

文章编号: 1003-501X(2009)12-0127-05

聚光型太阳能电池表面栅电极的优化设计

黄生荣^{1, 2}, 林桂江^{1, 2}, 吴志强², 黄美纯¹

(1. 厦门大学 物理系, 福建 厦门 361005;

2. 厦门三安电子有限公司, 福建 厦门 361009)

摘要: 对聚光型太阳能电池表面栅电极图形进行优化设计。对组成太阳能电池表面栅电极的图形最小单元的各种功率损失进行了详细分析, 得到了最佳栅电极间距的递推公式。优化计算了各种宽度的次栅之间的间距, 并得到了相对应的功率损失比例。电极和半导体接触良好时, 当次栅间距小于最佳值, 电极的遮挡对于功率损失影响最大; 而当次栅间距大于最佳值时, 太阳能电池体材料输运功率损失和次栅电极电流输运功率损失开始成为主要原因。对于高倍聚光型太阳能电池来说, 次栅电极的厚度相对要求厚一些。计算及分析结果可应用于聚光型太阳能电池电极的设计中。

关键词: 聚光太阳能电池; 功率损失; 栅电极; 优化设计

中图分类号: O472^{+.8}

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2009.12.025

Optimization Design of Top Contact Metallization of Concentrator Solar Cells

HUANG Sheng-rong^{1,2}, LIN Gui-jiang^{1,2}, WU Jyh-chiarng², HUANG Mei-chun¹

(1. Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China;

2. Xiamen San'an Electronics Co., Ltd, Xiamen 361009, Fujian Province, China)

Abstract: An optimum grid pattern of the concentrator solar cell top contact metallization was designed. Several power-loss mechanisms of the smallest element were analyzed detailedly. The optimum grid spacing recursion formula was deduced. The optimum grid spacing and the power-loss for the grids of different width were calculated. The shadowing loss was the biggest loss when the grid spacing was narrower than the optimum one if ohmic contact was very well. Otherwise, the current transporting power losses of the grid and solar cell material became the main reason. For the high concentrator solar cell, the thickness of the grid was proposed to be designed more thickly. The results of calculation and analysis can be used in the designing concentrator solar cells.

Key words: concentrator solar cells; power-loss; top contact metallization; optimization design

0 引言

丰富的太阳辐射能是取之不尽、用之不竭的、无污染、廉价、人类能够自由利用的能源, 其中太阳能发电是利用太阳能的热点研究领域^[1-2]。太阳能电池是把光能转换为电能的光电子器件, 目前阻碍太阳能电池大规模民用的主要障碍是单位发电成本太高, 利用聚光型太阳能发电系统是降低单位发电成本的主要途径之一。在高倍聚光条件下太阳能电池的输出功率、电流密度大大增加, 太阳能电池的功率损失也大大增加, 如何优化太阳能电池的结构减少功率损失是聚光太阳能电池领域的研究重点。

聚光型太阳能电池一般背电极完全采用金属层覆盖, 而感光面的栅电极采用指形电极条。图 1 为聚光型

收稿日期: 2009-05-21; 收到修改稿日期: 2009-08-12

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目

作者简介: 黄生荣(1978-), 男(汉族), 江西上高人。工程师, 博士后, 主要从事聚光型多结化合物太阳能电池的研究。

E-mail: hshr2007@yahoo.com.cn.

太阳能电池结构示意图，电池边缘为宽度较宽的主栅电极，中间部分为较细的次栅电极，太阳能电池的电流主要通过次栅电极收集然后运输到主栅电极。理论上说，电极条越宽，电流收集能力越强，串联电阻越小；而电极条的宽度对遮光影响却很大，电极条过宽，因采光受到影响光电转化效率会严重降低，如何将金属电极材料在电池表面进行优化布置，从而既将遮光影响降低又尽量减小串联电阻是一对矛盾^[3]。构形理论的引入可以较好地解决这一问题，太阳能电池表面栅电极构造最优布置可以归纳为构形理论中的“体一点”流通问题^[3-5]。

本文分析了聚光型太阳能电池的功率损失构成，利用构形理论优化太阳能电池表面栅电极图形，比较了不同设计图形下太阳能电池的各种功率损失，设计了不同工艺条件下最佳的栅电极构造。

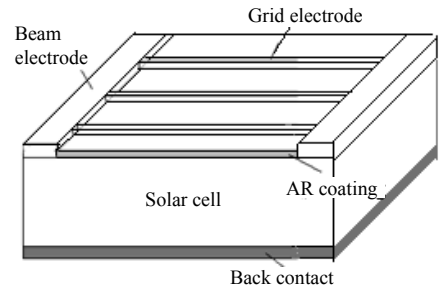


图1 聚光型太阳能电池结构示意图
Fig.1 The scheme of concentrator solar cell

1 理论模型

图2为一般聚光型太阳能电池表面栅电极图形，包括边缘两条宽度较宽的主栅和中间部分多条次栅电极，次栅电极的宽度较小。由于在聚光条件下工作，感光部分主要是主栅内边缘及次栅包围部分，次栅的宽度主要由工艺条件决定，本文主要优化次栅间距的大小。几个假定：电池材料均匀；电极和电池表面接触均匀；电极图形对称；电流只通过次栅电极收集而忽略主栅直接收集的部分。通过优化最小单元的结构然后再进行全平面扩展，从而得到整体最优化图形。图2中箭头所指为表面栅电极最小单元，尺寸如图3所示。

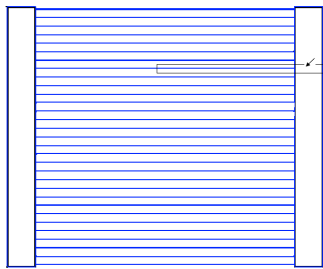


图2 聚光型太阳能电池表面栅电极图形
Fig.2 Grid pattern of concentrator solar cell

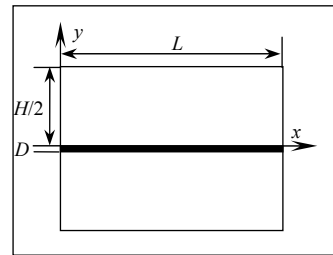


图3 最小单元构造
Fig.3 The smallest element

文献[8]的分析基于最小单元的面积固定，只分析了太阳能电池体材料电流输运功率损失和次栅电极电流输运功率损失，计算优化得到最佳图形构成。在正常工作条件下，太阳能电池的功率损失包括太阳能电池体材料电流输运功率损失、次栅电极电流输运功率损失、次栅电极遮蔽功率损失以及半导体和次栅电极欧姆接触电阻功率损失。

设 W 为体材料厚度， ρ_0 为太阳能电池材料电阻率， H 为次栅电极间隙， D 为次栅电极宽度， $2L$ 为次栅电极长度， m 为次栅电极厚度， ρ_p 为电极金属电阻率，可以得到^[8]：

$$dI + J \, dx \, dy = 0 \tag{1}; \quad \left(\frac{dI}{dy}\right)dy + J \, dx \, dy = 0 \tag{2}$$

其中 J 为太阳能电池电流密度。

根据欧姆定律：
$$dI = \frac{W \, dx}{\rho_0} \left(\frac{dV}{dy}\right) \tag{3}$$

则可得：
$$\frac{d^2V}{dy^2} + \frac{J\rho_0}{W} = 0 \tag{4}$$

式(4)边界条件为 $(dV/dy)_{y=H/2} = 0$ ， $V(x,0) = V_0(x)$ 。

可以得到：
$$V(x,y) = -\frac{J\rho_0 y^2}{2W} + \frac{J\rho_0 Hy}{W} + V_0(x) \tag{5}$$

由式(5)可以得到:

$$dI = \frac{Wdx}{\rho_0} \left(\frac{dV}{dy} \right) = J \left(\frac{H}{2} - y \right) dx$$

体材料电流输运功率损失:

$$\begin{aligned} dP_{01} &= d(I^2 R) = \frac{\rho_0 J^2}{W} \left(\frac{H}{2} - y \right)^2 dx dy \\ \Delta P_{01} &= 2 \iint dP_{01} = 2 \frac{\rho_0 J^2}{4W} \left(\int_0^{H/2} (H-2y)^2 dy \right) \left(\int_0^L dx \right) = \frac{\rho_0 J^2}{12W} H^3 L \end{aligned} \quad (6)$$

式中 ρ_0/W 即为薄层方块电阻。该最小单元功率输出为

$$P_0 = J V_{mp} H L$$

式中 V_{mp} 为太阳电池最大功率输出点电压。则体材料电流输运相对功率损失为

$$\eta_1 = \frac{\Delta P_{01}}{P_0} = \frac{\rho_0 H^2}{12W} \cdot \frac{J}{V_{mp}} \quad (7)$$

次栅电极电流输运功率损失为

$$\Delta P_{02} = \int_0^L J^2 H^2 (L-x)^2 \frac{\rho_p}{Dm} dx = \frac{\rho_p J^2}{3m} \frac{H^2 L^3}{D}$$

则次栅电极电流输运相对功率损失为

$$\eta_2 = \frac{\Delta P_{02}}{P_0} = \frac{\rho_p H L^2}{3mD} \cdot \frac{J}{V_{mp}} \quad (8)$$

次栅电极遮挡形成的相对功率损失为

$$\eta_3 = D/H \quad (9)$$

忽略直接由半导体输运到主栅的电流, 计算半导体和次栅电极欧姆接触功率损失为

$$\Delta P_{04} = J^2 \rho_c H^2 \frac{L}{D}$$

其中 ρ_c 为接触电阻率。则次栅电极欧姆接触相对功率损失为

$$\eta_4 = \frac{\rho_c H}{D} \cdot \frac{J}{V_{mp}} \quad (10)$$

总功率损失为以上四种功率损失之和, 即总相对功率损失为

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 \quad (11)$$

优化次栅电极设计就是要使得总相对功率损失最小, 总相对功率损失由体材料电流输运相对功率损失、次栅电极电流输运相对功率损失、次栅电极遮挡相对功率损失、次栅电极欧姆接触相对功率损失决定。

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 = \frac{\rho_0 H^2}{12W} \cdot \frac{J}{V_{mp}} + \frac{\rho_p H L^2}{3mD} \cdot \frac{J}{V_{mp}} + \frac{D}{H} + \frac{\rho_c H}{D} \cdot \frac{J}{V_{mp}}$$

把总功率相对损失对 H 求导可得:

$$\eta' = 2 \cdot \frac{\rho_0 H}{12W} \cdot \frac{J}{V_{mp}} + \frac{\rho_p L^2}{3mD} \cdot \frac{J}{V_{mp}} - \frac{D}{H^2} + \frac{\rho_c}{D} \cdot \frac{J}{V_{mp}} \quad (12)$$

对于最佳 H 值要求 $\eta' = 0$, 由式(12)解一元三次方程可以得到 H 值, 本文利用牛顿迭代法求解 H 最佳值, 由式(12)可得:

$$\begin{aligned} \eta'' &= 2 \cdot \frac{\rho_0}{12W} \cdot \frac{J}{V_{mp}} + 2 \cdot \frac{D}{H^3} \\ H_2 &= H - \left(2 \cdot \frac{\rho_0 H}{12W} \cdot \frac{J}{V_{mp}} + \frac{\rho_p L^2}{3mD} \cdot \frac{J}{V_{mp}} - \frac{D}{H^2} + \frac{\rho_c}{D} \cdot \frac{J}{V_{mp}} \right) / \left(2 \cdot \frac{\rho_0}{12W} \cdot \frac{J}{V_{mp}} + 2 \cdot \frac{D}{H^3} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

根据式(13)先给定初值 H , 则可以求得更接近最佳值的 H_2 , 通过这种方法不断优化, 很快收敛到一个不变值即为最佳值。

2 计算结果与讨论

本文优化计算目前常用的聚光型多结化合物太阳电池的次栅电极图形。部分参数如表 1。

太阳电池感光部分边长为 1 cm，即次栅电极长度为 $2L=1$ cm，次栅电极厚度为 $6\ \mu\text{m}$ ，次栅电极材料 Au 体电阻率 $2.4\ \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，多结化合物太阳电池体材料方块电阻约 $20\ \Omega/\square$ ；500 倍聚光条件下， $J=6.5\ \text{A}/\text{cm}^2$ ， $V_{\text{mp}}=2.5\ \text{V}$ 。

表 1 不同栅电极宽度 D 和不同接触电阻率 ρ_c 条件下优化的次栅间距 H

Table 1 Optimum grid spacing H for different grid width D and contact resistance rate ρ_c μm

$D/\mu\text{m}$	$\rho_c/(\mu\Omega\cdot\text{cm}^2)$								
	0.1	1	5	10	20	50	100	200	1 000
5	169	169	168	167	165	159	151	137	88
10	309	308	307	305	302	294	281	259	173
15	416	415	414	412	409	400	386	362	253
20	499	499	498	496	493	485	471	447	327

表 1 为不同栅电极宽度 $D(\mu\text{m})$ 和不同接触电阻率 $\rho_c (\mu\Omega\cdot\text{cm}^2)$ 条件下优化的 $H(\mu\text{m})$ 值，以及在此优化条件下的相对功率损失，如表 2 所示。从表 1 表 2 中可以看到，同样的接触电阻率条件下次栅电极宽度越小则优化后的占空比 D/H 越小，总相对功率损失也越小；而同样次栅电极宽度条件下，接触电阻率越低则优化后的占空比 D/H 也越小，总相对功率损失也越小，但在接触电阻率 $\rho_c < 50\ \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 条件下，优化后的占空比 D/H 和相对功率损失变化不大。因此为了得到相对优化的栅电极图形，一般要求制备较细的次栅电极，电极和电池表面的接触电阻率 $\rho_c < 50\ \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。图 4 为 $D=10\ \mu\text{m}$ 和 $\rho_c=10\ \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 时，当次栅间距 H 不同时，总相对功率损失和各种相对功率损失的情况。从图 4 中可以看到，当次栅间距为 $50\ \mu\text{m}$ 时总相对功率损失很大，其中主要的原因是由电极遮挡而造成的相对功率损失很大，其他功率损失较小；而当次栅间距逐渐增加时，总相对功率损失迅速下降，主要原因在于由电极遮挡而造成的相对功率损失急剧下降，而其他功率损失只是缓慢上升；当次栅间距为 $305\ \mu\text{m}$ 时，总相对功率损失最小，约为 6.17%；当次栅间距再增加时，总相对功率损失再缓慢上升，主要是由于太阳能电池体材料运输相对功率损失和次栅电极电流运输相对功率

表 2 优化条件下总相对功率损失 (%)

Table 2 The whole power-loss of optimization (%)

$D/\mu\text{m}$	$\rho_c/(\mu\Omega\cdot\text{cm}^2)$								
	0.1	1	5	10	20	50	100	200	1 000
5	5.786	5.794	5.83	5.87	5.95	6.18	6.55	7.24	11.36
10	6.10	6.11	6.14	6.17	6.25	6.46	6.81	7.46	11.45
15	6.53	6.53	6.56	6.59	6.66	6.85	7.17	7.77	11.6
20	7.01	7.02	7.04	7.07	7.13	7.31	7.59	8.15	11.79

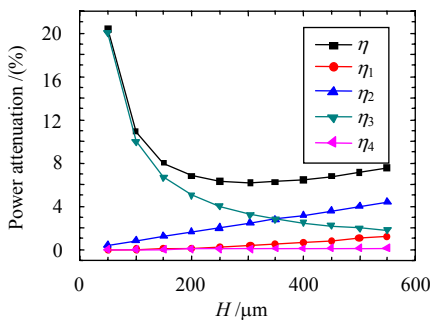


图 4 $D=10\ \mu\text{m}$ 和 $\rho_c=10\ \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 时各种相对功率损失和 H 的关系

Fig.4 Power-loss versus H when $D=10\ \mu\text{m}$ and $\rho_c=10\ \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$

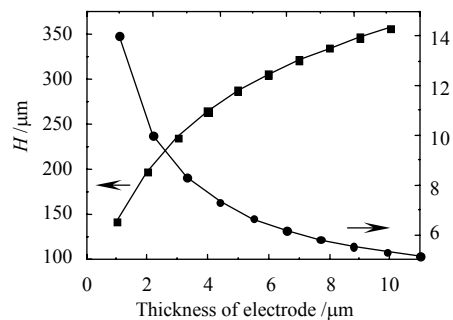


图 5 电极不同厚度时优化的次栅间距及总相对功率损失

Fig.5 Whole power-loss and grid spacing versus thickness of electrode

损失增加; 由于欧姆接触良好, 次栅电极欧姆接触电阻相对功率损失对于总相对功率损失的影响较小。

图 5 为 $D=10\ \mu\text{m}$ 和 $\rho_c=10\ \mu\Omega\cdot\text{cm}^2$ 在不同电极厚度时对次栅间距进行优化的结果, 并得到在各自优化条件下的总相对功率损失。从图 5 中可以看到, 当次栅电极的厚度增加时, 电流的输运能力增加, 因此优化的次栅间距也增加, 优化后的总相对功率损失逐渐减小, 考虑到实际工艺的可行性, 目前一般采用的电极厚度约在 $6\ \mu\text{m}$ 左右。

3 结 论

详细分析了聚光型太阳电池的各种功率损失, 根据构形理论, 对太阳电池表面栅电极的图形进行了优化, 得到了各种次栅电极宽度及不同的接触电阻率时优化的次栅间距和在次优化条件下的总功率损失。在次栅电极宽度固定时, 使得次栅间距在最优化值附近变化, 分析了各种功率损失的影响, 当电极和半导体接触良好时, 次栅电极欧姆接触电阻相对功率损失对于总相对功率损失的影响较小。此时, 当次栅间距小于最佳值时, 电极的遮挡对于功率损失影响最大; 而当次栅间距大于最佳值时, 太阳电池体材料输运相对功率损失和次栅电极电流输运相对功率损失开始成为主要原因。分析了电极厚度对于次栅间距的影响, 对于高倍聚光型太阳电池来说, 次栅电极的厚度相对要求厚一些。本文的计算及分析结果对于聚光型太阳电池电极的设计具有实际的指导作用。

参考文献:

- [1] 李俊峰, 王斯成. 中国光伏发展报告[M]. 北京: 中国环境出版社, 2007.
LI Jun-feng, WANG Si-cheng. **China Solar PV Report** [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [2] 郭志球, 沈辉, 刘正义, 等. 太阳电池研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(3): 41-43.
GUO Zhi-qiu, SHEN Hui, LIU Zheng-yi, *et al.* The Progress of Solar Cell Studying [J]. **Materials Review**, 2006, 20(3): 41-43.
- [3] Aditya Bhakta, Santanu Bandyopadhyay. Constructal Optimization of Top Contact Metallization of a Photovoltaic Solar Cell [J]. **Int.J. of Thermodynamics**(S1301-9724), 2005, 8(4): 175-181.
- [4] Morega A M, Bejan A. A constructal approach to the optimal design of photovoltaic cell [J]. **Int. J. Green Energy** (S1543-5083), 2005, 2(3): 233-242.
- [5] 周圣兵, 陈林根, 孙丰瑞. 光伏电池电极条设计中的构形理论优化[J]. 自然科学进展, 2006, 26(11): 1500-1505.
ZHOU Sheng-bin, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui. Constructal theory Optimization of grid line of Photovoltaic Solar Cell [J]. **Progress in Natural Science**, 2006, 26(11): 1500-1505.