

文章编号: 1002-2082 (2020) 01-0170-06

新型 LED 太阳模拟器光学系统设计及仿真

张新强^{1,2}, 张庆茂¹, 郭 亮¹, 张志清², 许毅钦²

(1. 华南师范大学 信息光电子科技学院 广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006;

2. 广东省半导体产业技术研究院, 广东 广州 510651)

摘 要: 针对现有 LED 太阳模拟器同时解决准直性、辐照度均匀性、光谱匹配性三大技术指标的难度较高的问题, 基于光电一体化二次光学设计, 提出一种简便、高效且可实现大功率的 LED 太阳模拟器光学系统设计方法。采用小角度准直透镜和抛物面镜来整合光源, 通过混光棒和微结构进行匀光, 最后利用抛物面镜实现光线的准直输出, 基于同轴准直的设计思想完成 LED 太阳模拟器的设计。利用光学软件 LightTools 对 LED 太阳模拟器光学系统进行模拟仿真与分析优化, 实验结果表明: 在直径为 260 mm 的有效辐照面上辐照不均匀度为 2.5%、准直角为 1.5°。

关键词: LED 太阳模拟器; 光学设计; 不均匀性; 准直角; 微结构

中图分类号: TN202; O432

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0105003

Design and simulation of optical system for novel LED solar simulator

ZHANG Xinqiang^{1,2}, ZHANG Qingmao¹, GUO Liang¹, ZHANG Zhiqing², XU Yiqin²

(1. Guangdong Key Laboratory of Micronano Photonic Functional Materials and Devices, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Semiconductor Industry Technology Research Institute, Guangzhou 510651, China)

Abstract: In order to solve the difficult problems of collimation, irradiance uniformity and spectral matching of existing LED solar simulators, a simple, efficient and high-power optical system design method of LED solar simulator was proposed based on photoelectric integrated secondary optical design. The small angle collimating lens and the parabolic mirror were utilized to integrate the light source, and the mixing light rod and microstructure were used to homogenize the light, finally the collimating output of light was realized by the parabolic mirror. Based on the design idea of coaxial collimation, the design of the LED solar simulator was completed. In addition, the optical software LightTools was used to simulate and optimize the optical system of LED solar simulator. The experimental results show that the irradiation inhomogeneity is 2.5% and the collimation angle is 1.5° on the effective irradiation surface with a diameter of 260 mm.

Key words: LED solar simulator; optical design; inhomogeneity; collimated angle; microstructure

引言

太阳模拟器利用人工光源模拟太阳光辐照, 能提供与太阳光谱分布相匹配的、均匀的、准直稳定的光辐照, 在航空航天、气象、民用等领域应用广泛^[1]。目前, 国内外使用的大部分太阳模拟器的光

学系统仍是针对氙灯光源设计的, 虽然氙灯的光谱线最接近自然太阳光照, 但采用氙灯光源, 仍具有寿命短、产热高、体积大、能量利用率低等缺陷^[2]。

发光二极管(LED)是继白炽灯、荧光灯之后的第3次光源革命。相比传统光源, 具有寿命长、

收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 国家重点基础研究计划项目(2017YFB1104500); 广东省科技项目(2014B010131004、2014B010124002、2014B090903014、2015B090920003、2016B090917002、2016B090926004、201604040006、2016A030313456); 广州市科技计划项目(201707010390)

作者简介: 张新强(1994-)男, 硕士研究生, 主要从事LED照明系统设计研究。E-mail: 15625083002@163.com

通信作者: 张庆茂(1966-)男, 博士, 教授, 主要从事激光先进制造技术研究。E-mail: zhangqm@sncu.edu.cn

发光效率高、光强稳定、可精确控制、近似点光源等优势^[3]。因此,研制以LED为光源的太阳模拟器具有低碳环保、性能稳定、价格低廉等优点,并逐渐成为众多科研单位或生产企业竞相研究的热点^[4]。国内外有一些基于LED光源的太阳模拟器的研究,Tsuno等人^[5]研究的太阳模拟器有效辐照面为100 mm×100 mm,其光源尺寸为335 mm×335 mm,包含2 304颗LED。Kohraku等人^[6]根据晶硅电池对不同波长的光谱响应和LED的电流—电压(I-V)特性曲线等参数设计了一款LED太阳模拟器。周卫华等人^[7-8]通过不同峰值波长的LED组合对太阳光光谱匹配进行了相关研究。以上研究都只对模拟器的部分性能进行了研究,孙健刚等人^[9]研究的LED太阳模拟器在直径为220 mm的有效辐照面上辐照度不均匀度为3.8%,准直角为3.2°。本设计采用8种不同波长的LED芯片,利用小角度准直透镜整形光束、抛物面镜聚光、光学积分器匀光等措施,提出了一种基于LED阵列光源的新型太阳模拟器,以提高LED太阳模拟器的准直性、辐照均匀性等性能指标。

1 LED太阳模拟器的组成及工作原理

本设计实现的LED太阳模拟器采用的是多灯具反射式同轴准直系统^[10],如图1所示,该系统主要由各种峰值波长的大功率LED、小角度准直透镜、抛物面镜、混光棒等组合而成。LED太阳模拟器用不同峰值波长的LED组合作为光源,LED发出的朗伯光经透镜后形成平行光束,通过抛物面镜会聚后到达混光棒内,在混光棒内充分混光后,形成均匀的辐射光束,再利用抛物面镜平行射出,在一定距离的测试面上会形成一个辐照均匀的辐照面,迎着光线的方向看去,就像来自“无穷远”处的太阳,从而模拟了太阳光辐照^[11]。

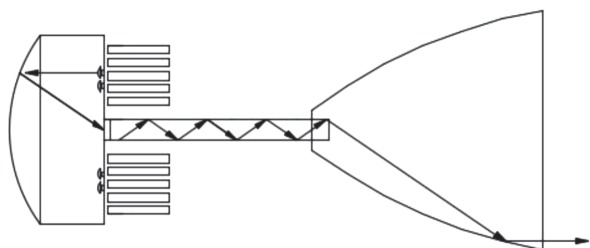


图1 新型LED太阳模拟器光学结构示意图

Fig. 1 Optical structure diagram of a new type of LED solar simulator

2 LED太阳模拟器光学系统设计

2.1 光源设计

2.1.1 准直光设计

LED发出的光是近似朗伯分布的,需要进行二次配光设计,改变光线输出方向,实现光路准直。采用最新研发的小角度准直透镜进行光线准直,其二维轮廓如图2所示。透镜基于面光源和边缘光线理论设计,其发散角的边缘光线来源于光源的端点。

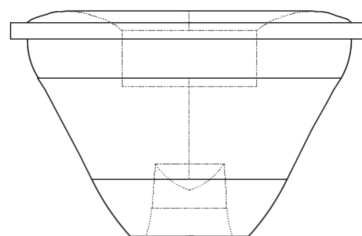


图2 小角度透镜的二维轮廓

Fig. 2 Two-dimensional profile of small angle lens

根据设计建立模型进行仿真模拟,如图3所示。

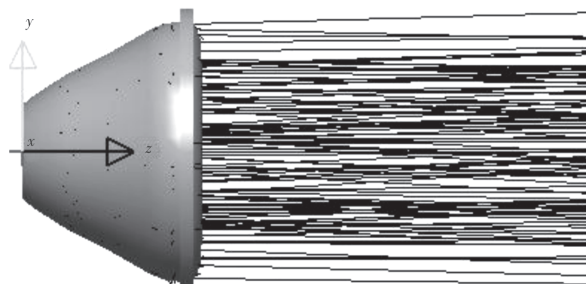


图3 透镜光线追迹图

Fig. 3 Lens ray tracing

将光源设定为尺寸1 mm×1 mm的朗伯型光源,透镜材料设置为折射率1.49的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。通过 2×10^6 条光线追迹得到的配光曲线如图4所示,其发散角(半角)降到了2°,提高光源的准直性可将光线集中地入射到混光棒的口径内,增大光能的利用率。

2.1.2 光谱的设计

为解决光谱匹配问题,本设计选定的光源由单个LED芯片组成。该光源根据AM1.5太阳光谱曲线,在300 nm~400 nm、400 nm~500 nm、500 nm~600 nm、600 nm~700 nm、700 nm~800 nm、800 nm~900 nm、900 nm~1 000 nm、1 000 nm~

1 100 nm 各波段内分别选择一种 LED 芯片, 阵列排布在基板上, 通过调整不同波段内对应 LED 芯片的光强值, 实现近太阳光光谱。

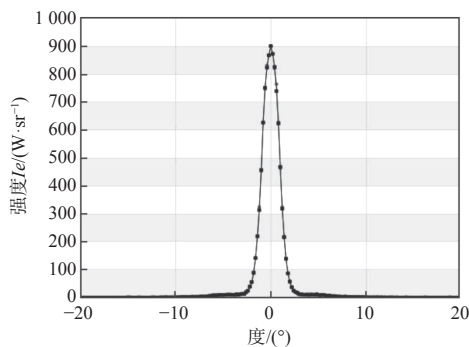


图4 准直后配光曲线

Fig. 4 Light distribution curve after collimation

2.2 聚光镜的设计

利用聚光镜将准直光汇聚到混光棒的口径内, 聚光镜采用抛物面镜^[12], 抛物面是其抛物线绕对称轴旋转而成。平行于对称轴的任何一条光线经抛物面镜反射后都会汇聚于焦点处, 且在该应用中无色像差^[13]。根据光线的可逆性可知, 从焦点辐射出来的能量也能成为平行于对称轴的光束被传出去。如图5所示, 光源位于其焦点位置。

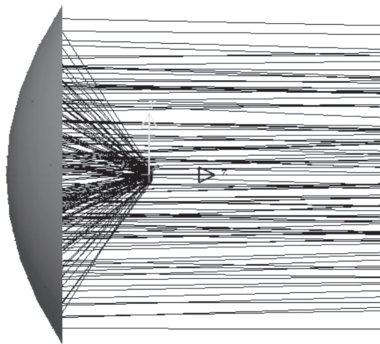


图5 抛物面镜聚光模拟

Fig. 5 Concentration simulation of parabolic mirror

根据准直透镜的尺寸以及阵列排布, 设定抛物面镜焦距为 200 mm、口径为 280 mm, 透镜的光轴平行于抛物面镜的对称轴, 混光棒端口中心位于其焦点位置。

2.3 光学积分器的设计

混光棒是一种特殊的光学积分器^[14]。在本设计中抛物面镜聚集的光线在空间分布上是不均匀的, 混光棒能将光线均匀化, 其成本低、效率高、结构简单。如图6所示, 聚集的光线进入混光棒的输

入端口, 在其内壁发生多次反射, 每次反射可看作产生了一个虚拟光源, 最后实现多个虚拟光源叠加, 从而保证混光棒出射光的照度均匀性^[15]。混光棒的混光效果主要取决于光棒的截面形状、长度、入射光空间和角度分布。截面形状为正方形或正六边形的混光棒可以实现非常高的照明均匀性。在截面形状一定时, 混光棒的长度越长, 混光效果越好, 但到达一定均匀性后再增加长度则只会降低系统效率, 使得结构冗长。本设计中混光棒截面为 8 mm×8 mm 的正方形, 长度为 200 mm。通过仿真模拟光棒端口的出光特性, 得出的照度线图表如图7所示, 根据不均匀度公式:

$$\sigma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ 分别为被照射面的最大照度和最小照度值。代入数据得不均匀度达到 0.9%。

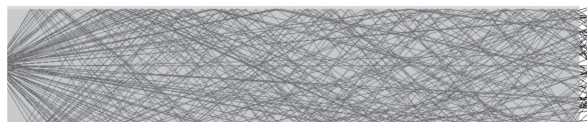


图6 混光棒中的光线路径

Fig. 6 Light path in mixing light rod

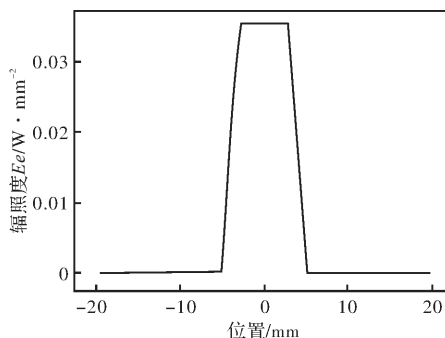


图7 混光棒端口照度线图表

Fig. 7 Illumination line chart at mixing light rod port

2.4 准直反射镜的设计

经混光棒匀光后, 光斑的照度均匀性非常好, 但是要在工作面上得到尺寸不小于直径 250 mm 的均匀光斑, 则需要一个准直镜来输出光线。虽然太阳模拟器的成像系统并不以提高成像质量为目的, 但是大的像差会降低太阳模拟系统辐照面的光能利用率。因此, 本设计中同样采用抛物面镜来进行准直, 把抛物面镜顶端打通, 将混光棒的输出端口放在抛物面焦点位置, 抛物面镜口径大于 300 mm。

3 仿真优化及结果分析

根据设计参数, 利用 LightTools 建立模型进行 5×10^6 条光线追迹, 如图 8 所示。发现在接收面上光斑中部发生凹陷, 不够均匀, 如图 10(a)、10(b) 所示。经分析, 仅仅依靠混光棒的匀光达不到理想效果, 为进一步改变匀光系统出光口的光强分布曲线, 协调准直及均匀性调控, 考虑在混光棒前端添加混光效果明显的复眼微结构, 再在出光面上加磨砂^[16], 如图 9 所示。经不断调整复眼结构以及磨砂程度后的优化结果如图 10(c)、10(d)、10(e) 所示, 在光斑尺寸约为直径 260 mm 的辐照面上, 不均匀度达到了 2.5%, 准直角为 1.5° 。



图 8 LED 太阳模拟器模型图

Fig. 8 Model of LED solar simulator

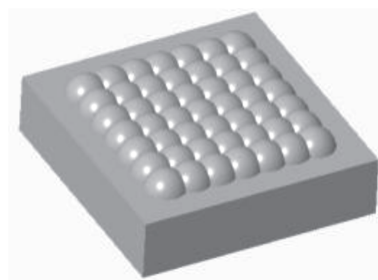
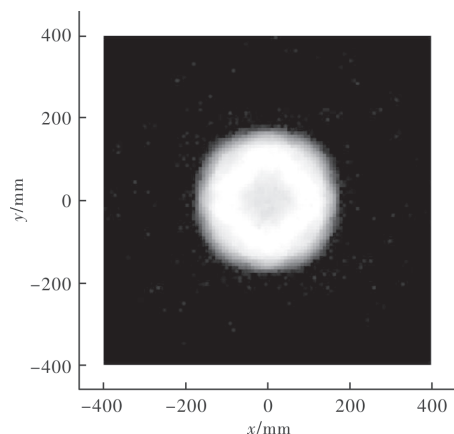


图 9 微结构示意图

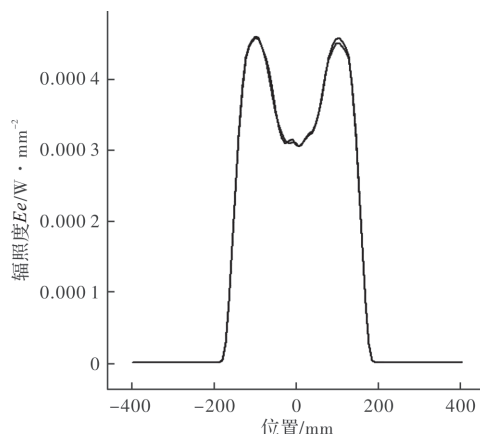
Fig. 9 Microstructure diagram

4 总结

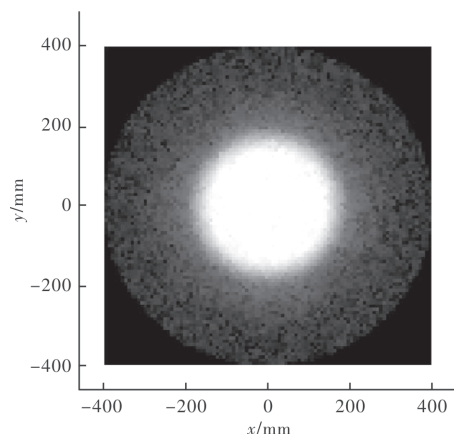
本文设计了一款基于 LED 阵列光源, 采用多灯具反射式同轴准直系统的太阳模拟器, 利用光学软件 LightTools 通过蒙特卡罗光线追迹法对光学系统进行仿真模拟, 结果显示在直径为 260 mm 的有效辐照面上辐照不均匀度为 2.5%、准直角为 1.5° 。且本设计采用的混光棒与微结构的组合能够充分打乱光线, 有很好的匀光效果, 抛物面镜的聚光能力不受阵列的限制, 增加阵列 LED 光源模块的数量可大大提高功率和光谱匹配性, 为大功



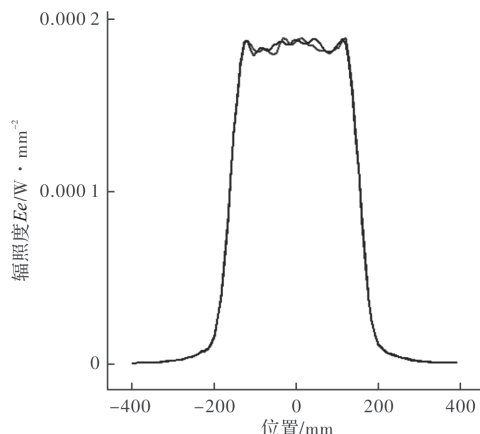
(a) 优化前照度光栅图



(b) 优化前照度线图表



(c) 优化后照度光栅图



(d) 优化后照度线图表

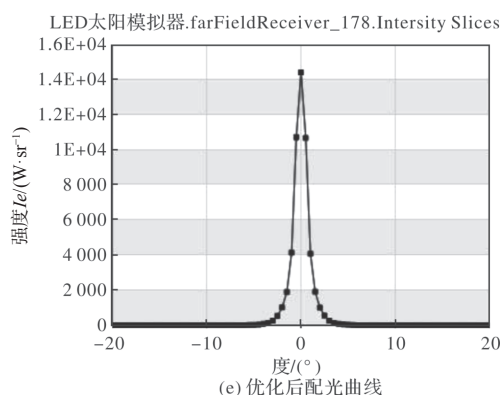


图 10 仿真优化前后照明特性结果图

Fig. 10 Results of illumination characteristics before and after optimization are simulated

率 LED 太阳模拟器的进一步研究奠定了一定的基础。

参考文献:

- [1] GAO Yan, LIU Hongbo, WANG Li. Solar simulation technology[J]. China Optics and Applied Optics, 2010, 2(6): 104-111.
高雁, 刘洪波, 王丽. 太阳模拟技术[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 2(6): 104-111.
- [2] WANG Jiqiang, SU Shi, ZHANG Jian, et al. Design of optical system of spherical array LED solar simulator[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(1): 117-123.
王基强, 苏拾, 张健, 等. 球面阵列LED太阳模拟器光学系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(1): 117-123.
- [3] ZHANG Yiwen. Design and development of solar spectrum lamp based on LED standard[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
张译文. 基于LED标准太阳光谱灯的设计与研制[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [4] SU Shi, ZHANG Guoyu, WANG Lingyun, et al. Research status of solar simulators based on light emitting diodes[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2018, 55(7): 40-51.
苏拾, 张国玉, 王凌云, 等. 基于发光二极管的太阳模拟器的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 40-51.
- [5] TSUNO Y, KAMISAKO K, KUROKAWA K. New generation of PV module rating by LED solar simulator - a novel approach and its capacities[C]. New York: IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008: 1-5.
- [6] KOHRAKU S, KUROKAWA K. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator[J]. World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003, 2: 1977-1980.
- [7] ZHOU Weihua, ZHOU Hanchang. Research on LED solar simulator[J]. Infrared, 2009, 30(03): 46-48.
周卫华, 周汉昌. LED太阳模拟器的研究[J]. 红外, 2009, 30(03): 46-48.
- [8] GAO Liang, LI Guohua, MENG Zhaoyuan. Design of LED solar simulator[C]//Huangzhou: Zhejiang University Press, Papers of the 10th China Solar Photovoltaic Conference, 2008: 751-756.
高亮, 李果华, 孟昭渊. LED太阳模拟器的设计[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 第十届中国太阳能光伏会议论文集, 2008: 751-756.
- [9] SUN Jiangang, LI Guohua, ZHU Kongshuo, et al. Design and simulation of optical system for LED solar simulator[J]. Advances in laser and optoelectronics, 2013, 50(10): 175-181.
孙健刚, 李果华, 朱孔硕, 等. LED太阳模拟器光学系统设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 175-181.
- [10] SUN Mingjiao. The optical system design of Φ100 caliber collimated solar simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
孙铭礁. Φ100口径准直式太阳模拟器光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [11] LI Gang, ZHOU Yanping. Design of solar simulator and earth simulator for satellite simulation test[J]. Infrared Technology, 2007(5): 283-287.
李刚, 周彦平. 卫星仿真测试用太阳模拟器和地球模拟器设计[J]. 红外技术, 2007(5): 283-287.
- [12] LIU Ying, DAI Jingmin, SUN Xiaogang. Calculation of energy flow density distribution in focus spot of parabolic

- concentrator[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007(10): 1049-1054.
- 刘颖, 戴景民, 孙晓刚. 抛物面型聚光器聚焦光斑能流密度分布的计算[J]. *太阳能学报*, 2007(10): 1049-1054.
- [13] ZUO Baiying, ZHAO Huijie, ZHANG Ying, et al. Collimation output irradiance characteristics of off-axis parabolic mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 688-692.
- 邹百英, 赵慧洁, 张颖, 等. 离轴抛物面镜准直输出辐照度特性[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 688-692.
- [14] WANG Weisheng, DOU Xiaoming, HUANG Weishi. Analysis and design of light rod illumination system of liquid crystal projector[J]. *Optical Instruments*, 2004(4): 36-40.
- 王蔚生, 窦晓鸣, 黄维实. 液晶投影机光棒照明系统的分析与设计[J]. *光学仪器*, 2004(4): 36-40.
- [15] DU Zhiqiang. Theory and application of solar simulator[D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2017.
- 杜志强. 太阳模拟器理论及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [16] HAN Min. Design and application of collimating lens for large-size LED source[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- 韩敏. 大尺寸LED光源准直透镜的设计与应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.