

复合椭球腔太阳能聚光均匀线光源设计

芦宇 杨逸 张祥祥 孔维敬

Design of solar concentrated uniform linear light source of composite ellipsoid cavity

LU Yu, YANG Yi, ZHANG Xiang-xiang, KONG Wei-jing

引用本文:

芦宇, 杨逸, 张祥祥, 孔维敬. 复合椭球腔太阳能聚光均匀线光源设计[J]. *中国光学*, 2023, 16(1): 144–150. doi: 10.37188/CO.2022–0138

LU Yu, YANG Yi, ZHANG Xiang-xiang, KONG Wei-jing. Design of solar concentrated uniform linear light source of composite ellipsoid cavity[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 144–150. doi: 10.37188/CO.2022-0138

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0138>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于量子点的荧光型太阳能聚光器

Quantum dots based luminescent solar concentrator

中国光学 (中英文). 2017, 10(5): 555 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0555>

复合Ag/SiO₂正弦光栅基底SERS特性分析

SERS characteristics analysis of composite Ag/SiO₂ sinusoidal grating

中国光学 (中英文). 2019, 12(1): 59 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0059>

印刷钙钛矿太阳能电池研究进展

Research progress of printed perovskite solar cells

中国光学 (中英文). 2019, 12(5): 1015 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1015>

蒸汽辅助溶液过程制备钙钛矿材料及钙钛矿太阳能电池

Preparation of perovskite materials and perovskite solar cells by vapor-assisted solution process

中国光学 (中英文). 2017, 10(5): 568 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0568>

复合式无遮拦激光扩束器的设计

Design of a composite laser beam expander without obscuration

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 582 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0582>

基于喷涂法制备氧化锡薄膜的钙钛矿太阳能电池

Perovskite solar cells based on a spray-coating tin oxide film

中国光学 (中英文). 2019, 12(5): 1040 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1040>

文章编号 2097-1842(2023)01-0144-07

复合椭球腔太阳能聚光均匀线光源设计

芦宇*, 杨逸*, 张祥祥, 孔维敬
(天津职业技术师范大学, 天津 300350)

摘要: 为了实现太阳光直接泵浦板条高功率激光器, 对均匀线形高功率密度泵浦源进行研究。本文提出由一级聚光系统与7个共焦点椭球叠加形成二级聚光系统(复合椭球腔), 组合实现高功率密度均匀线光源的设计方法。每个椭球可对圆形第一焦斑进行等辐射通量分割, 镜像成像特点使得峰值功率密度未明显下降, 分解后镜像光斑在第二焦点处形成均匀线光源。通过坐标变化给出等辐射通量数学模型, 利用退火算法求解出每个椭球旋转平移参量。由半径为30 mm, 焦距为70 mm菲涅尔透镜和 $a=3.4$ mm, $c=3.15$ mm单椭球腔组成一级系统, 附带二级复合椭球腔聚光系统, 可实现有效长度为12 mm, 峰值功率密度为 1.09×10^6 W/m², 均匀度为95.46%线光源。对比每个椭球参量对均匀度贡献, 中间椭球旋转参量 θ 为1.4°, 均匀度改善明显, 边缘椭球参量 Δ 改变对线光源有效长度影响显著, 其最佳值为0.53 mm。

关键词: 太阳能聚光器; 复合椭球腔; 菲涅尔透镜; 模拟退火算法

中图分类号: TN242; TN245

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0138

Design of solar concentrated uniform linear light source of composite ellipsoid cavity

LU Yu*, YANG Yi*, ZHANG Xiang-xiang, KONG Wei-jing

(Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300350, China)

* Corresponding author, E-mail: 2013040009@tute.edu.cn; 1529689031@qq.com

Abstract: In order to implement a solar direct pumping slab high power laser, a linear uniform high-power density pump source is studied. In this paper, we propose a design method of a high-power density uniform linear light source by combining the first-order concentrating system with seven confocal ellipsoids to form a composite ellipsoid cavity. The equal radiation flux segmentation of the circular first focal spot is realized by each ellipsoid. The mirror imaging characteristics do not significantly decrease the peak power density. After decomposition, the mirror spot forms a uniform linear light source at the second point of focus. The mathematical model of equal radiation flux is given by coordinate transform, and the rotation and translation parameters of each ellipsoid are solved by the annealing algorithm. The first-order system is composed of a Fresnel lens with a radius of 30 mm, a focal length of 70 mm and a single ellipsoidal cavity with a of 3.4 mm, c

收稿日期: 2022-06-21; 修订日期: 2022-07-13

基金项目: 装备预研重点实验室基金(No. 2021JCJQLB055005), 天津市科技计划项目(No. 20YDTPJC02010), 国家级大学生创新创业训练项目(No. 202110066018)

Pre-Research Key Laboratory Foundation of the General Armament Department (No. 2021JCJQLB055005), Natural Science Foundation of Tianjin City (No. 20YDTPJC02010), National College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (No. 202110066018)

of 3.15 mm, The second-order composite ellipsoidal cavity concentrating system is attached. The line source is realized with effective length of 12 mm, the peak power density of $1.09 \times 10^6 \text{ W/m}^2$, and the uniformity of 95.46 %. Compared with the contribution of each ellipsoid parameter to the uniformity, the uniformity effect is significantly improved when the rotation parameter θ of the middle ellipsoid is 1.4° . The change of the edge ellipsoid parameter Δ has a significant influence on the effective length of the linear light source, and its optimal value is 0.53 mm.

Key words: solar concentrator; composite ellipsoid cavity; Fresnel lens; simulated annealing algorithm

1 引言

传统化石能源不可再生且有污染性, 而太阳能是替代传统化石能源的最佳选择。太阳能转换为动力能源可通过 3 种方式实现: 第一、直接作用太阳能多结电池组进行聚焦光伏(CPV)发电技术^[1-4]; 第二、聚焦太阳光进行光热发电^[5-7]; 第三、聚焦高功率密度太阳光均匀泵浦棒状固体激光介质^[8-10], 用激光将海水中的 MgO 分解生成 Mg, 并与水作用产生氢气能源^[11-13]。常规太阳能聚光器的设计工艺中, 采用二级聚光系统复合抛物面聚光器(CPC)获得高功率密度非均匀光斑, 与光电材料耦合, 导致光电损耗增加, 发电效率下降^[14-16], 因此可以通过高功率密度均匀线光源来提高光电转换效率^[17-18]。结构简单拱形柱面菲涅尔透镜可实现一维线聚焦, 可用于聚光型太阳电池阵^[19], 但其功率密度较低, 无法达到 Nd:YAG 激光介质泵浦阈值。太阳能二级聚光系统, 将高能量密度圆形光斑直接泵浦棒状激光器, 但受到激光介质尺寸及散热机理的制约, 很难实现太阳能直接泵浦千瓦级别的功率输出。借鉴大功率半导体激光阵列巴条侧面均匀泵浦板条激光器设计方案^[20-22], 将高能量密度圆形光斑整形为均匀线性光斑, 有可能实现太阳能直接泵浦千瓦级激光功率输出, 为扩展太阳能直接泵浦激光器应用奠定基础。

本文利用菲涅尔透镜与椭球腔组成一级聚光系统, 复合椭球腔为二级聚光系统实现高功率密度圆形光源到高功率密度均匀线光源的转化。采用半径为 30 mm, 焦距为 70 mm 的菲涅尔透镜, 其聚焦光斑半高宽为 0.8 mm, 功率密度为 $7.22 \times 10^5 \text{ W/m}^2$, 通过长半轴为 3.4 mm, 半焦距为 3.15 mm 的椭球腔再次聚焦形成有效半高宽(FWHM)为 0.6 mm, 功率密度为 $4.43 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ 的光斑。此光斑通过二级复合椭球腔离散为相同光通量并叠

加成均匀线光源。利用模拟退火算法求解每个椭球参量, 一次计算均匀度小于 80%, 并分析每个椭球腔参量(α, θ, Δ)变化对线光源均匀度的影响。该聚光器设计方法可实现高功率密度均匀线光源。该方法将为大功率板条激光器技术开发奠定基础。

2 均匀线光源聚光系统模型

太阳能聚光器聚光系统是以菲涅尔透镜将太阳光聚焦于共焦点椭球腔的第一焦点位置, 根据椭球全反射性质, 在共焦点复合椭球腔第二焦点位置获取高度均匀的线光源, 依靠坐标系变换, 对共焦点复合椭球腔内各个椭球进行光通量计算, 使用模拟退火算法获取共焦点复合椭球腔的相关参数。

2.1 一级聚光系统设计

一级聚光系统采用菲涅尔透镜与单椭球腔结合, 在焦点位置压缩光斑尺寸、增大发散角, 其结构图如图 1 所示。

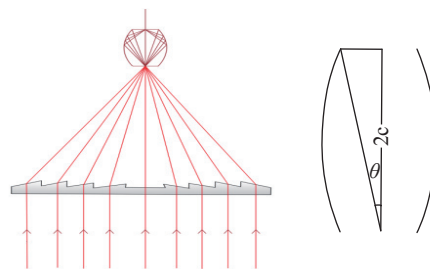


图 1 一级聚光系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the primary concentrator system

发散角与单椭球参量关系如式(1)所示:

$$a = c \left(\tan \theta + \frac{1}{\cos \theta} \right), \quad (1)$$

其中 a 和 c 分别为一级聚光系统椭球腔长半轴长和半焦距, θ 为光源最大发散半角。

2.2 二级复合椭球腔设计

二级复合椭球腔由共用一级聚焦光斑为第一焦点的多个椭球旋转平移后叠加而成,不同椭球反射后在第二焦点处形成一条直线,控制每个反射聚焦的位置,使辐射通量相等的聚焦光斑相叠加,从而将第一级聚焦圆形光源能量整形为均匀分布线光源,对于每个椭球旋转平移设计原理已在文献 [22] 中报道过。本文假设每个椭球面反射光通量为常量建立数学模型,并采用模拟退火算法求解复合椭球腔参数。

2.2.1 共焦点复合椭球腔模型

在直角坐标系 xyz 中,以第一焦点为中心,固定半焦距为 80,由不同长半轴 $a_i = a_0 - \Delta_i$ 组成多个旋转椭球叠加,其中 Δ_i 为椭球长半轴变化量, α_i 为第 i 个椭球绕 y 轴旋转的角度, θ_i 为绕 x 轴旋转的角度, $i=1,2,3$, 代表椭球球号, L 表示左侧椭球, R 表示右侧椭球。以 M 、 L_1 、 R_1 3 个椭球组成的复合椭球为例,3 个椭球的第二焦点分别为 C_M 、 C_{L_1} 、 C_{R_1} , 它们形成水平高度为 h 的线光源,如图 2 所示。

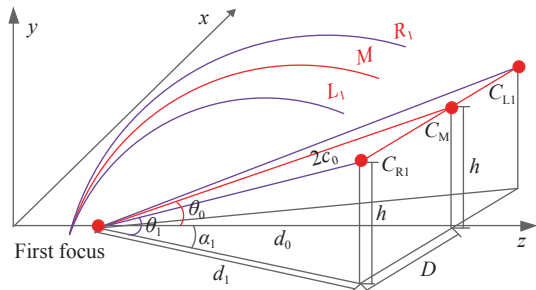


图 2 三复合椭球形成的线光源示意图

Fig. 2 Schematic diagram of linear light source through three composite ellipsoids

已知 M 椭球第一焦点坐标为 $(0,0,a_0 - c_0)$, 长轴为 a_0 , 旋转角度为 θ_0 , 第二焦点间距为 D , 根据几何关系式(2)、式(3)可求出椭球 L_1 的参量 α_1, θ_1 ,

$$\Phi = \iint_{D_{xoz}} \frac{I(x,y,z) \cdot \left[\frac{x \cdot X}{b \sqrt{1 - \frac{X^2}{b^2} - \frac{Z^2}{a^2}}} + b \sqrt{1 - \frac{X^2}{b^2} - \frac{Z^2}{a^2}} + \frac{bZ \cdot (z - c)}{a^2 \sqrt{1 - \frac{X^2}{b^2} - \frac{Z^2}{a^2}}} \right] dXdZ}{\sqrt{(x^2 + y^2 + (z - a_0 + c_0)^2) \cdot \left(X^2 + b^2 \left(1 - \frac{X^2}{b^2} - \frac{Z^2}{a^2} \right) + (Z + c)^2 \right)}} \quad (6)$$

2.2.3 均匀度模型建立及求解算法

复合椭球二次聚焦多焦点叠加可获得均匀分布线光源,可通过每个椭球等间距下第二焦点

接着,可由对称性得出椭球 R_1 的参量 α_1, θ_1 。椭球长轴变化量 Δ_1, Δ_{-1} 可在等辐射通量下通过优化均匀度得到。

$$\tan \theta_1 = \tan \theta_0 \cos \alpha_1 \quad , \quad (2)$$

$$D^2 = d_1^2 + d_0^2 - 2d_1 d_0 \cos \alpha_1 \quad , \quad (3)$$

其中 $d_0 = \frac{h}{\tan \theta_0} = \frac{2c_0 \sin \theta_0}{\tan \theta_0}$, $d_1 = \frac{h}{\tan \theta_1} = \frac{2c_0 \sin \theta_0}{\tan \theta_1}$ 。

2.2.2 非轴对称光通量分布模型

第一焦点位置光源的配光曲线拟合为 $I(\beta) = \exp\left(-\left(\frac{\beta - B}{C}\right)^2\right)$, 其中 A, B, C 为拟合常数, β 为光源位置垂直向上的单位矢量 $\mathbf{M} = (0, 1, 0)$ 与任意光线传播方向上矢量 $\mathbf{r} = (x, y, z - a_0 + c_0)$ 夹角, 即 $\beta = \arccos\left(\frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{|\mathbf{M}| |\mathbf{r}|}\right)$ 。在 xyz 坐标系下椭球反射辐射通量可以表示为:

$$\Phi = \iint_{\Sigma_{xyz}} \frac{\mathbf{I} \cdot d\mathbf{S}}{|\mathbf{r}|^2} = \iint_{\Sigma_{xyz}} \frac{\mathbf{I}(x,y,z) \mathbf{N} \cdot d\mathbf{S}}{|\mathbf{r}|^2} \quad , \quad (4)$$

其中 $\mathbf{N} = \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}$ 为单位光线单位矢量, Σ_{xyz} 为椭球 $f_1^2(x,y,z,\alpha,\theta,\Delta) + f_2^2(x,y,z,\alpha,\theta,\Delta) + f_3^2(x,y,z,\alpha,\theta,\Delta) = 1$ 反射部分围成区域, 其中 a, b, c 分别代表共焦点椭球长轴、短轴、半焦距。利用坐标变换分别定义 $X = f_1(x,y,z,\alpha,\theta,\Delta)$, $Y = f_2(x,y,z,\alpha,\theta,\Delta)$, $Z = f_3(x,y,z,\alpha,\theta,\Delta)$, XYZ 坐标系反射辐射通量如公式(5)所示

$$\Phi = \iint_{\Sigma_{XYZ}} \frac{\mathbf{I} \cdot d\mathbf{S}}{|\mathbf{R}|^2} = \iint_{\Sigma_{XYZ}} \frac{\mathbf{I}(x,y,z) \mathbf{N} \cdot d\mathbf{S}}{|\mathbf{R}|^2} \quad , \quad (5)$$

其中矢量 $\mathbf{R} = (X, Y, Z + c)$ 为矢量 \mathbf{r} 在 XYZ 坐标系转换变量, $|\mathbf{R}|$ 为椭球表面任意面元到第一焦点的距离, 将曲面积分方程转化为在 XOZ 平面上的二重积分可得:

光斑光通量值在某一均值范围内的小幅波动 $\Phi_i \approx \bar{\Phi}$ 实现, 定义变异系数 U 为线光源均匀度评价标准如公式(7)所示。当 $U \rightarrow 0$ 时达到均匀线

光源效果, 并且通过模拟退火算法可获得每个椭球长轴变化量 Δ_i , 由此可计算均匀度 $E=1-U$ 。

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N (\Phi_i - \bar{\Phi})^2}}{\frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N \Phi_i} \quad (7)$$

设定中心椭球参量 θ_0, α_0, c_0 , 第二焦斑间距 D , 每个旋转椭球增量的边界条件为 $0.25(i-1) < \Delta_i < 0.25i$ 。生成随机 $\Delta_i^{(k)}$, 令 $\Delta_i^{(k)} = \Delta_i^{(k+1)}$, k 表示循环次数, i 表示椭球位置。根据已设定参量, 由式 (2)、式 (3)、式 (6)、式 (7) 得到 $\Delta U^{(k)} = U^{(k+1)} - U^{(k)}$ 。 $\Delta U > 0$ 时, 接受此时 $\Delta_i^{(k)}$, 否则产生随机数 $r(0 < r < 1)$, $P_i = |\Delta U^{(k)}| / 100 \times 0.95^{T_i}$, 若 P_i 大于随机数 r 则接受 $\Delta_i^{(k)}$, 否则重新产生随机解 $\Delta_i^{(k+1)}$ 。设置初始温度 T_0 , 在 T_i 温度下循环次数达到上限时进行降温 $T_{t+1} = \eta T_t$ ($t = 0, 1, 2 \dots J$), 其中 η 为温度下降速率系数, 当 $U \leq 0.2$ 时结束运算。

3 复合椭球面太阳能聚光器模型建立及仿真结果分析

3.1 一级聚光系统聚焦光斑仿真分析

在 Tracepro 中建立太阳光源模型, 经半径 $R=30$ mm, 焦距 $f=70$ mm 圆形菲涅尔透镜聚焦后光斑发散角为 50° , 其配光曲线如图 3 所示。一级聚光系统聚焦椭球腔参数 $a=3.4$ mm, $c=3.15$ mm 时, 在第二焦点位置获得 110° 发散角, 其配光曲线 I 随发散角 β 的变化如图 3 所示。

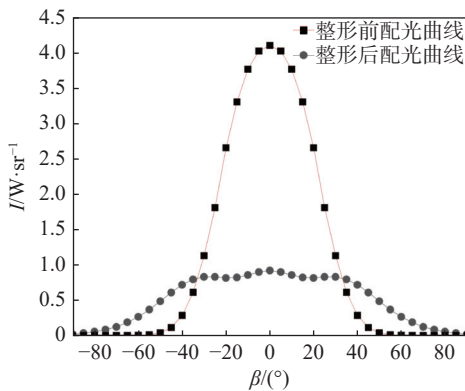


图 3 整形前后配光曲线图

Fig. 3 Light distribution before and after focusing and shaping

3.2 二级复合椭球聚焦均匀线光源仿真分析

设定 M 椭球第一焦点为 $(0, 0, 10$ mm), $a_0=30.5$ mm, $c_0=20.5$ mm, 多个椭球第二焦点光斑距离 $D=1.8$ mm, 利用均匀度模型求解每个椭球参量, 如表 1 所示。利用 NURBS 曲面理论建立共焦点复合椭球腔, 初次优化 (α, θ, Δ) , 得到的均匀度小于 80%。特定椭球参量变化对均匀度及线光源有效长度(有效半高宽)的影响分析结果, 如图 4~图 6(彩图见期刊电子版)所示。

表 1 复合椭球腔 α, θ, Δ 计算结果

Tab. 1 Results of α, θ, Δ of composite ellipsoid cavities

	L_3	L_2	L_1	M	R_1	R_2	R_3
$\theta/^\circ$	1.24	1.27	1.25	1.20	1.25	1.27	1.24
$\alpha/^\circ$	-7.50	-5.42	-2.51	0	2.51	5.42	7.50
Δ/mm	0.621	0.300	0.075	0	0.075	0.300	0.621

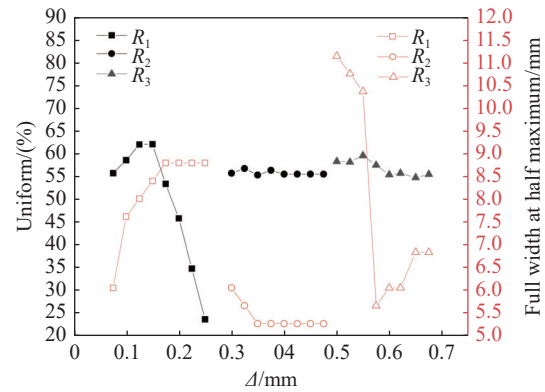


图 4 均匀度及有效半高宽随 Δ 改变情况

Fig. 4 Uniform and effective FWHM length as function of Δ

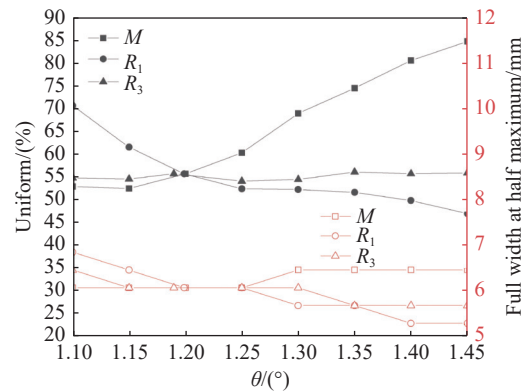


图 5 均匀度及有效半高宽随 θ 变化关系

Fig. 5 Uniform and effective FWHM length as function of θ

由于扩展光源非点光源, 经复合椭球腔成像后受光斑尺寸影响, 线光源分布未能达到目标均匀度, 有必要分析表 1 数据参量对均匀度变化的影响程度分析。以表 1 参量为初值, 分析线光源均匀度及线光源有效长度(有效半高宽)随变量

(α, θ, Δ)的变化规律。从图 5 可以看出:线光源均匀度未随 R_1, R_2 和 R_3 椭球 Δ 改变量明显改善,但 R_3 椭球 Δ 为 0.5~0.55 mm 时,其有效半高宽达到 10 mm 以上, R_1, R_2 椭球 Δ 改变量不影响有效半高宽。图 5 表明线光源均匀度分别与 M 椭球 θ 变化量成正比,与 R_1 椭球 θ 变化量成反比,但 R_2, R_3 椭球 θ 变化量对均匀度略有增加并且变化值接近。因此针对 M, R_1, R_3 椭球调节 θ 变化量大于 1.4° ,而 R_2 椭球调节 θ 变化量小于 1.4° 时将获得高均匀度。考虑到 R_1 椭球 θ 减少时有效半高宽随之降低,因此该值调节范围($1.2^\circ\sim 1.4^\circ$)有利于兼顾均匀度与光源有效长度。从图 6 可看出 R_3 椭球调节 α 改变量均匀度及有效半高宽变化不明显,线光源均匀度分别与 R_1 椭球 α 变化量成反比,与 R_2 椭球 α 变化量成正比,因此 R_1 调节范围($2.2^\circ\sim 2.4^\circ$)、 R_2 调节范围($5.3^\circ\sim 5.4^\circ$)有利于兼顾均匀度与光源有效长度。

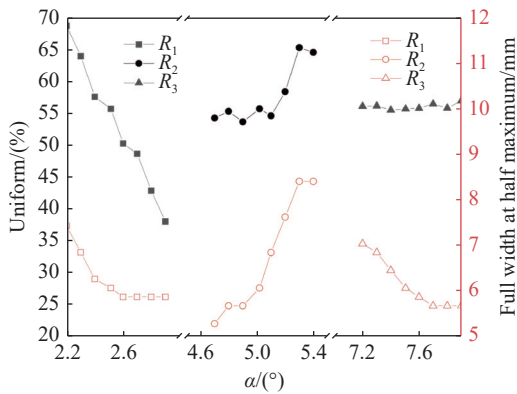


图 6 均匀度及有效半高宽随 α 变化关系

Fig. 6 Uniform and effective FWHM length as function of α

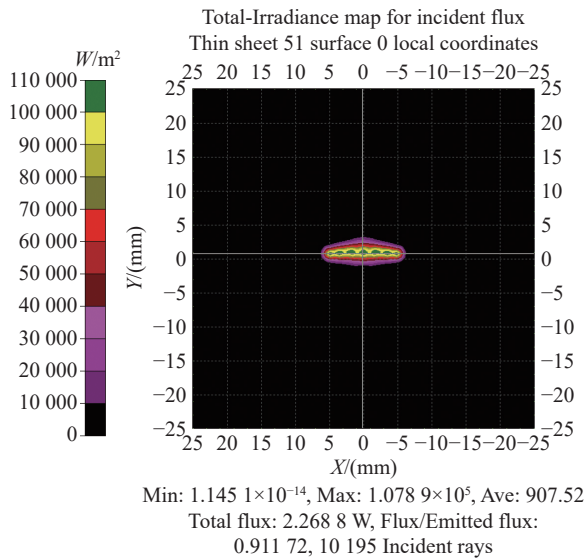


图 8 优化后均匀线光源辐射照度图

Fig. 8 Illumination distribution of uniform line light after optimization

经过分析 M, R_1, R_2, R_3 椭球 θ 角及 R_3 椭球 Δ 值为主要调节变量,以线光源有效半高宽为 10 mm 为目标调节其参数,由表 2 给出。

通过 NURBS 曲面对复合椭球腔建模,并利用 Tracepro 仿真在第二焦点平面处形成有效长度为 12 mm,宽为 1.7 mm,功率密度为 $1.09 \times 10^6 \text{ W/m}^2$,均匀度为 95.46%,光学传递效率为 91.17% 线光源,Tracepro 光迹追踪如图 7 所示,图 8(彩图见期刊电子版)给出了线光源位置辐照图。

表 2 优化后复合椭球腔 α, θ, Δ 值

Tab. 2 Optimized α, θ, Δ of composite ellipsoid cavities

	L_3	L_2	L_1	M	R_1	R_2	R_3
$\theta / ^\circ$	1.45	1.40	1.28	1.45	1.28	1.40	1.45
$\alpha / ^\circ$	-7.50	-5.40	-2.30	0	2.30	5.40	7.50
Δ / mm	0.53	0.30	0.08	0	0.08	0.30	0.53

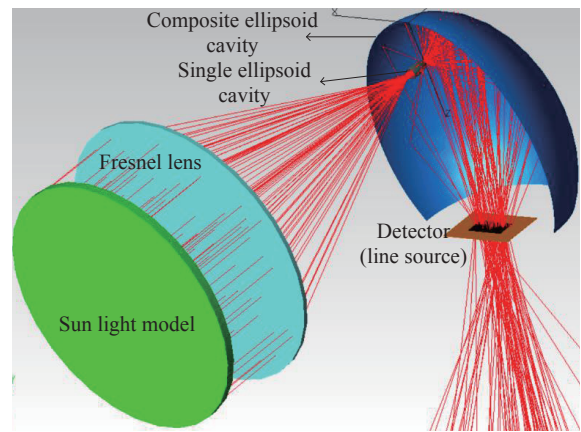
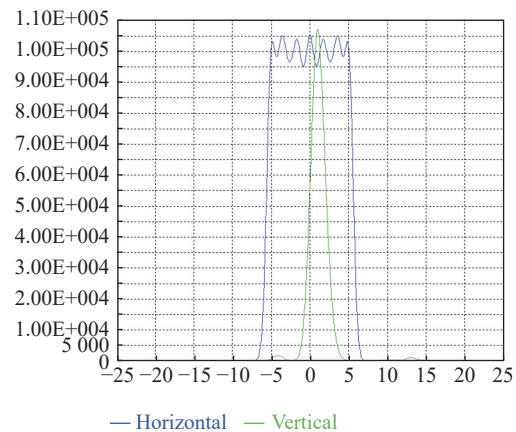


图 7 太阳光聚光系统光迹追踪模型

Fig. 7 Ray tracing model of solar concentrator



4 结 论

本文通过设计复合椭球腔将扩展圆形光斑转换为均匀线光斑。该系统由一级聚光系统和二级聚光系统构成,其中一级聚光系统由菲涅尔和椭球腔构成,可将太阳光转化为发散角为 110° ,有效半高宽为 0.6 mm 的光斑;二级聚光系统由7个

共焦点椭球腔复合而成,其参数通过均匀度求解算法获取,经过NURBS建立的共焦点复合椭球腔后,均匀度低于 80% 。分析时以椭球腔的 θ 和 R_3 椭球 Δ 值为主要调节参量,优化后获得了功率密度为 $1.09\times 10^6\text{ W/m}^2$,均匀度为 95.46% 、有效长度为 12 mm 的线形光源,光学传递效率为 91.17% 。此聚光系统将用于太阳光直接泵浦大功率激光器及提高光电池转换效率技术。

参考文献:

- [1] HAN X Y, SUN Y, HUANG J, *et al.*. Design and analysis of a CPV/T solar receiver with volumetric absorption combined spectral splitter[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(6): 4837-4850.
- [2] ZHOU ZH G, WANG Z, BERMEL P. Radiative cooling for low-band gap photovoltaics under concentrated sunlight[J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): A404-A418.
- [3] KOST C, MAYER J N, THOMSON J, *et al.*. Levelized cost of electricity: PV and CPV in comparison to other technologies[C]. *Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, European Commission, 2014: 4086.
- [4] NOZIK A J, CONIBEER G, BEARD M C. *Advanced Concepts in Photovoltaics*[M]. Cambridge: Royal Society of Chemistry Press, 2014.
- [5] LI M, XU C M, JI X, *et al.*. A new study on the end loss effect for parabolic trough solar collectors[J]. *Energy*, 2015; 82: 382.
- [6] 孟宪龙, 刘备, 段辰星, 等. 一种新型槽式太阳能CPV/T聚光器的光学传输特性[J]. *光学学报*, 2021, 41(15): 1522002.
MENG X L, LIU B, DUAN CH X, *et al.*. Optical transmission characteristic of novel trough type CPV/T concentrator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(15): 1522002. (in Chinese)
- [7] 尹勇, 杨洪海, 苏亚欣, 等. 聚光型太阳能光伏光热系统研究进展[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(1): 1-13.
YIN Y, YANG H H, SU Y X, *et al.*. Research progress of solar concentrating photovoltaic-thermal system[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(1): 1-13. (in Chinese)
- [8] TIBÚRCIO B D, LIANG D W, ALMEIDA J, *et al.*. Improving solar-pumped laser efficiency by a ring-array concentrator[J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2018, 8(1): 018002.
- [9] LIANG D W, VISTAS C R, TIBÚRCIO B D, *et al.*. Solar-pumped Cr: Nd: YAG ceramic laser with 6.7% slope efficiency[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 185: 75-79.
- [10] LIANG D W, VISTAS C R, ALMEIDA J, *et al.*. Side-pumped continuous-wave Nd: YAG solar laser with 5.4% slope efficiency[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 192: 147-153.
- [11] YABE T, MOHAMED M S, UCHIDA S, *et al.*. Noncatalytic dissociation of MgO by laser pulses towards sustainable energy cycle[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(12): 123106.
- [12] SAIKI T, UCHIDA S, MOTOKOSHI S, *et al.*. Development of solar-pumped lasers for space solar power station[C]. *Proceedings of the 56th International Astronautical Congress*, International Astronautical Federation, 2005: 4250.
- [13] YABE T, OHKUBO T, UCHIDA T, *et al.*. Experimental study of solar pumped laser for magnesium-hydrogen energy cycle[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 112: 042072.
- [14] 胡金萍. 聚光光斑的均匀性对聚光光伏系统性能影响的理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
HU J P. *Theoretical study on how the non-uniformity of the sunlight spot influences the performance of the concentrating photovoltaic system*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [15] 马军, 王成龙, 夏养君. 线性菲涅尔式太阳能聚光系统二次聚光器研究进展[J]. *中国科学:技术科学*, 2020, 50(8): 997-1008.
MA J, WANG CH L, XIA Y J. Research progress on secondary concentrator for linear Fresnel reflector[J]. *Cientia Sinica Technologica*, 2020, 50(8): 997-1008. (in Chinese)

- [16] 黄媛. 复合抛物面聚光器的性能分析和应用研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019.
HUANG Y. *Performance analysis on compound parabolic concentrator and its applications*[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)
- [17] 吕家祺, 张宁, 尹鹏, 等. 太阳能光伏聚光器光学设计类型研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 230002.
LV J Q, ZHANG N, YIN P, *et al.*. Research progress on optically designed solar photovoltaic concentrators[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 230002. (in Chinese)
- [18] 赵会富, 朱浩宇, 童宏伟, 等. 能量均匀分布的非涅耳聚光系统的设计[J]. 激光杂志, 2018, 39(12): 10-14.
ZHAO H F, ZHU H Y, TONG H W, *et al.*. Design of energy uniform distribution Fresnel concentration system[J]. *Laser Journal*, 2018, 39(12): 10-14. (in Chinese)
- [19] 杨淑利, 刘志全, 濮海玲. 空间聚光电池阵用拱形菲涅耳透镜的设计与分析[J]. 宇航学报, 2014, 35(1): 106-114.
YANG SH L, LIU ZH Q, PU H L. Design and analysis of arched Fresnel-lens for spacial concentrating solar array[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(1): 106-114. (in Chinese)
- [20] CHEN ZH ZH, XU Y T, GUO Y D, *et al.*. 8.2 kW high beam quality quasi-continuous-wave face-pumped Nd: YAG slab amplifier[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5011-5015.
- [21] 闫钰锋, 于洋, 白素平, 等. 板条激光器光束质量控制技术研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(4): 767-782.
YAN Y F, YU Y, BAI S P, *et al.*. Progress on beam quality control technology of slab lasers[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 767-782. (in Chinese)
- [22] 燕宇翔, 芦宇, 张祥祥. 大功率LED均匀线光源光学系统设计[J]. 照明工程学报, 2020, 31(1): 77-82.
YAN Y X, LU Y, ZHANG X X. Design of optical system for high power LED uniform line light source[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2020, 31(1): 77-82. (in Chinese)

作者简介:



芦宇(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事机非成像光学系统设计、激光器设计、激光加工技术。E-mail:2013040009@tute.edu.cn



杨逸(2000—), 男, 主要研究方向为光学系统设计。E-mail:1529689031@qq.com