

# Design and Experimental Study of Secondary Concentrator Used in Concentrating Photovoltaic System

Ying Cheng<sup>1</sup>, Ning Zhu<sup>1</sup>, Yongbin Lu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-Line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin

<sup>2</sup>Yipu Optoelectronics (Tianjin) Co. Ltd., Tianjin

Email: chengyingcd@163.com

Received: Jul. 8<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2020; published: Jul. 28<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

An aspheric secondary concentrator is designed to improve the illumination uniformity of the cell surface of the optical funnel secondary concentrator. Based on Kohler illumination principle, the design of freeform secondary concentrator for eccentric Fresnel lens is realized. The machining of aspheric secondary concentrator is realized by ultra precision turning technology. The rationality and correctness of the design are verified by optical experiments.

## Keywords

Concentrating Photovoltaic, Secondary Concentrator, Aspheric Surface, Kohler Lighting

---

# 用于聚光光伏系统二级聚光镜的设计及实验研究

程颖<sup>1</sup>, 朱宁<sup>1</sup>, 卢永斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>天津科技大学, 机械工程学院, 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津

<sup>2</sup>沂普光电(天津)有限公司, 天津

Email: chengyingcd@163.com

收稿日期: 2020年7月8日; 录用日期: 2020年7月21日; 发布日期: 2020年7月28日

---

## 摘要

设计了一种非球面二级聚光镜, 改善了光漏斗式的二级聚光镜的电池表面的光照均匀性。利用Kohler照

明的原理实现了用于偏心式的Fresnel透镜的自由曲面二级聚光镜的设计。并利用超精密车削技术实现了非球面二级聚光镜的加工，通过光学实验验证了设计的合理性和正确性。

## 关键词

聚光光伏，二级聚光镜，非球面，Kohler照明

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

能源问题越来越受到人们的重视，太阳能作为取之不尽的清洁能源备受青睐。光伏发电作为太阳能主要利用形式之一近年来也发展迅速。聚光光伏(CPV)发电可以大幅度降低太阳能电池的用量，是光伏发电的发展趋势[1]。聚光镜是聚光组件的重要组成部分，通过采用廉价的聚光系统将太阳光会聚到面积很小的高性能光伏电池上，从而大幅度地降低系统成本及昂贵的太阳能电池材料用量。

Fresnel 透镜是最常见的聚光镜[2]，但 Fresnel 聚光镜的光斑能量分布不均匀，必须配有二级聚光镜才能使用[3] [4]。目前二级聚光镜普遍采用的是光漏斗，可分为反射式和透射式，反射式光漏斗尺寸大，适用于低倍率的聚光组件；透射式光学棒是目前市场上普遍采用的二级聚光镜，但其匀光能力受其高度和口径限制。如图 1 所示，Fresnel 透镜口径为  $47.5 \text{ mm} \times 47.5 \text{ mm}$ ，接收面的面积  $4 \text{ mm}^2$ ，图中是经过优化后的最好的匀光效果。可看出，由于受到尺寸限制，其匀光能力不是很好。

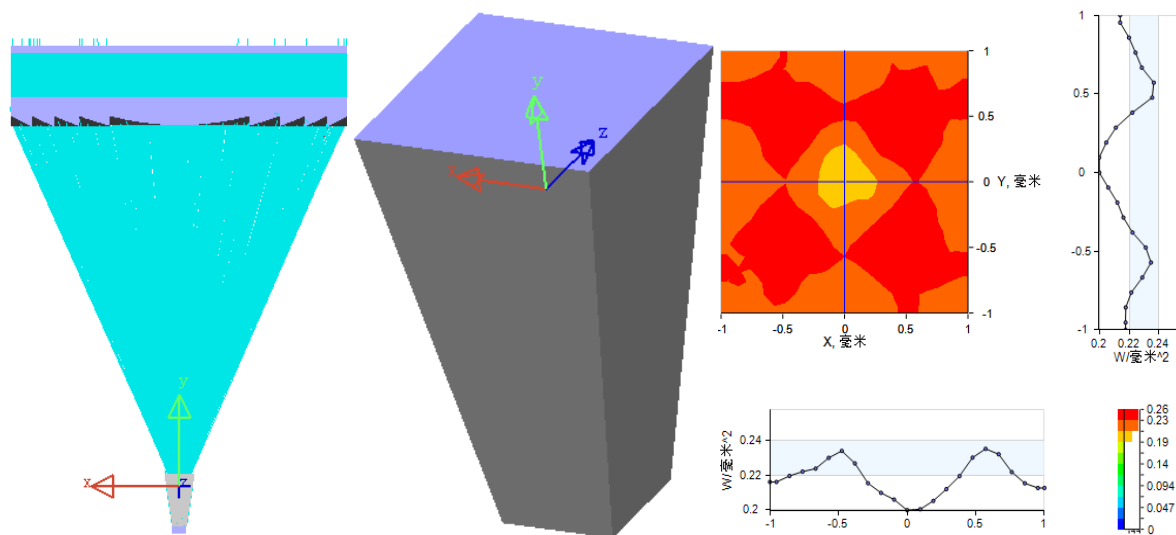


Figure 1. Illuminance distribution on cell of optical funnel secondary concentrator

图 1. 光学棒二级聚光镜匀光效果

本文实现了两种二级聚光镜的设计，提高电池表面能量均匀性。并对其中非球面二级聚光镜进行了超精密加工，通过光学实验验证了方法的可行性。

## 2. 非球面二级聚光镜

### 2.1. 设计方法

一级聚光镜为 Fresnel 透镜，口径为  $47.5\text{ mm} \times 47.5\text{ mm}$ ，焦距  $50\text{ mm}$ 。通过光学软件直接优化法，将二级聚光镜面型设为 20 阶的奇次非球面，面型参数设置为变量，电池表面设置为接收面，接收面上照度分布设置为评价函数，并将其设为均匀分布。优化后的二级聚光镜如图 2(a)所示，其光线追迹结果如图 2(b)所示，二级聚光镜的参数如表 1 所示。

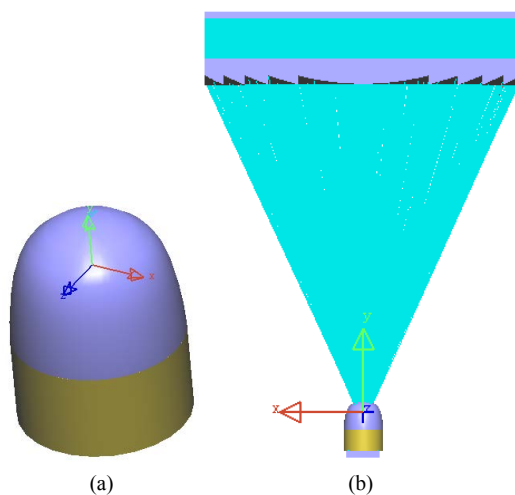


Figure 2. Aspheric secondary concentrator: (a) secondary concentrator model; (b) ray tracing results

图 2. 非球面二级聚光镜，(a)二级聚光镜模型；(b)光线追迹结果

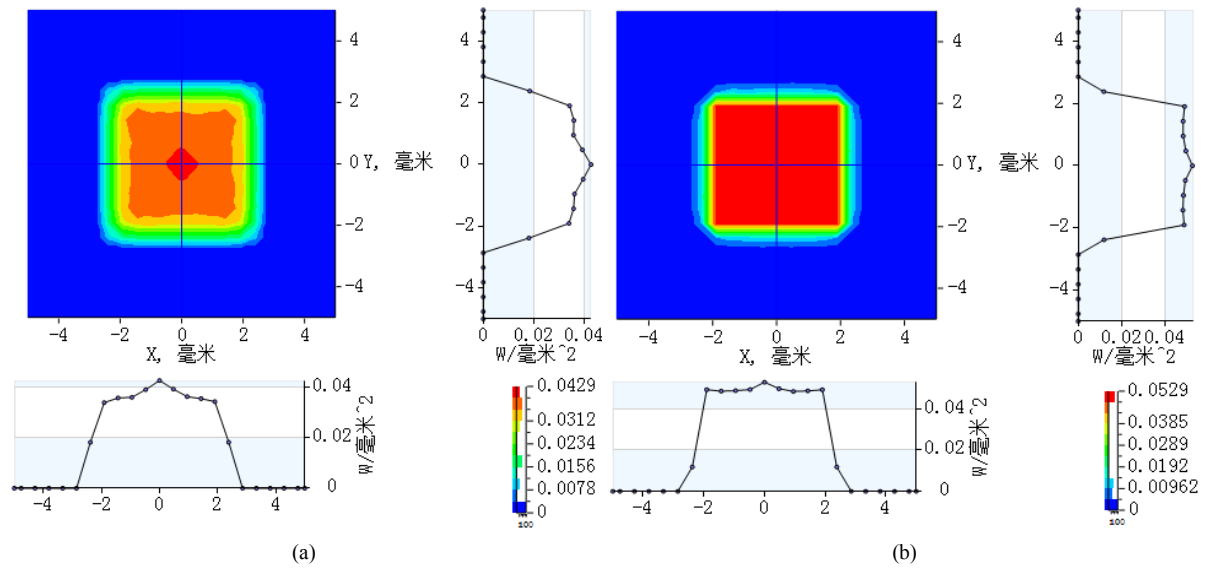
Table 1. Parameters of aspheric secondary concentrator

表 1. 二级聚光镜面型参数

曲面系数	半径	1 阶系数	2 阶系数	3 阶系数	4 阶系数
0.000968	2.999628	-0.000107	0.000725	0.000318	0.000285
<b>5 阶系数</b>	<b>6 阶系数</b>	<b>7 阶系数</b>	<b>8 阶系数</b>	<b>9 阶系数</b>	<b>10 阶系数</b>
6.353127e-005	6.981355e-005	2.057707e-005	2.208466e-005	4.017905e-006	4.304419e-006
<b>11 阶系数</b>	<b>12 阶系数</b>	<b>13 阶系数</b>	<b>14 阶系数</b>	<b>15 阶系数</b>	<b>16 阶系数</b>
8.406211e-007	4.801007e-007	4.800913e-008	8.2445386e-008	2.8005436e-010	1.927519e-010
<b>17 阶系数</b>	<b>18 阶系数</b>	<b>19 阶系数</b>	<b>20 阶系数</b>		
3.329617e-011	2.308651e-011	4.014238e-012	2.799709e-012		

### 2.2. 光学仿真

对上面的模型进行光学仿真，对比二级聚光镜增加前后电池片表面能量分布的均匀性，如图 3 示。可看出均匀性有了大幅度改善，且与积分棒形式的二级聚光镜相比，电池片表面的均匀性也有很大提高。从仿真结果也可看出，Fresnel 透镜在焦点处的中心能量是最强的，若通过接收面在焦点附近的移动也会得到能量相对均匀的光斑，增加二级聚光镜后，可将中心处的强度减少，其他部分的光强增加，使能量均匀分布，所以二级聚光镜是 CPV 聚光模组的必要的结构。



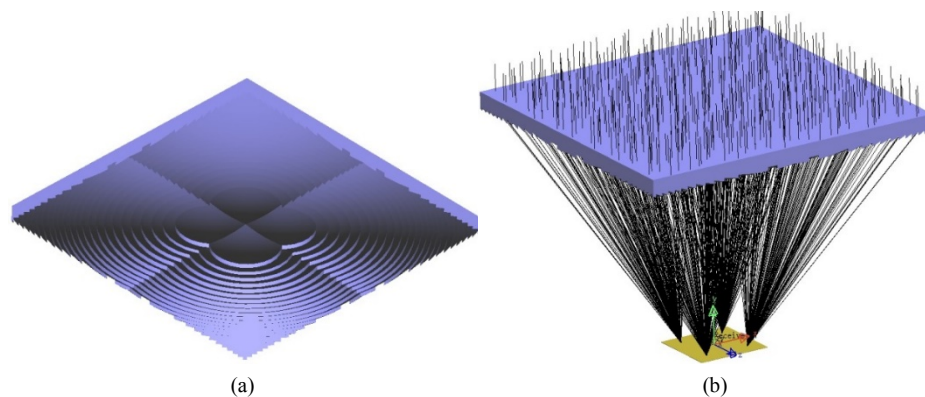
**Figure 3.** Comparison of illuminance of receiving surface before and after adding aspheric secondary concentrator: (a) without secondary concentrator; (b) adding secondary concentrator

**图 3.** 增加非球面二级聚光镜前后接收面照度对比, (a)未增加二级聚光镜接收面照度; (b)增加了二级聚光镜接收面照度

### 3. 自由曲面二级聚光镜

#### 3.1. 设计方法

从非球面二级聚光镜的仿真结果可以看出, 其尽量将峰值尽可能的分配给四周, 但这个峰值仍然存在, 如图 3(b)所示。所以出现了拼接式偏心 Fresnel 透镜和其二级聚光镜的研究[5], 如图 4 所示, (a)为偏心拼接式的 Fresnel 透镜, 将一块方形的 Fresnel 透镜均匀分成四个单元, 将各单元沿着对角线方向移动相同的距离, 所形成的新 Fresnel 透镜的焦点由原来的一个变为四个且关于原点对称, 如(b)所示。针对这种偏心式 Fresnel 透镜所设计二级聚光镜会避免回转式的中心强度过高的问题, 该二级聚光镜的设计的原理为 Kohler 照明的原理[6], 即 Fresnel 透镜将太阳成像在二级聚光镜, 二级聚光镜将 Fresnel 透镜成像在电池片。



**Figure 4.** Eccentric Fresnel lens: (a) Fresnel lens model, (b) ray tracing results

**图 4.** 偏心式的 Fresnel 透镜, (a)偏心式 Fresnel 透镜模型; (b)光线追迹结果

图 5 为其设计原理图, 以偏心式的 Fresnel 透镜的对称轴为 Y 轴, 以电池片的中心为坐标原点建立直

角坐标系。图中  $E_1$  和  $E_2$  是 Fresnel 透镜单元截面的边缘点,  $E_1$  在对称轴上,  $E_0$  为 Fresnel 透镜单元的对称中心, 即沿着  $Y$  方向入射的太阳光会聚焦到  $E_0$  所在直线的焦点  $C$  上。入射光线具有  $\pm\theta$  的容忍角, 以  $+\theta$  角度入射的平行光会聚到  $A$  点, 以  $-\theta$  角度入射的平行光会聚到  $B$  点。经过二级聚光镜对入射光线的调制, 使入射到  $A$ 、 $B$  和  $C$  的光线最终都将入射到电池片的边缘点  $R_1$  和  $R_2$  上, 从而实现对一定入射角太阳光的匀光。

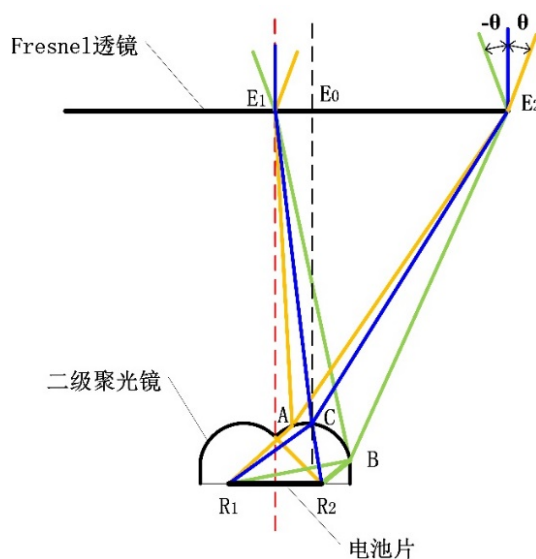


Figure 5. Principle of Kohler secondary concentrator  
图 5. Kohler 二级聚光镜原理

根据 Kohler 原理建立如图 6(a)所示的设计流程, 在透镜对角线所在平面进行计算, 得到(b)所示的二级聚光镜的采样点。所设计的自由曲面二级聚光镜可适用于任意已知参数的 Fresnel 透镜, 此处所采用的 Fresnel 透镜边长为  $47.5 \text{ mm} \times 47.5 \text{ mm}$ , 单元偏移量为  $5 \text{ mm}$ , 由于该 Fresnel 透镜利用构造法[7]求得, 故透镜上各点坐标和法矢量均已知。

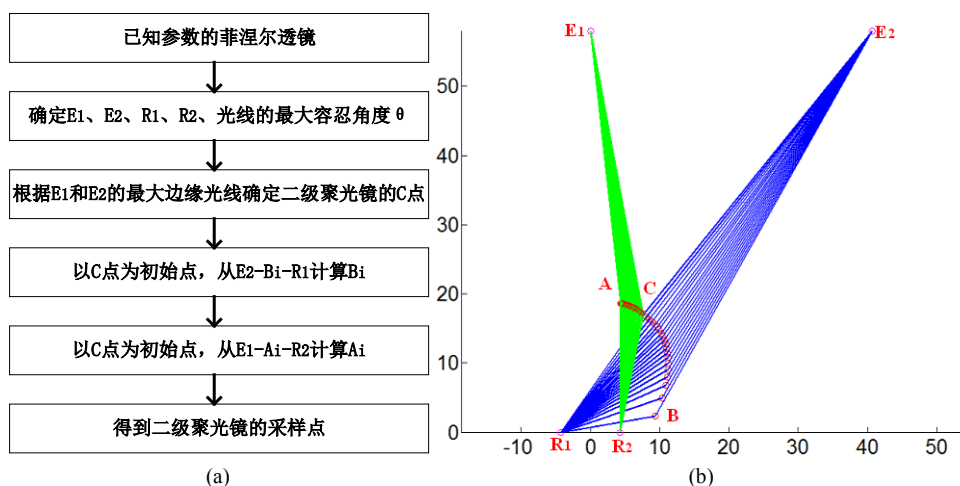


Figure 6. The secondary concentrator design flow chart: (a) calculation flow chart; (b) matlab calculation results

图 6. 二级聚光镜设计流程图, (a) 计算流程图; (b) matlab 计算结果

具体计算过程为：将光线的入射角度 $-\theta\sim+\theta$ 细化  $num$  份，如图 7 所示，红色和绿色光线分别代表入射光线的边缘光线， $E_2$  和  $E_1$  处的棱镜形状分别由①和②表示。根据  $E_1$  和  $E_2$  法向量计算从  $E_1$  和  $E_2$  出发的极限角光线的交点  $C$ ，再以  $C$  点为初始点分别按照光线路线  $E_2\rightarrow B_1\rightarrow R_2$  计算  $B_i(I=1\sim num)$  和光线路线  $E_1\rightarrow A_i\rightarrow R_1$  计算  $A_i(I=1\sim num)$ 。

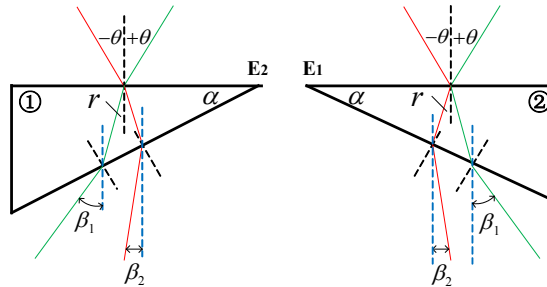


Figure 7. Angle calculation of fresnel lens unit  
图 7. Fresnel 透镜单元的角度计算

在计算中，需要建立光线偏折角度与棱镜工作面角度的对应关系，设入射光线的角度为  $a_i$ ，材料的折射率为  $n$ ， $-\theta\sim 0$  和  $0\sim+\theta$  两种情况下的出射光线与竖直方向的夹角可通过公式(1)和公式(2)分别求出。此处，Fresnel 透镜各点所对应的法向量均已知，可由此推导出  $a_i$ 。

$$\beta_i = \arcsin \left( \sin \left( \alpha + \arcsin \left( \frac{\sin a_i}{n} \right) \right) * n \right) - \alpha \quad (1)$$

$$\beta_i = \arcsin \left( \sin \left( \alpha - \arcsin \left( \frac{\sin a_i}{n} \right) \right) * n \right) - \alpha \quad (2)$$

### 3.2. 光学仿真

将采样点进行拟合和建模，得到仿真模型，如图 8(a)所示，(b)为光线追迹结果，计算采样点的个数为 50 个，接收面为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的正方形， $\theta = \pm 2^\circ$ 。其接收面的照度分布如图 9 所示，从仿真结果上可看出，偏心式的 Fresnel 透镜和 Kohler 二级聚光镜可解决电池片中心处能量峰值的情况。

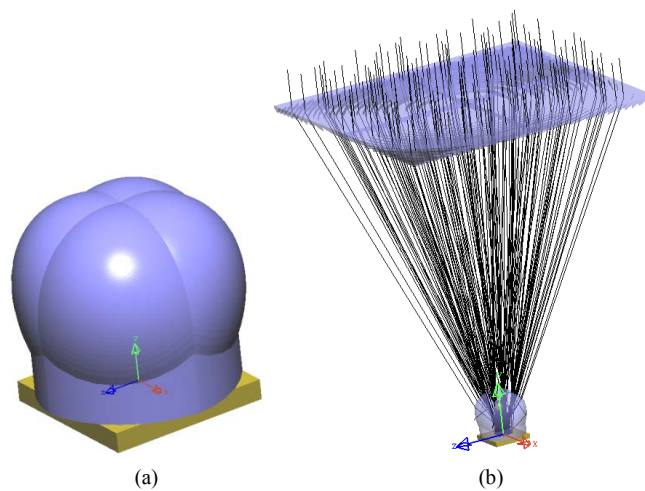


Figure 8. Lens model and simulation: (a) secondary concentrator model;  
(b) ray tracing results  
图 8. 透镜模型及仿学仿真，(a)二级聚光镜模型；(b)光线追迹结果

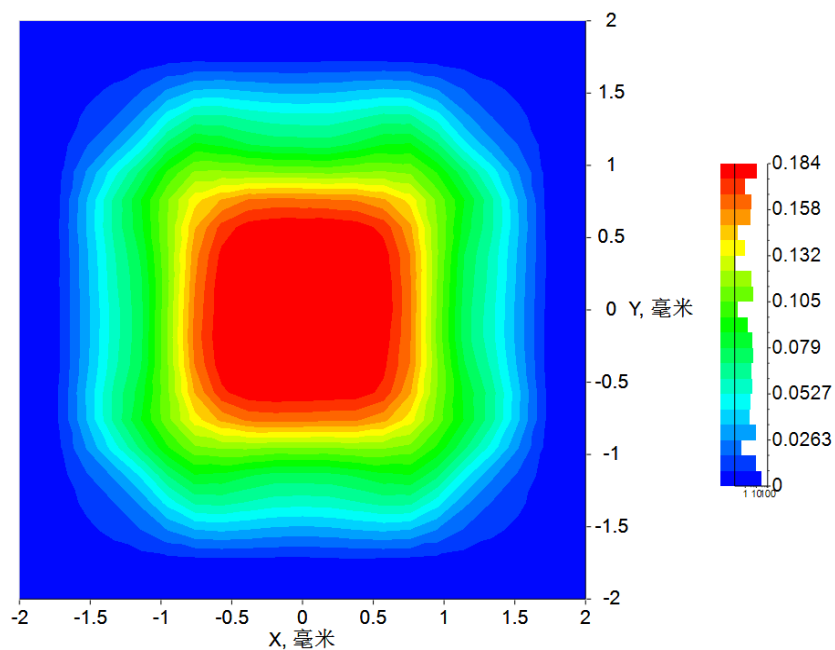


Figure 9. Illuminance distribution on receiving surface

图 9. 接收面照度分布

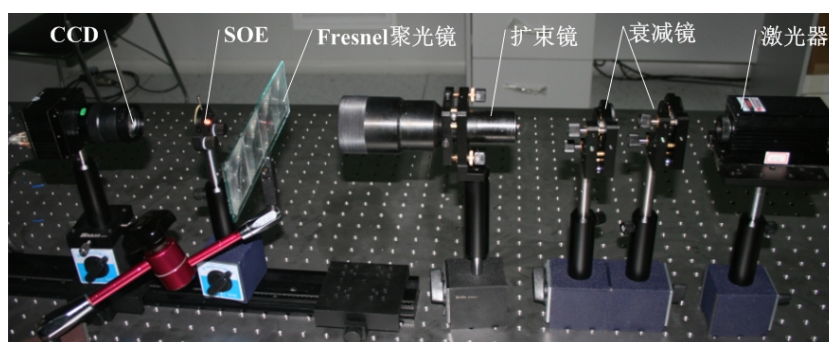


Figure 10. Optical test platform

图 10. 光学测试平台

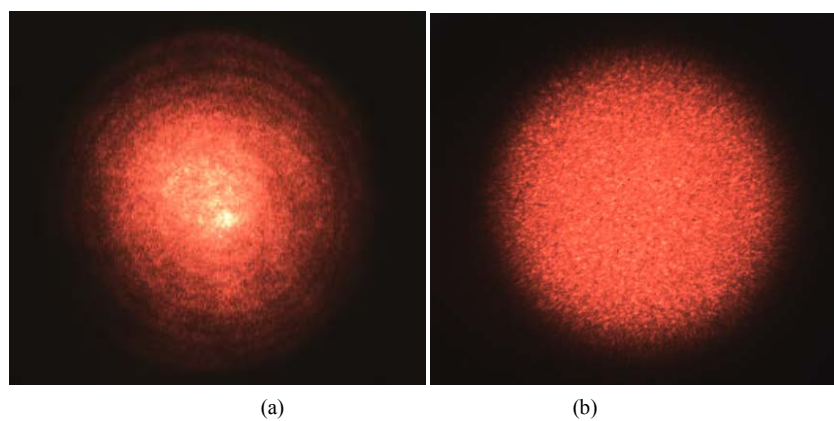


Figure 11. Comparison of illuminance before and after adding secondary concentrator, (a) without secondary concentrator; (b) adding secondary concentrator

图 11. 增加二级聚光镜前后照度对比, (a)未加二级聚光镜; (b)增加了二级聚光镜

## 4. 光学实验验证

光学实验以旋转对称的二级聚光镜为例进行加工和测试,加工材料为 PMMA,按照表 1 的参数加工。搭建的测试光学平台如图 10 所示,激光采用红光(532 nm),经扩束镜扩束后照射到 Fresnel 聚光镜上,通过二级聚光镜折射到 CCD 上。光路中使用两片偏振片进行能量衰减,否则光能量太强在 CCD 上无法分辨。测试结果如图 11 所示,(a)为不加二级聚光镜时 CCD 接收到的光强分布,(b)为增加二级聚光镜时 CCD 接收到的光强分布,从实验结果看出,接收面的光辐射均匀性有很大改善。

## 5. 结论

本文设计并加工了非球面二级聚光镜,经过仿真和光学实验,与传统的光漏斗式二级聚光镜相比,有效提高了电池片表面的光照均匀性;研究了 Kohler 自由曲面二级聚光镜的设计方法,配合偏心式的 Fresnel 一级聚光镜,从理论上证明了该方法可以改善非球面二级聚光镜中心亮度过高的问题。

## 基金项目

天津市教委科研项目(2017KJ019)。

## 参考文献

- [1] 程颖. 光学自由曲面设计方法及应用研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013.
- [2] Anicin, B.A., Babovic, V.M. and Davidovic, D.M. (1989) Fresnel Lenses. *American Journal of Physics*, **57**, 312-316. <https://doi.org/10.1119/1.16071>
- [3] 黄启禄, 许立新. 二次光学元件侧面溢胶对聚光光伏组件光学效率的影响[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 110-114.
- [4] 郭银, 舒碧芬, 汪婧, 杨晴川, 江景祥, 黄研, 周正龙. 高倍聚光光伏模组中不同二次聚光结构性能[J]. 科学与技术工程, 2018, 18(17): 187-191.
- [5] Dross, O., Mohedano, R., Hernández, M., et al. (2008) Köhler Integrators Embedded into Illumination Optics Add Functionality. *Optical Systems Design*. International Society for Optics and Photonics, 71030G-71030G-12. <https://doi.org/10.1117/12.798111>
- [6] Hernández, M., Cvetkovic, A., Benítez, P., et al. (2008) High-Performance Kohler Concentrators with Uniform Irradiance on Solar Cell. *Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems V*, **7059**, Article ID: 705908. <https://doi.org/10.1117/12.794927>
- [7] 程颖, 王泽超, 谢小兵, 卢永斌, 常文爽. 基于 Fresnel 透镜的激光车灯的设计与加工(英文) [J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 336-342.