

密集矩阵式聚光模组二次微棱镜设计与研究

杨光辉^{1,2}, 刘友强¹, 王玉敏³, 郭丽敏¹, 陈丙振¹, 王智勇¹

- (1. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124;
2. 96658 部队 202 分队, 北京 100094;
3. 96618 部队 50 分队, 北京 100085)

摘要: 针对二次聚光器结构复杂、加工工艺难度大、成本高的问题, 结合实际工程应用, 设计了应用于密集矩阵式聚光模组的二次微棱镜, 用 Solidworks 建立了三维模型, 借助 Zemax 光学模拟仿真手段, 对二次微棱镜的倾角和高度等重要参数进行了优化仿真, 结果表明当二次微棱镜高度为 5 mm、上底面边长为 7 mm、工作面倾角为 67.38° 时, 太阳能电池接收的太阳辐射能量最大, 达到最大值 2.466 9 W, 与不带二次微棱镜接收能量 1.876 0 W 相比, 提高了 31%, 该二次微棱镜对提高聚光模组效率作用显著。

关键词: 光学设计; 二次微棱镜; 密集矩阵; 聚光模组

中图分类号: O435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3645-05

Design and research of secondary microprism in dense matrix type concentrating photovoltaic module

Yang Guanghui^{1,2}, Liu Youqiang¹, Wang Yumin³, Guo Limin¹, Chen Bingzhen¹, Wang Zhiyong¹

- (1. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Unit 202, PLA 96658 Troop, Beijing 100094, China; 3. Unit 50, PLA 96618 Troop, Beijing 100085, China)

Abstract: For the problems that secondary concentrators structure is complex, process is difficult, and cost is high, considering the actual engineering application, design of secondary microprism for dense matrix type concentrating photovoltaic module was presented. The 3-D model of this design was established by Solidworks and important parameters such as inclination angle and component height get optimized using Zemax. The results show that the combination has the highest energy when secondary microprisms height is 5 mm, upper side lengths is 7 mm and working face inclination is 67.38°. The energy of solar cell surface can reach 2.466 9 W, increasing by 31% compared with that of without secondary microprisms. It shows that the secondary microprism is very important in dense matrix type concentrating photovoltaic module.

Key words: optical design; secondary microprism; dense matrix; concentrating photovoltaic module

收稿日期: 2015-04-11; 修订日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(61006040); 2009 年教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET - 09-0002)

作者简介: 杨光辉(1976-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事高倍聚光太阳能、大功率半导体激光器方面的研究。

Email: yang3881@sina.com

导师简介: 王智勇(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事高倍聚光太阳能、大功率半导体激光器方面的研究。

Email: zywang@bjut.edu.cn

0 引言

随着聚光技术的进步及产业化应用加快, 据预计, 到 2020 年全球聚光光伏装机量将猛增 750%^[1]。二次聚光器作为聚光模组的关键部件, 对提高太阳能电池接收的太阳辐照强度、改善聚焦光斑均匀性及增大接收角都具有重要作用, 是聚光光伏领域的研究热点。João Mendes-Lopes 等人^[2]提出了一种新型菲涅尔-科勒 (9-fold Fresnel-Köhler) 聚光光学系统, 其中二次聚光器被分成中心对称 9 个区域, 模拟结果显示, 达到了很好的聚焦光斑均匀性。Tian Gu 等人^[7-9]提出了一种新概念分散式非成像微光学聚光器, 应用于太阳能电池直径仅为 0.1 mm 的 MEPV (Microsystems-Enabled Photovoltaics)^[3-6]系统中, 二次聚光器包含多个曲面, 模拟结果显示聚焦光斑均匀性较好, 且实现了较高的聚光倍数和较大的接收角。姜磊^[10]设计了一种组合式聚光器, 包括复合抛物面二次反射镜, 为改善聚焦光斑均匀性不好的问题, 又引进放置于二次反射镜所包围空间内的反向菲涅尔透镜。曾飞等人^[11]设计了一种带有匀光器的全内反射-折射 (Total Internal Reflection-Refracton) 太阳能聚光器, 包括二次透镜和方形介质棒匀光器, 该聚光器达到了较好的聚焦光斑均匀性, 较大的接收角。郭丽敏等人^[12]设计了一种可拆卸式二次反射镜, 并进行了光学模拟仿真, 效果较好。这些二次聚光器虽然实现了较好的性能, 但结构复杂, 加工工艺难度大, 成本高, 难以实现大规模工程应用。文中针对国内首款密集矩阵式聚光模组, 设计了一种结构简单、易加工、成本低、效果好的二次微棱镜作为其二次聚光器。

1 二次聚光器的原理

二次聚光器为正四棱锥的截锥体结构, 大底面在上, 为太阳光入射面, 小底面在下, 为出射面, 面积与太阳能电池相匹配, 位于菲涅尔透镜的焦平面上, 四个侧面为全反射工作面, 倾角为 K , 如图 1 所示。为减小反射能量损失, 设计时考虑主波长的边缘光线在侧壁上发生一次全反射后到达太阳能电池接收面。设空气折射率为 n_1 , 二次聚光器折射率为 n_2 , 由折射定律和几何关系可知:

$$n_1 \sin A_1 = n_2 \sin B_1 \quad (1)$$

$$K = A_2 + B_1 \quad (2)$$

为保证光线在侧壁上能够全反射, 则由全反射定律, 可得:

$$A_2 \geq \arcsin \frac{n_1}{n_2} \quad (3)$$

综合公式(1)~(3)可得:

$$K \geq \arcsin \frac{n_1}{n_2} + \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin A_1 \right) \quad (4)$$

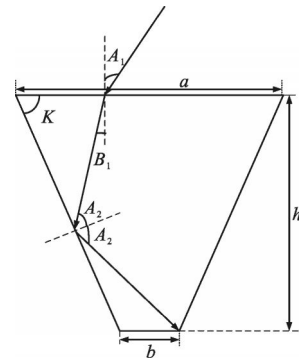


图 1 二次聚光器的聚光光路图

Fig. 1 Optical path of the secondary concentrator

公式(4)确定了二次聚光器倾角和上底面入射角的关系, 以此作为二次聚光器设计的理论依据。经侧面多次反射的情形与之类似。

2 二次微棱镜的设计

2.1 设计原则

文中设计二次微棱镜作为密集矩阵式聚光模组的二次聚光器, 其主要作用是将经过菲涅尔透镜的入射光线进一步聚焦到太阳能电池的上。为减小能量损失, 二次微棱镜出射面大小、形状与太阳能电池接收面一致。光线在二次微棱镜侧壁上要发生全反射, 且反射次数尽可能少。根据图 1 所述基本原理, 结合实际工程应用中的约束条件, 确定二次聚光器的初始参数, 用 Solidworks 建立三维模型, 导入 Zemax 光学模拟软件, 对二次微棱镜的重要参数进行优化仿真, 确定最优解。

2.2 设计实例

二次微棱镜配合的密集矩阵式菲涅尔透镜如图 2 所示, 透镜单元面积为 50mm×50mm, 焦距为 93.5 mm。二次微棱镜的三维模型如图 3 所示, 为一个倒置的正四棱锥的截锥体。上底面边长为 a , 下底面边长为 b , 高为 h , 侧壁工作的倾角为 K 。太阳能电池接收面

面积为 2.5 mm×2.5 mm。

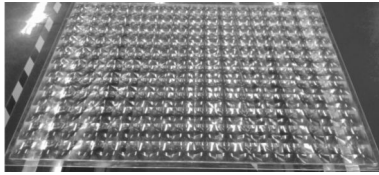


图 2 密集矩阵式菲涅尔透镜
Fig.2 Dense matrix type Fresnel lens

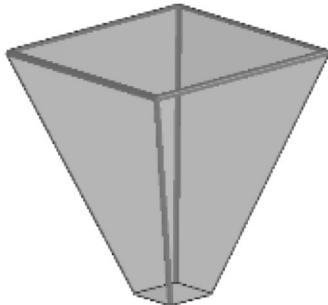


图 3 二次聚光器模型
Fig.3 Secondary microprism model

二次聚光器的材料选 K9,对于设计主波长 560 nm 的折射率 n_2 为 1.52。结合图 1,经菲涅尔透镜聚光后,在二次微棱镜上底面上的入射角 A_1 约为 $\arctan \frac{a}{2(f-h)}$,由公式(4),得到:

$$K \geq \arcsin \frac{1}{n_2} + \arcsin \left(\frac{1}{n_2} \arctan \frac{a}{2(f-h)} \right) \quad (5)$$

由几何关系,得:

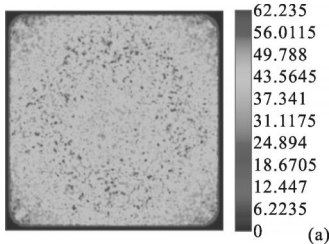
$$K = \text{ctan} \left(\frac{a-b}{2h} \right) \quad (6)$$

表 1 不同上底面边长的二次微棱镜接收的能量

Tab.1 Energy received by secondary microprisms of different upper side lengths

a/mm	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Energy/W	2.261 3	2.429 0	2.461 9	2.466 0	2.466 2	2.467 1	2.466 7	2.466 4	2.465 4

由上可知,二次微棱镜高度为 9 mm,下底面边长为 2.5 mm,上底面边长为 10 mm 时,太阳能电池接收的能量最大,对应的倾角 K 为 67.38° ,此时太阳能电池接收面上的能量分布如图 5 所示。



公式(5)、(6)可确定 K 、 a 、 h 三者的关系,以此作为优化模拟的依据。

3 二次微棱镜的优化模拟

由公式 (5)、(6),并综合考虑工程应用中设备精度、工艺和经济性等因素,确定初始参数 b 为 2.5 mm,二次微棱镜的高度初始值取 $h=9$ mm。将 Solidworks 中建立的三维模型导入 Zemax 中进行优化模拟。设从菲涅尔透镜外入射的太阳光辐照强度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,则每个透镜单元上接收的太阳辐射能量为 2.5 W。

3.1 倾角优化

已知二次微棱镜的下底面边长 $b=2.5$ mm, $h=9$ mm,改变上底面边长 a ,即可改变二次微棱镜的倾角 K 。 a 取 5~13 mm,上底面边长 a 与太阳能电池接收能量对应的曲线如图 4 所示,间隔 1 mm 取一个值,通过 Zemax 进行仿真计算,得到太阳能电池接收到的能量如表 1 所示。

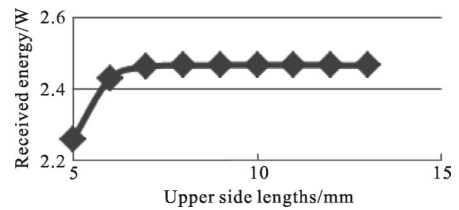


图 4 不同上底面边长二次微棱镜与接收能量的对应关系
Fig.4 Relationship between the received energy and the secondary microprisms of different upper side lengths

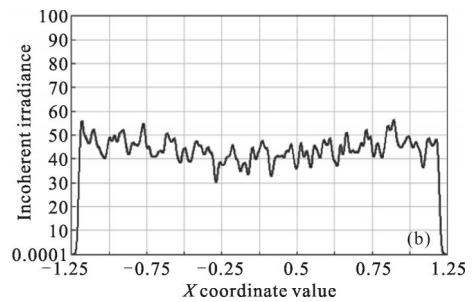


图 5 二次微棱镜倾角最优时电池接收面上的能量分布
Fig.5 Energy distribution of the solar cell surface with the optimal inclination of secondary microprism

3.2 高度优化

由 3.1 节中的结果, 取二次微棱镜下底面边长为 2.5 mm, 上底面边长为 9 mm, 即保持倾角不变, 求解其高度的最优解。二次微棱镜高度与能量对应的曲线如图 6 所示。取高度 h 为 5~15 mm, 间隔 2 mm 或 1 mm 取一个值, 通过 Zemax 进行仿真计算, 得到太阳能电池接收的能量如表 2 所示。

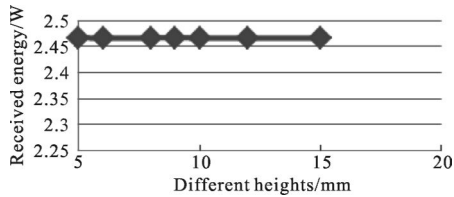


图 6 不同高度二次微棱镜与接收能量的对应关系

Fig.6 Relationship between the received energy and the secondary microprisms of different heights

表 2 不同高度的二次微棱镜接收的能量

Tab.2 Energy received by secondary microprisms of different heights

h/mm	5	6	8	9	10	12	15
Energy/W	2.466 9	2.466 4	2.466 5	2.467 1	2.466 3	2.466 4	2.466 5

由上可知, 二次微棱镜下底面边长为 2.5 mm, 上底面边长为 10 mm, 高度为 9 mm 时, 太阳能电池接收的能量最大。也可以看出, 只要倾角达到最优, 二次微棱镜达到最低高度后, 再改变高度对太阳能电池接收的能量影响较小, 最大值与最小值仅相差 0.03%。可同时考虑聚焦光斑均匀性, 由模拟可知, 当高度为 5 mm 时, 接收面上的能量分布更均匀, 如图 7 所示。

结合 3.1、3.2 可知, 当二次微棱镜下底面边长 b 为 2.5 mm, 上底面边长 a 为 6.7 mm(实际工程应用中可取 7 mm), 高度 h 为 5 mm, 工作面倾角 K 为 67.38° 时, 各项参数达到最优, 太阳能电池接收的能量最大且聚焦光斑均匀性最好, 为 2.466 9 W。大于最小高度后, 二次微棱镜的高度对太阳能电池接收的能量影响不大, 因此在实际工程应用中, 可根据设备精度、工艺和经济性等约束条件, 选择合适的加工高度。若不带二次微棱镜, 同样条件下, 模拟结果显示, 太阳能电池接收的能量为 1.876 0 W, 接收面上能量分布如图 8 所示。

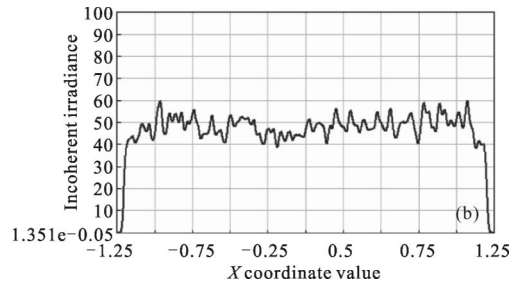
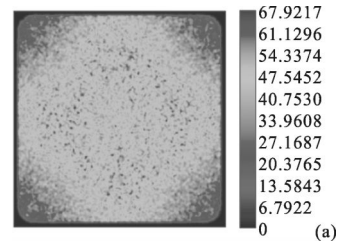


图 7 二次微棱镜高度最优时电池接收面上的能量分布

Fig.7 Energy distribution of the solar cell surface with the optimal height of secondary microprism

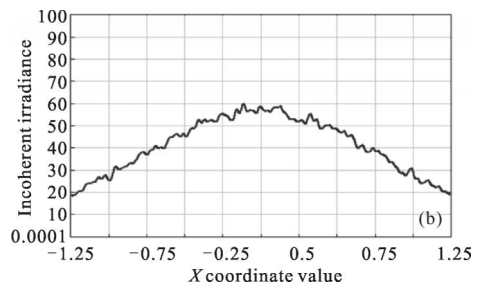
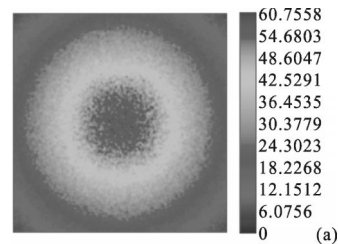


图 8 无二次微棱镜时电池接收面上的能量分布

Fig.8 Energy distribution of the solar cell surface without secondary microprism

4 结论

文中设计了一种应用于国内首款密集矩阵式聚光模组的二次微棱镜, 通过对倾角及高度两个参数进行模拟仿真, 结果表明当二次微棱镜高度为 5 mm, 上底面边长为 7 mm, 工作面倾角为 67.38° 时, 太阳能电池表面上接收的能量最强, 达到 2.466 9 W, 与不带二次微棱镜时电池接收到的能量 1.876 0 W 相比, 提高了 31%, 可见, 此二次微棱镜的使用可有效提高

模组效率。后续将开展相关实验研究,对模拟结果进行验证。

参考文献:

- [1] IHS: Global CPV installed capacity will increase by 750% from 2013 to 2020 [EB/OL]. [2013-12-11] <http://www.china5e.com/news/news-854954-1.html>, 2013.
- [2] João Mendes Lopes, Pablo Benítez, Pablo Zamora, et al. 9-fold Fresnel Köhler concentrator for increased uniform irradiance on high concentrations [C]//SPIE, 2012, 8821: 88210F.
- [3] Nielson G N, Okandan M, Cruz Campa J L, et al. Cell microconcentrator module with moderate concentration, $\pm 4^\circ$ acceptance angle, and 13.3 mm focal length [C]//39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2013: 0465-0469.
- [4] Jose L Cruz Campa, Anna Tauke Pedretti, Jeffrey G Cederberg, et al. Power maximization in III-V sub-millimeter, radial front contacted cells for thin micro-concentrators [C]//40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2014: 0471-0475.
- [5] Anna Tauke Pedretti, Jeffrey G Cederberg, Jose L Cruz Campa, et al. Bonded InGaAs cells for microsystems enabled photovoltaics [C]//40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2014: 0546-0549.
- [6] Paap S M, Gupta V P, Tauke Pedretti A, et al. Cost analysis of flat-plate concentrators employing microscale photovoltaic cells for high energy per unit area applications [C]//40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2014: 2926-2929.
- [7] Jared B, Saavedra M, Anderson B, et al. Micro-concentrators for a microsystems-enabled photovoltaic system [J]. *Opt Express*, 2014, 22: A521-A527.
- [8] Haney M W, Gu T, Agrawal G. Hybrid Micro-scale CPV/PV Architecture [C]//40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2014: 2122-2126.
- [9] Tian Gu, William C Sweatt, Gautam Agrawal, et al. Decentralized nonimaging micro-optical concentrator [C]//SPIE, 2014, 9191: 91910G.
- [10] Jiang Lei. Fresnel lens and compound parabolic concentrators design and research [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)
姜磊. 菲涅尔透镜及复合抛物面聚光器的设计与研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [11] Zeng Fei, Li Hongtao, Hao Zhibiao, et al. High-concentration solar concentrator with uniform irradiation [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(2): 338-342. (in Chinese)
曾飞, 李洪涛, 郝智彪, 等. 具有均匀照度的高倍太阳能聚光器 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(2): 338-342.
- [12] Guo Limin, Wei Ming, Yang Guanghui, et al. Design and research of removable secondary mirror in high concentration photovoltaic technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 422-425. (in Chinese)
郭丽敏, 卫明, 杨光辉, 等. 高倍聚光光伏可拆卸型二次反射镜设计与研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S2): 422-425.