

# 高效黑硅电池组件反光板角度的模拟研究

王坚强<sup>1)2)</sup> 刘邦武<sup>1)†</sup> 夏洋<sup>1)</sup> 徐征<sup>2)</sup>

1)(中国科学院微电子研究所, 中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029)

2)(北京交通大学发光与光信息教育部重点实验室北京交通大学光电子技术研究所, 北京 100044)

(2013年8月26日收到; 2013年10月9日收到修改稿)

传统的光伏组件为了实现发电功率最大化, 安装时具有一定倾角, 但在使用过程中仍有一部分光会被组件表面反射到空中造成浪费. 本文设计了一种带反光板结构的高效黑硅太阳能电池组件, 多角度吸光的黑硅组件配合反光板结构可以充分利用反射光线. 对反光板和黑硅组件夹角进行了模拟计算, 结果表明, 当光伏组件安装倾角为 $34^\circ$ 时, 反光板安装角度为 $16.5^\circ$ 最佳, 同等光照条件下使得电池的发电功率增加了约39%.

**关键词:** 反光板角度模拟, 黑硅, 太阳电池

**PACS:** 88.40.mp, 42.15.-i, 88.05.Gh, 85.40.Ry **DOI:** 10.7498/aps.63.018802

## 1 引言

当前世界能源短缺和环境污染问题日益严重, 人们对环境保护问题的重视程度也在不断的提高, 人们期望改变现有的能源结构, 寻找新的替代能源. 由于极端气候的出现, 降低碳排放量也迫使人们更加努力地寻找和开发新能源. 太阳能资源是最丰富的可再生新能源之一, 是国际上公认的理想替代能源. 太阳能以其独有的无污染、可再生利用等优点成为人们利用的重点. 越来越多的国家开始实行“阳光计划”, 开发利用太阳能资源来替代传统能源.

作为太阳能的主要利用途径, 太阳能电池除具有清洁、能源充足的特点外, 还可以直接设置在需要用电的地方发电. 但是太阳能电池效率低下一直是困扰整个电池行业的难题, 为使太阳能电池能够更加充分地吸收太阳光, 表现出更大的发电功率及更为广泛的应用领域, 整个电池行业付出了多方面的努力. 如通过改善工艺、采用新材料等方式来提高电池内部的光电转换效率; 通过使组件有一定的倾角、实时跟踪太阳光等结构上的改进来增加电池片接受到的光功率从而提高发电功率等<sup>[1]</sup>.

本文旨在设计一种带有反光板结构的高效黑硅太阳能电池组件, 多孔结构的高效黑硅材料能大大减少电池组件表面的反射损耗, 同时, 配合反光板结构能够充分利用反射光线, 从而相对提高了入射光功率<sup>[2]</sup>; 同时, 本文通过对反光板和黑硅组件夹角进行模拟计算, 得出: 当光伏组件安装倾角为 $34^\circ$ 时, 反光板安装角度为 $16.5^\circ$ 最佳, 同等光照条件下使得电池的发电功率增加了约39%.

## 2 工作原理及角度模拟

### 2.1 黑硅太阳能电池

利用等离子体浸没离子注入技术制备的黑硅材料, 呈现多孔结构, 如图1, 在可见光波段黑硅平均反射率可以低至3%<sup>[3]</sup>, 实现多角度吸收, 从而在标准太阳光照射下电池发电功率大大提高, 从而提高了电池组件的发电效率.

### 2.2 反射装置的引入

如图2所示, 组件中加入了反光板结构, 配合多孔结构的高效黑硅电池, 在相同光照条件下能够增加入射到组件表面的光功率, 从而提高电池的发电效率.

† 通讯作者. E-mail: Liubangwu@ime.ac.cn

电功率. 图中  $\theta_1$  表示电池组件的最佳倾角;  $\theta_2$  表示标准太阳的入射光线与垂直线的夹角;  $\theta_3$  表示反光板与地面的夹角.

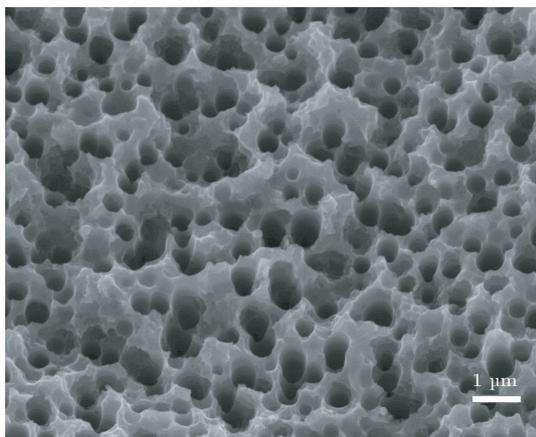


图1 等离子体浸没注入制备黑硅 SEM 图——多孔结构

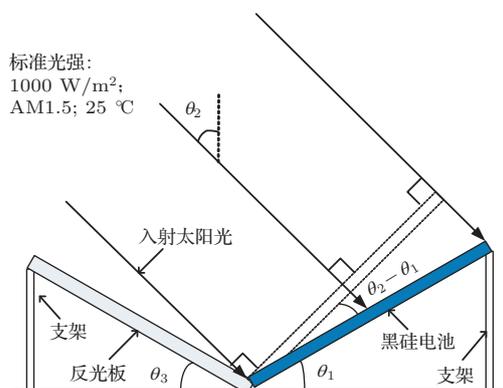


图2 带反光板结构黑硅组件示意图

## 2.3 反光板角度的模拟分析

### 2.3.1 组件最佳倾角的确定

所谓的固定式太阳能板面设置形式, 就是只要安装完成, 太阳能电池板的倾角和方位角就无法改变. 大多数在地面使用的小型独立太阳能发电系统, 都用此种方式作为其板面的固定形式, 如图2所示, 为带有反光板结构的高效黑硅组件的侧视模拟图. 此种方式板面常朝向赤道, 相对地平面有一定倾角. 倾角的不同导致每个月份板面接收太阳能照射量产生巨大的差异, 因此确定板面的最佳倾角是太阳能发电设备设计中十分重要的环节. 根据前人的经验及大量的实践, 在确定最佳倾角时有下面两个要点:

1) 板面的最佳倾角大致等于应用所在地的纬度.

2) 为了达到最好的接受光照的目的, 板面倾角在上一个要点的基础上再增加一定的角度, 以使该倾角能保证接受光照量最弱的月份能得到在相同纬度数值下南半球最大光能接收量.

以嘉兴为例, 该地区所在纬度为北纬  $31^\circ$ , 所以最佳倾角为  $31^\circ + 3^\circ$ , 即最佳倾角为  $34^\circ$ .

### 2.3.2 反光板最佳角度的确定

已知太阳能电池效率的定义为

$$\eta = \frac{P_0^*}{P_0} = \frac{P_0^*}{I_0 S_0}, \quad (1)$$

式中,  $\eta$  为太阳能电池效率,  $P_0^*$  为电池发电功率,  $P_0$  为标准入射光功率,  $I_0$  为标准光强,  $S_0$  为电池有效面积. 其中, 标准光强为  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $PM = 1.5$ , 环境温度为  $25^\circ$ .

因此在不考虑温度等其他因素对电池发电功率影响的情况下, 照射到电池板上的太阳光越多, 即入射光功率越大, 则电池组件发电功率越大.

带有反光板的电池组件, 其入射光功率等于直接照射到电池板上的光线与通过反光板反射到电池表面的光线之和, 即由(1)式可知

$$P_{\text{总}} = P_{\lambda} + P_{\text{反}} = I_0 \times S_{\lambda} + n \times I_0 \times S_{\text{反}}, \quad (2)$$

其中  $P_{\lambda}$ ,  $P_{\text{反}}$  分别为直射和反射到电池表面的光功率,  $I_0$  为标准入射光强,  $S_{\lambda}$ ,  $S_{\text{反}}$  分别为电池板垂直于直射和反射光线的有效面积,  $n$  为反光板的反射系数. 由(1), (2)式可知, 反光板的最佳角度即为反射到电池板上的光功率达到最大时, 此时电池组件发电功率达到最大.

(1) 式中, 电池有效面积为电池实际面积投影在入射太阳光横截面上的面积, 即

$$S_0 = S \times \cos \alpha, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为入射太阳光横截面与电池片的所在面的夹角,  $S$  为电池实际面积, 由 AM1.5 得出图2中  $\theta_2$  为  $48.2^\circ$ , 同时最佳倾角  $\theta_1$  为  $34^\circ$ , 则  $\alpha = 14.2^\circ$ .

则直射到电池上的光功率:

$$P_{\lambda} = I_0 \times S \times \cos 14.2^\circ = 0.97 I_0 S. \quad (4)$$

接下来考虑反射部分的功率  $P_{\text{反}}$ .

假设反光板与水平面的夹角为  $\theta_3$ , 且面积形状与电池板完全相同, 经过几何计算得出标准光强下照射到反光板上的光功率

$$P_{\text{反}1} = I_0 \times S \times \cos(\theta_2 + \theta_3), \quad (5)$$

如图3至图8所示, 对于式中  $\theta_3$  角度过小时光线无法反射到电池板上, 角度过大时太阳光则无

法照射到反光板上, 因此经过计算其角度范围为  $3.9^\circ < \theta_3 < 41.8^\circ$ , 且  $\theta_3$  为  $16.5^\circ$  时正好全部反射到电池板上.

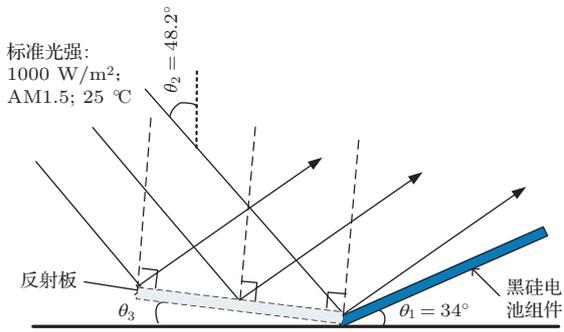


图3 反光板角度  $\theta_3 < 3.9^\circ$  时的光线反射情况

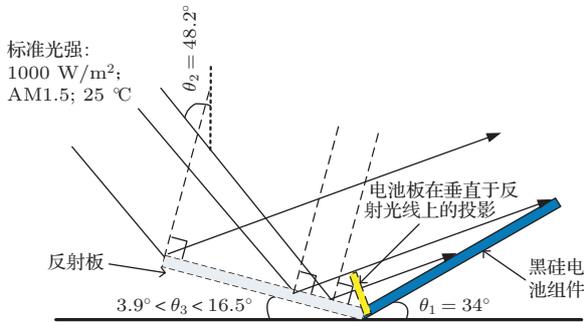


图4 反光板角度为  $3.9^\circ < \theta_3 < 16.5^\circ$

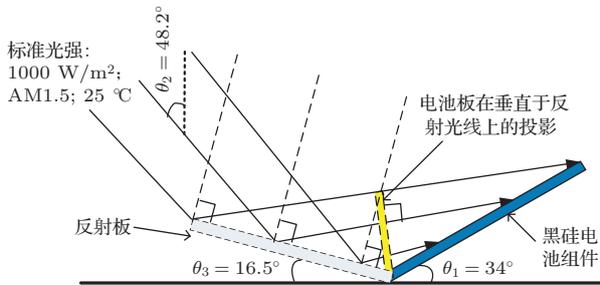


图5 反光板角度为  $\theta_3 = 16.5^\circ$

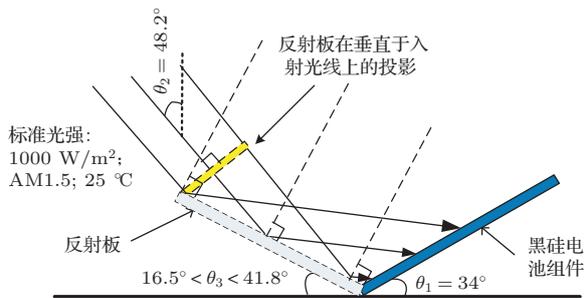


图6 反光板角度  $16.5^\circ < \theta_3 < 41.8^\circ$

图3至图8通过光学模拟展示了当反光板角度从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  逐渐变化时, 反射光线即反射光功率随之变化的过程. 得出: 1) 当反光板角度为  $\theta_3 < 3.9^\circ$  时, 照射到反光板上的太阳光无法反射到电池板上, 反射部分的功率  $P_{\text{反}} = 0$ ; 2) 当反光板角度为  $3.9^\circ < \theta_3 < 16.5^\circ$  时, 照射到反光板上的太阳光有一部分反射到电池板上, 此时反射部分的功率  $P_{\text{反}}$  由电池板在的反射光线的垂直面的投影决定; 3) 当反光板角度为  $\theta_3 = 16.5^\circ$  时, 照射到反光板上的太阳光能够完全反射到电池板上, 此时的太阳光恰好全部反射到电池板上, 反射部分的功率由电池板在反射光线垂直面的投影决定; 4) 当反光板角度为  $16.5^\circ < \theta_3 < 41.8^\circ$  时, 照射到反光板上的太阳光全部反射到电池板上, 并集中于下方区域, 此时反射部分的功率  $P_{\text{反}}$  等于入射到反光板的功率与反射率  $n$  的乘积; 5) 当反光板角度为  $\theta_3 = 41.8^\circ$  时, 太阳光与反光板方向平行, 无法照射到反光板上, 便没有光线反射到电池组件上; 6) 当反光板角度为  $\theta_3 > 41.8^\circ$  时, 太阳光无法照射到反光板上, 同时阻挡了一部分光线到电池板上.

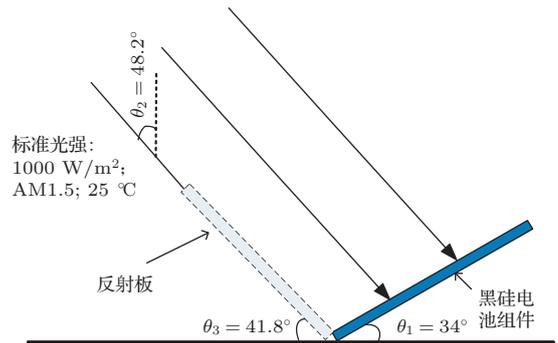


图7 反光板角度  $\theta_3 = 41.8^\circ$

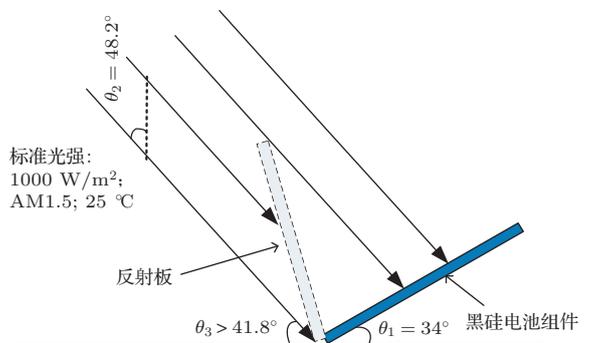


图8 反光板角度  $\theta_3 > 41.8^\circ$

结合以上各图所示, 假设光线经反射后成分与直接照射时相同, 反射率取  $n = 0.9$  (反光板为PU

材质), 由此得到如下式子:

$$P = \begin{cases} 0, & \theta_3 \leq 3.9^\circ, \\ n \times I_0 \times S \times \sin(2\theta_3 - 7.8^\circ), & 3.9^\circ \leq \theta_3 \leq 16.5^\circ, \\ n \times P_{反1}, & 16.5^\circ \leq \theta_3 \leq 41.8^\circ, \\ 0, & 41.8^\circ \leq \theta_3. \end{cases} \quad (6)$$

通过计算得到反射光功率随反光板角度的变化曲线如图 9 所示.

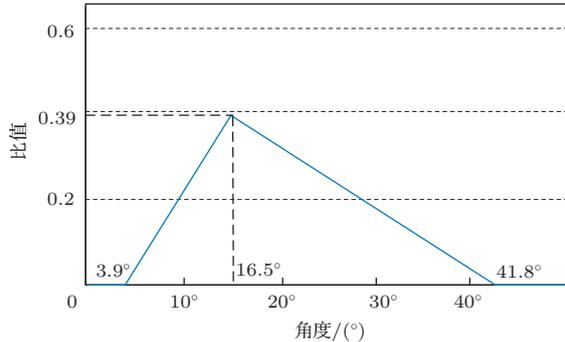


图 9 电池发电功率与不带反光板时发电功率的比值随着反光板角度从 0 到 60° 增加而变化的曲线图

由图 10 可以看出, 当反光板与地面的夹角  $\theta_3$  从  $3.9^\circ$  增加到  $16.5^\circ$  时, 反射到电池上的光功率不断增加, 并在  $16.5^\circ$  时达到最大, 此时

$$P_{反} = 0.387I_0S = 0.39P_{\lambda}. \quad (7)$$

当夹角  $\theta_3$  从  $16.5^\circ$  增加到  $41.8^\circ$  时, 反射到电池上的光功率不断减小, 并在  $41.8^\circ$  时减为 0. 因此, 根据 (2) 式得出

$$P_{总} = P_{反} + P_{\lambda} = 1.39P_{\lambda}. \quad (8)$$

再由 (1) 式可知

$$\begin{aligned} n &= \frac{P_0^*}{P_0} = \frac{P_{\lambda}^*}{P_{\lambda}} = \frac{P_{总}^*}{P_{总}} \\ &\Rightarrow \frac{P_{总}^*}{P_{\lambda}^*} = \frac{P}{P_{\lambda}} = 1.39, \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $P_{总}^*$  和  $P_{\lambda}^*$  分别表示带反光板和不带反光板黑硅太阳能电池组件的发电功率, 可以看出, 经模拟计算得出: 在同等光照条件下, 带有反光板装置的太阳能组件大大提高了电池表面的入射光功率, 同时组件发电功率在原来的基础上提高了大约 39%.

## 2.4 应用——太阳能车棚

近年来随着电动汽车的逐渐普及, 越来越多的电动汽车出现在实际应用中, 但是电动汽车需要经

常充电, 而且车棚内又没有充电电源, 容易造成电动汽车在行驶过程中出现电力不足的现象, 因此开发设计方便实用的太阳能车棚成为一项迫切的需求 [4,5]. 本文将带反光板结构的黑硅组件应用于太阳能车棚, 同等条件下组件能够吸收更多的太阳光, 同时发电量也有很大的提高. 该太阳能车棚无蓄电池储能设备, 晴天阳光充足时最多可供十辆电动车同时充电, 并将多余的电能送入电网; 阴雨天或夜间时, 由电网通过交流配电柜供电给交流负载 [6-8]. 因此, 该车棚的投入使用减少了有机能源的消耗以及污染物的排放, 节能减排的效果十分明显.



图 10 我单位太阳能车棚示范工程实拍图

## 3 结 论

1. 本文提出一种带有反光板结构的高效黑硅太阳能电池组件: 主要由高效黑硅组件、反光板结构构成.

2. 多孔结构的高效黑硅电池能够多角度吸收光线, 结合反光板结构能够大大提高组件发电量; 对组件进行了模拟计算, 得出: 在标准太阳下, 电池组件倾角为  $34^\circ$  时, 反光板的最佳安装角度为  $16.5^\circ$ , 此时组件的发电功率最高, 对应的组件发电量提高约 39%.

3. 安装该组件的太阳能车棚用于停车场、高速公路休息区、红绿灯附近, 可为行人遮阳挡雨、及时充电等, 应用十分广泛.

## 参考文献

- [1] Liu J, Liu B W, Xia Y, Li C B, Liu S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148102 (in Chinese)[刘杰, 刘邦武, 夏洋, 李超波, 刘肃 2012 物理学报 **61** 148102]

- [2] Qin H, Lei C X, Liu H F, Ge S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 255049 (in Chinese)[秦华, 类成新, 刘汉法, 葛硕硕 2013 物理学报 **62** 255049]
- [3] Shen Z N, Liu B W, Xia Y, Liu J, Li C B, Chen B 2011 *Research & Progress of SSE* **31** 387 (in Chinese)[沈泽南, 刘邦武, 夏洋, 刘杰, 李超波, 陈波 2011 固体电子学研究与进展 **31** 387]
- [4] Shao C J, He J, Liu B W, Xia Y, Li C B 2012 *Chinese Journal of Luminescence* **33** 1357 (in Chinese)[邵长金, 何静, 刘邦武, 夏洋, 李超波 2012 发光学报 **33** 1357]
- [5] Huang J G, Yi Z, Meng L F, Zhao H, Liu Y N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 099401 (in Chinese)[黄建国, 易忠, 孟立飞, 赵华, 刘业楠 2013 物理学报 **62** 099401]
- [6] Shen Z N, Liu B W, Xia Y, Liu J, Liu J H, Zhong S H, Li C B 2013 *Scripta Materialia* **68** 199 (in Chinese)[沈泽南, 刘邦武, 夏洋, 刘杰, 刘金虎, 钟思华, 李超波 2013 材料快报 **68** 199]
- [7] Chen W, Shen H 2006 *Battery Bimonthly* **36** 67 (in Chinese)[陈维, 沈辉 2006 电池 **36** 67]
- [8] Huang G H, Shi Y C, Yang H 2004 *Acta Energic Sol Cassini* **25** 785 (in Chinese)[黄国华, 施玉川, 杨宏 2004 太阳能学报 **25** 785]
- [9] Fang J, Chen C S, Wang F, Liu S H 2011 *Chin. Phys. B* **20** 074202
- [10] Xiong C, Yao R H, Geng K W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 057302
- [11] Li H, Li W, Du J J, Wu A M, Qiu C, Sheng Z, Wang X, Zou S C, Gan F W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 117807

## Simulation on reflection plate angles of the efficient black silicon PV modules

Wang Jian-Qiang<sup>1)2)</sup> Liu Bang-Wu<sup>1)†</sup> Xia Yang<sup>1)</sup> Xu Zheng<sup>2)</sup>

1) (*Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Science, Key Laboratory of Microelectronics Devices & Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

2) (*Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Beijing Jiaotong University, Ministry of Education, Institute of Optoelectronics Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

( Received 26 August 2013; revised manuscript received 9 October 2013 )

### Abstract

In order to achieve maximum power output, common PV modules will deliberately make a certain angle, but still some light will be reflected from the surface of the common PV modules into the air and waste. This paper presents a reflective plate structure having efficient black silicon solar modules, and multi-angle light-absorbing black silicon components to construct a reflective plate structure that can take advantage of the reflected light. The angle between the reflectors and black silicon component was simulated in this paper, which shows that when the assembly angle of PV module is  $34^\circ$ , the optimum angle of the reflective plate is  $16.5^\circ$ , in this case, the battery's power generation is increased by about 39% under the same illumination conditions.

**Keywords:** simulation of reflection plate angles, black silicon, solar cells

**PACS:** 88.40.mp, 42.15.-i, 88.05.Gh, 85.40.Ry

**DOI:** 10.7498/aps.63.018802

† Corresponding author. E-mail: [Liubangwu@ime.ac.cn](mailto:Liubangwu@ime.ac.cn)