; 薄层电阻

中图分类号: TM914.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255 (2012)01-0041-04

Optimal Design of Solar Cell Grid Line

YANG Le, GAO Hua

(Shanghai Chaori Solar Energy Science & Technology Co., Ltd., Shanghai 201406, China)

Abstract: The electrode pattern of the optimal design for the solar cell can get the high photoelectric conversion efficiency. The optimal design of the screen-printed electrode in the crystalline silicon solar cell is introduced with the example, and the relation among the power loss in the solar cell, the diffusion sheet resistance and the width of the thin grid line is discussed. On the basis of the original design, the ideal solar cell grid line is designed. The optimal solar cell can reduce the total power loss caused by the electrode design, and increase the photoelectric conversion efficiency of the cell.

Key words: solar cell; grid line design; power loss; sheet resistance

对于太阳能电池来说, 为了获得尽可能高的光电转化效率, 对电池的结构必须进行详细设计。金属栅线负责把电池体内的光生电流引到电池外部。太阳电池栅线的最优设计是以电池总功率损耗最小为依据的。栅线结构设计得好, 将使电池的串联电阻最小, 从而使功率损耗最小、输出功率最大, 这对大面积功率输出的单体太阳能电池尤为重要。

1 栅线设计原理

与上电极有关的功率损失机理包括由电池顶部扩散层的横向电流所引起的损耗、各金属线的串联电阻以及这些金属线与半导体之间的接触电阻引起的损耗。另外, 由于电池被这些金属栅线遮蔽所引

起的遮光损失直接降低光电流输出。以下太阳电池栅线的最优设计公式可参阅文献[1]和[2]。

选取如图1所示的对称布置的上电极的一个单元来研究收集光生载流子过程中带来的各种损失。

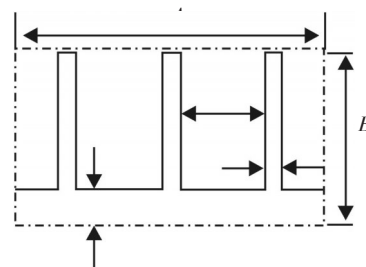


图1 典型的单电池的重要尺寸

收稿日期: 2012-02-03

作者简介: 杨乐(1983-), 吉林长春人, 硕士, 工程师, 研究方向为单晶硅太阳电池; 高华(1982-), 男, 四川资阳人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为晶体硅太阳电池。

在电池栅线设计中,扩散薄层的横向电流损失是主要的。薄层电阻的重要性之一,在于它决定了顶电极栅线之间的理想间隔。顶层横向电流总相对功率损耗由式(1)给出

$$p_{tl} = \frac{R_s S^2 J_{mp}}{12 V_{mp}} \quad (1)$$

其中, J_{mp} 和 V_{mp} 分别为最大功率点的电流密度和电压, R_s 为这一层的薄层电阻, S 是两条细栅线的间隔距离。

细栅线电阻相对功率损耗为

$$p_{rf} = \frac{B^2 R_f S J_{mp}}{m W_F V_{mp}} \quad (2)$$

主栅线电阻相对功率损耗为

$$p_{rb} = \frac{A^2 B R_b J_{mp}}{m W_B V_{mp}} \quad (3)$$

如果电极各部分是线性的逐渐变细的,则 m 值为4;如果宽度是均匀的,则 m 值为3。 R_f 是电极的细栅线的金属层的薄层电阻, R_b 是主栅线的薄层电阻,这里直接考虑焊带电阻,公式为

$$R_f = \frac{\text{金属体电阻率}}{\text{细栅厚度}} \quad (4)$$

$$R_b = \frac{\text{焊带电阻率}}{\text{厚度}} \quad (5)$$

由式(2)~式(5)可知,选用低体电阻率的金属材料,并且增加主栅线和细栅线的厚度,可适当的降低 R_f 和 R_b [3]。

细栅线遮光相对功率损耗为

$$p_{sf} = \frac{W_F}{S} \quad (6)$$

主栅线遮光相对功率损耗为

$$p_{sb} = \frac{W_B}{B} \quad (7)$$

忽略直接由半导体到主栅线的电流,接触电阻损耗仅仅是由于细栅线所引起,这部分功率损耗一般近似为

$$p_{cf} = \frac{R_c S J_{mp}}{W_F V_{mp}} \quad (8)$$

其中, R_c 是接触电阻率。

使这些损失最小的主栅最佳尺寸可通过将式(3)和式(5)相加,然后对 W_b 求导而求出。结果是当主栅线的电阻损耗等于遮光损失时,其尺寸为最佳。公式为

$$W_B = AB \sqrt{\frac{R_b J_{mp}}{m V_{mp}}} \quad (9)$$

主栅线引起的功率损耗最小值为

$$(p_{rb} + p_{sb})_{\min} = 2A \sqrt{\frac{R_b J_{mp}}{m V_{mp}}} \quad (10)$$

对于细栅线的最佳尺寸,考虑当栅线的间距变得非常小以致横向电流损耗可忽略不计,即 $S \rightarrow 0$ 时,细栅线设计出现最佳值。公式为

$$\frac{W_F}{S} = B \sqrt{\left(\frac{R_f}{m} + \frac{R_c}{B^2}\right) \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (11)$$

细栅线引起的功率损耗最小值为

$$(p_{tl} + p_{rf} + p_{sf} + p_{cf})_{\min} = 2B \sqrt{\left(\frac{R_f}{m} + \frac{R_c}{B^2}\right) \frac{J_{mp}}{V_{mp}}} \quad (12)$$

对于式(11)要想得到最佳栅线设计可通过简单的迭代法实现。方法为:给定一个工艺上可实现的 W_F 值,对式(11)用实验值代入求得一个 S_0 值,取 $S_1 = S_0/2$ 为初试值,然后按照牛顿迭代法进行迭代计算。

$$S_n = \frac{S_{n-1}(3p_{sf} - p_{rf} - p_{cf})}{2(p_{sf} + p_{tl})} \quad (n=2,3,4,\dots) \quad (13)$$

这个过程将收敛到一个不变的值上,这个值即为最佳栅线设计。

2 栅线设计优化实例

设计一个边长为125 mm、对角为165 mm的 n^+p 型单晶硅太阳能电池的上电极。在这里把4个角近似为直角,栅线距离硅片边缘1 mm。采用丝网印刷,电极材料为银浆,其体电阻率为 $3.0 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,焊带体电阻率为 $2.0 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 。在AM1.5光谱下,电池的最大功率点电压 V_{mp} 为0.525 V,电流密度 J_{mp} 大约为 34 mA/cm^2 。细栅线厚度为 $30 \mu\text{m}$,焊好后主栅部分厚度为 $150 \mu\text{m}$ 。栅线和半导体之间的的接触电阻率为 $2.8 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{2[4]}$ 。则根据式(4)和式(5)细栅线和主栅线的薄层电阻分别为

$$R_f = 0.001(\Omega/\square)$$

$$R_b = 0.00013(\Omega/\square)$$

以上结果显示 $R_f > R_b$, 最好选择长主栅线、短细栅线的电极设计方案。电池可分为4个单电池,每个单元长 $A=123 \text{ mm}$, $B=30.75 \text{ mm}$ 。

由式(9)计算出每个单电池等宽度主栅线($m=3$)的最佳宽度为

$$W_B = AB \sqrt{\frac{R_b J_{mp}}{m V_{mp}}} = 12.3 \times 3.075 \times \left(\frac{0.00013 \times 0.034}{3 \times 0.525}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.0634(\text{cm})$$

因为实际主栅线是2个单元电池公用,所以主栅线的实际最佳宽度为0.127 cm。由式(10)可得出上电极主栅部分总功率损失为

$$(p_{rb} + p_{sb})_{\min} = 2A \sqrt{\frac{R_b J_{mp}}{m V_{mp}}} = 2 \times 12.3 \times \left(\frac{0.00013 \times 0.034}{3 \times 0.525} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.0412$$

考虑工艺上的因素,焊接好后主栅厚度控制在140~170 μm之间,即把 R_b 控制在0.000118~0.000143 Ω/□之间,上电极主栅部分总功率损失可控制在4.32%以下。

工艺上可实现的 W_F 值取为90 μm,代入式(11)求出 S_0 值,扩散薄层电阻控制在50 Ω/□。由式(13)迭代法收敛到一个不变的值上,得到此工艺下的最佳栅线间距和各功率损耗如表1所示。考虑工艺上的因素,细栅线的厚度控制在30~40 μm之间,即把 R_f 控制在0.00075~0.001 Ω/□之间,细栅线电阻相对功率损耗 P_{rf} 可控制在0.53%以下。

由于实际生产中预先设计的栅线尺寸与理想尺寸会有一定的偏差,需要在原始设计的基础上进行调整以得到较理想的栅线^[5]。将工艺上可实现的 W_F 值分别取为60、70、80、90和100 μm,通过计算和分析得到不同的扩散薄层电阻下的最佳细栅线间距 S 值,如图2所示。

当 W_F 值取为90 μm时,改变 R_s ,此时各种功率损耗与 S 的关系如图3所示。当 R_s 取为50 Ω/□时,改变 W_F ,此时各种功率损耗与 S 的关系如图4所示。

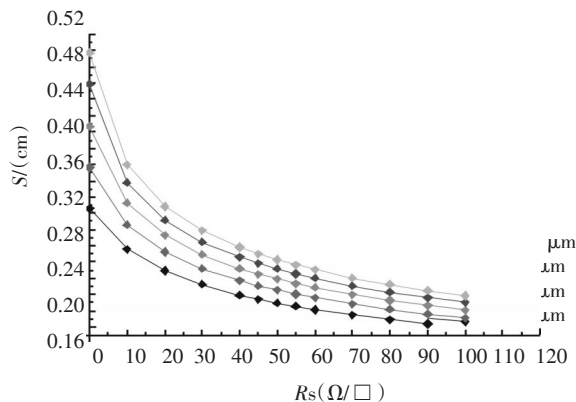


图2 不同的栅线宽度 W_F 下的最佳的栅线间距 S 值与 R_s 的关系

由图2和图3可知,在细栅线宽度一定的情况下,随着扩散薄层电阻减小,最佳细栅线间距增大,此时 P_{sf} 和 P_{tl} 减小, P_{rf} 和 P_{cf} 虽增大,但影响程度较小,由图5可知,电极引起的总的功率损耗 P 也越小。

由图2和图4可知,在扩散薄层电阻一定的情况

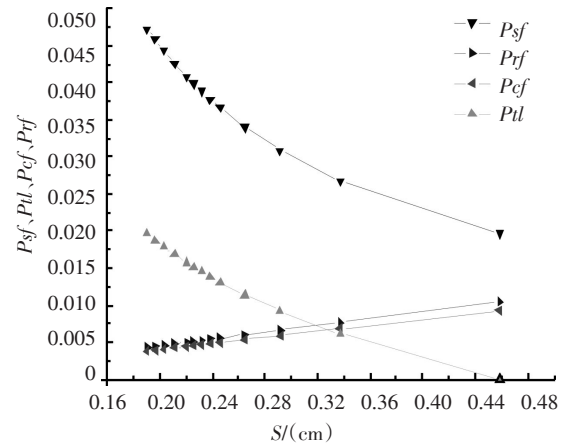


图3 各种功率损耗与 S 的关系($W_F=90 \mu\text{m}$)

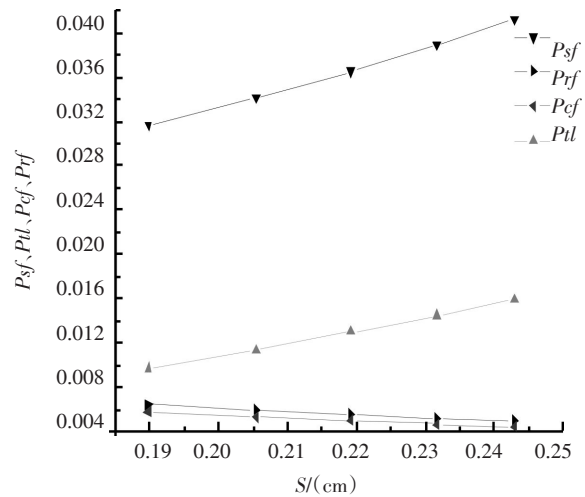


图4 各种功率损耗与 S 的关系($R_s=50 \Omega/\square$)

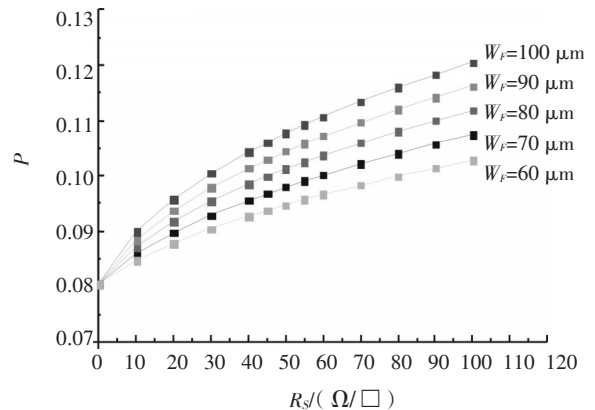


图5 不同的栅线宽度 W_F 下的总功率损耗 P 与 R_s 的关系

下,随着细栅线宽度减小,最佳细栅线间距减小,此时 P_{sf} 和 P_{tl} 减小, P_{rf} 和 P_{cf} 虽增大,但影响程度较小,由图5可知,由电极引起的总的功率损耗 P 也越小。

3 讨论

根据以上数据分析,低的扩散薄层电阻使所需的

最佳细栅线间距增大,主要减少了顶层横向电流总相对功率损耗和细栅线遮光相对功率损耗,从而减少了电极引起的总的功率损耗。但是高的掺杂浓度会使电池片表面容易形成死层,使蓝光响应变差^[6]。而高方阻具有较低的表面杂质浓度,可有效降低表面的杂质复合中心,提高表面少子的存活率,同时增加短波的响应,有效的增加了短路电流和开路电压,达到提高效率的目的。但是与此同时表面薄层电阻明显增加,减少了最佳细栅线间距,增加了电极引起的总的功率损耗,降低了填充因子。要使最终的效率有所提高,就需要开路电压、短路电流的提高大于填充因子的降低^[7]。

工艺上细栅线宽度的减小可以使所需的最佳细栅线间距减小,可以很大程度上减少顶层横向电流总相对功率损耗和细栅线遮光相对功率损耗,从而减少电极引起的总的功率损耗。为了提高方阻的同时,降低由于电极引起的功率损耗,就需要增加细栅线条数、减小细栅线宽度。与此同时选用低体电阻

率的金属材料,并且增加主栅线和细栅线的厚度,可适当的降低主栅线部分总功率损失和细栅线电阻相对功率损耗,从而减少电极引起的总的功率损耗。

因此为了减少由电极设计所引起的功率损失的同时,提高光电转换效率,栅线设计的优化方向选择高阻密栅,尽量把栅线做高做细。

在实际生产中考虑到各方面工艺因素的影响,需将理论分析与实验相结合,最终通过测试结果确定最佳的设计方案。

根据以上理论分析,通过对设备和工艺进行调整,将工艺上可实现的 W_f 值由原有的 $90\ \mu\text{m}$ 降到 $80\ \mu\text{m}$ 。通过计算和实验相结合,不断的调整方块电阻和最佳栅线间距,根据最终的 IV 特性数据对比分析,最后将方块电阻由原有的 $50\ \Omega/\square$ 调整为 $55\ \Omega/\square$,最佳细栅线间距设计为 $0.214\ \text{cm}$ 。改进后的各种功率损失见表 1。经过优化改进的太阳能电池在减少由电极设计引起的总功率损失的前提下光电转化效率提高了 0.1% 。

表 1 原有工艺和改进工艺由电极引起的各功率损失对比

$W_f/\mu\text{m}$	$R_s/(\Omega/\square)$	S/cm	p_{sf}	p_{pf}	p_{ef}	p_{tl}	$p_{rb}+p_{sb}$	p
90	50	0.231 7	0.038 9	0.005 2	0.004 7	0.014 5	0.041 2	0.104 4
80	55	0.213 8	0.037 4	0.005 5	0.004 9	0.013 6	0.041 2	0.102 5

4 结束语

文中对给定的太阳能电池给出了获取最大功率输出的栅线电极设计方法。电极的优化设计是从电极图形与细栅线宽度和扩散薄层电阻的配合来进行的,提出了高阻密栅的设计方向。通过在原有工艺的基础上将理论分析和实际生产实验相结合,减少了由电极设计所引起的功率损失的同时提高了光电转换效率。

参考文献

[1] M A Green. Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications[M]. N J Inc. Englewood Cliffs, 1982.

[2] J L Boone, T P Van Doren. Solar-cell design based on a distributed diode analysis[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 1978, 25(7): 767-771.

[3] 刘翔, 陈庭金. 太阳能电池栅线电极的优化设计[J]. 新能源, 1998, 20(5): 9-13.

[4] Dieter K Schroder, Daniel L Meier. Solar cell contact resistance[J]. IEEE Transactions on Electron Device, 1984, 31(5): 637-647.

[5] 施小忠, 汪乐, 夏冠群. 太阳电池栅线的设计[J]. 电子学报, 1999, 27(11): 126-127.

[6] 赵富鑫, 魏彦章. 太阳电池及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 91-94.

[7] S R Wenham, M A Green, M E Watt, et al. Applied Photovoltaics, ARC Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, 2007.