

文章编号 1004-924X(2018)02-0307-09

基于 LED 阵列光源的太阳模拟器

苏 拾^{1,2*}, 张国玉^{1,2}, 王凌云^{1,2}, 郑 茹^{1,2}, 王逸文¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要:针对目前 LED 太阳模拟器辐照度低、光谱匹配性差等不足,提出一种由 LED 阵列光源、菲涅尔透镜、光学积分器、准直物镜组成的 LED 太阳模拟器。首先根据多光谱拟合理论,在 400~1 100 nm 优选 15 种不同波段的 LED 光源,计算出光源所需功率,实现太阳光谱的精确匹配。其次优化设计了菲涅尔透镜、光学积分器以及准直物镜,校正了太阳模拟器的像差,提高了太阳模拟器的能量利用效率以及辐照均匀性,并利用 LightTools 软件对所设计的光学系统进行仿真分析。最后搭建了光学系统实验装置,测试结果表明:100 mm×100 mm 内的辐照度达到 1 376.3 W/m²;拟合的太阳光谱匹配度达到 AM1.5 条件中的 A 级,辐照不均匀度为±1.73%,辐照不稳定性为±0.82%,综合性能指标达到太阳模拟器中的 3A 级水平。

关键词:太阳模拟器;LED 阵列光源;光学系统;菲涅尔透镜;光学积分器

中图分类号:O432.1;TN312.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182602.0307

Solar simulator based on LED array light source

SU Shi^{1,2*}, ZHANG Guo-yu^{1,2}, WANG Ling-yun^{1,2}, ZHENG Ru^{1,2}, WANG Yi-wen¹

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130022, China;

2. Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission
Technology of Ministry of Education, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: sushi@cust.edu.cn

Abstract: Addressing the deficiencies of solar simulators, such as low radiation intensity and poor spectral matching, an LED solar simulator consisting of an LED array light source module, Fresnel focusing lens, optical integrator, and collimator lens is proposed. Firstly, according to the principle of multispectral fitting, 15 LED light sources with different wavelengths are optimally selected in the spectral range of 400—1 100 nm, and their light source power is calculated to realize an exact match of the solar spectrum. Secondly, the design of the Fresnel lens, optical integrator, and collimator lens is optimized to correct the aberrations of the sun simulator and improve its energy utilization efficiency and irradiation surface nonuniformity. The optical system is simulated using the LightTools software. Finally, an experimental device of the optical system is built, its fitted spectra reaching the A level according to the AM1.5 conditions, a radiation intensity of 1 376.3 W/m² from an area of 100 mm×100

收稿日期:2017-05-23;修订日期:2017-06-23.

基金项目:吉林省科技发展计划重点项目(No. 20150204048G);吉林省省级产业创新专项资金项目(No. 2016C084);吉林省教育厅“十三五”科学技术研究资助项目(No. 2016370)

mm, an irradiation nonuniformity of $\pm 1.73\%$, and an irradiation instability of $\pm 0.82\%$. The overall performance of the solar simulator satisfied the Triple-A level.

Key words: solar simulator; LED array light source; optical system; Fresnel lens; optical integrator

1 引言

太阳模拟器是一种在室内模拟太阳辐射特征的重要检测设备,在航空航天、太阳能利用、新材料研制、医疗保健等方面具有广泛的应用^[1-2]。

半导体发光器件(Light Emitting Diode, LED)具有节能高效、绿色环保、可控性强、光源类型可选性较多等优点,被人们用以研制不同类型的 LED 太阳模拟器。2003 年,日本东京农业科技大学研制了世界上第一台 LED 太阳模拟器,采用 4 个或 6 个不同波长的 LED 芯片,用于测试单晶硅电池的 I - V 特性^[3]。2010 年,丹麦科技大学研制出第三代 ProMoSimevo LED 光伏模拟器,以 18 色 LED 阵列作为光源,涵盖 390~940 nm 波段^[4]。2015 年,美国 Newport 公司研发的 LED 太阳模拟器选取了 19 种 LED,在 50 mm×50 mm 面积内辐照度达到 1 个太阳常数^[5]。此外,国内安徽光机所的陈风,袁银麟等人提出了一种由积分球和不同波长 LED 组成的光源,在可见光波段内模拟不同光谱分布^[6]。长春光机所的刘洪兴、孙景旭等人以氙灯作为基底光源,通过复合 53 种 LED 较好地模拟出太阳光谱^[7]。以上的太阳模拟器虽然各有优点,但输出光谱、辐照不均匀度、辐照不稳定性还不能满足 3A 级水平。因此,本文采用 15 种不同中心波长的 LED,利用菲涅透镜聚光、光学积分器匀光等办法,提出了一种基于 LED 阵列光源的太阳模拟器,以提高 LED 太阳模拟器的光谱匹配性、辐射照度、辐照均匀性等性能指标。

2 LED 太阳模拟器光学系统组成与工作原理

新型 LED 太阳模拟器的光学系统主要由 LED 阵列光源、菲涅尔透镜、光学积分器和准直物镜组成,如图 1 所示。采用 15 种不同数量的 LED 阵列来模拟太阳光。LED 经准直处理后光

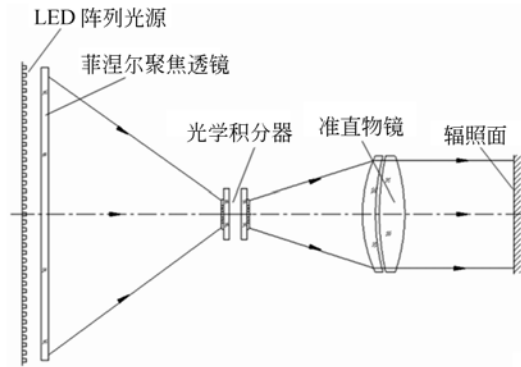


图 1 LED 太阳模拟器光学系统组成

Fig. 1 Optical components of LED solar simulator

束整形为平行光,经菲涅尔透镜聚光,光学积分器匀光,最后由准直物镜投射到最佳辐照面上。

3 光学系统设计

3.1 LED 阵列光源设计

3.1.1 LED 光源选取与功率计算

AM1.5 中 A 级标准对应的光谱波段为 400~1 100 nm,通过研究各种 LED 的光谱特性,选取中心波长分别为 420, 480, 505, 550, 605, 660, 710, 735, 780, 810, 850, 890, 940, 1 020 nm、白光 LED(425~750 nm)等 15 种 LED,采用光纤光谱

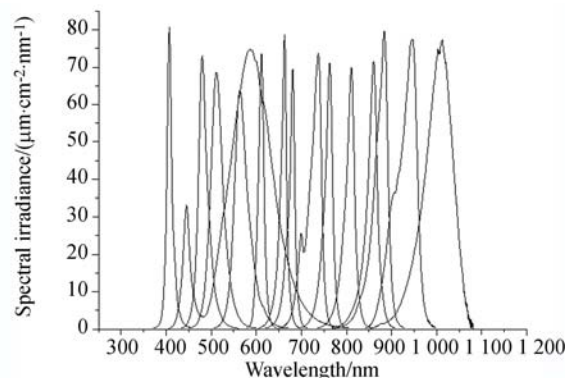


图 2 15 种 LED 的光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of 15 kinds of LED

仪实测得到 15 种 LED 的光谱曲线如图 2 所示,在供电电流为 350 mA 下测得的 LED 光功率如表 1 所示。

要使系统输出的辐照度大于 1 个太阳常数(即 $E=1\ 353\ \text{W}/\text{m}^2$),辐照面积 $S=100\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}=0.01\ \text{m}^2$ 。

光学系统的能量利用率为:

$$\tau = \tau_1^{n_1} \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4^{n_2}, \quad (1)$$

其中:菲涅尔透镜的单面透过率 $\tau_1=0.9$, n_1 为透过面数,取值为 2;光学积分器孔径利用率 $\tau_2=0.4$;光学积分器(场镜、投影镜)透过率 $\tau_3=0.9$;准直物镜的单面透过率 $\tau_4=0.99$, n_2 为透过面数,取值为 4。

辐照面内的辐照度为:

$$E = \frac{P \cdot \tau}{S}. \quad (2)$$

则所需 LED 阵列的总光功率为:

$$P = \frac{E \cdot S}{\tau}. \quad (3)$$

经过计算, $P=48.32\ \text{W}$,考虑到其它损耗,实际 LED 阵列的总功率约为 $60\ \text{W}$ 。

表 1 15 种 LED 光电参数及数量

Tab.1 Photoelectric parameters and quantities of 15 kinds of LED

序 号	峰值波长 /nm	波段 /nm	光功率 /mW	个数 /n
1	410	380~443	456.7	16
2	480	443~537	287.6	16
3	510	450~600	255	32
4	560	520~645	141.1	64
5	612	586~635	45.32	64
6	660	617~687	231.1	16
7	710	675~755	240	16
8	735	666~764	281.4	16
9	780	709~789	171	16
10	810	751~844	110	16
11	860	793~894	95	32
12	880	796~920	97	16
13	950	852~989	120	32
14	1020	870~01	85	32
15	598(白光)	415~765	314.3	16

3.1.2 基于 LED 的太阳光谱拟合及评价

根据实测的 LED 光谱曲线,利用 Origin 软件对每种光谱曲线进行采点,按照光谱叠加原理,

以 AM1.5 的 A 级标准光谱为目标进行拟合。因为 LED 光谱为波段较窄、峰值突出的高斯曲线,且连续光滑,故在此做简化处理,即将每个波段的曲线用多项式方法拟合,获得每段光谱曲线对应的数学式,得到微小波段的光谱系数矩阵 \mathbf{A} 。根据目标光谱矩阵 \mathbf{b} ,通过光谱拟合矩阵 $\mathbf{AX}=\mathbf{b}$ 计算,求出非负最小二乘解,即解拟合参数矩阵 \mathbf{X} ,实现对目标光谱的模拟。由此确定每种 LED 的个数,如表 1 所示,拟合后的太阳光谱曲线如图 3 所示。

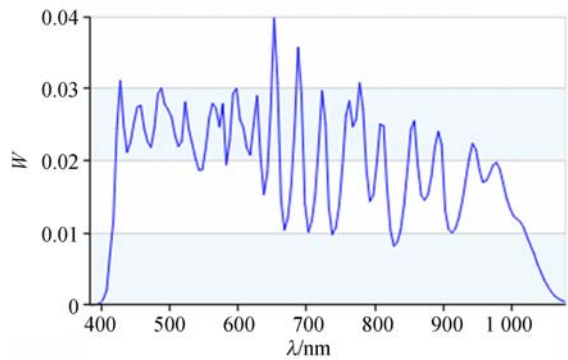


图 3 采用 15 种 LED 拟合的太阳光谱曲线
Fig.3 Solar spectrum fitted with 15 kinds of LEDs

按照相对面积法对拟合光谱进行评价,令 AM1.5 条件下的标准太阳光谱曲线中某波段内的面积占能量总面积的百分比为 $a\%$,则 LED 拟合光谱曲线中某一波段内面积占总面积的百分比为 $b\%$,拟合光谱的失配误差为 $(b\% - a\%)/a\%$,各波段内光谱失配误差如表 2 所示^[8-9]。

表 2 各波段内光谱失配误差

Tab.2 Spectral mismatch error in each band

光谱区间 / μm	实际能量 百分比/%	AM1.5 能量 百分比/%	光谱失 配误差/%
0.4~0.5	19.6	18.5	± 5.9
0.5~0.6	20.59	20.1	± 2.4
0.6~0.7	16.73	18.3	± 8.6
0.7~0.8	15.48	14.8	± 4.4
0.8~0.9	11.94	12.2	± 2.1
0.9~1.1	15.6	16.1	± 3.1

拟合后各区间内的光谱失配误差均小于 $\pm 20\%$,符合 AM1.5 条件下的 A 级标准。

3.1.3 LED 布置方式

为了获得 1 个太阳常数的辐照度和 A 级标准的太阳光谱,共需 15 种共计 512 颗 LED 组成

面阵光源。为使不同波段的 LED 充分混光,LED 阵列按网格化布置,由 $4 \times 4 = 16$ 个基本单元模块组成。每个单元模块选用 15 种 LED,按照 $5 \times 5 = 25$ 颗 LED 布置,布置方式如图 4 所示,白光位于中心,周围布置波长 $> 780 \text{ nm}$ 的近红外 LED,最外层布置可见光波段 LED,同类型的 LED 分散布置。这样既能混光充分,又能提高最佳辐照面上的辐照均匀性。考虑 LED 的散热条件,若网格间距取 15 mm ,LED 面阵光源尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。

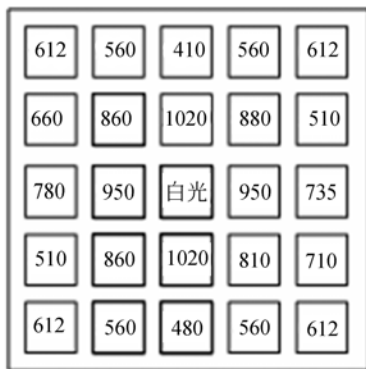


图 4 基本单元模块 LED 布置方式

Fig. 4 LED arrangement in base unit module

3.1.4 LED 光源的二次光学设计

最初封装的 LED 为光束发散角为 120° 的朗伯体光源,光强呈余弦函数分布,能量分散^[10],进入后续光学系统的光能较低,因此进行二次开发,对光源进行准直设计。实际 LED 为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的面源芯片,依据点光源理论进行计算,尽可能降低光源发散角,提高光束准直性,设计时适当增加透镜口径,减小光源与透镜的相对尺寸。但透镜口径增大,透镜的吸收和散射增加,综合考虑选取口径为 18 mm 的自由曲面透镜。

利用 LightTools 软件进行建模,透射部分的前曲面设置为二次曲面,将二者之间的厚度和前表面曲率半径设置为优化变量,并添加准直评价函数后进行优化,以 PMMA 透镜材料,优化曲面半径为 7.587 mm ,曲面系数为 -0.5427 ,建立的模型如图 5 所示,优化后的光源配光曲线如图 6 所示,发散角压缩至 $\pm 5^\circ$ 。

3.2 菲涅尔透镜设计

菲涅尔透镜的作用是使经过二次光学设计的 LED 发出的平行光会聚到光学积分器场镜前表面上,具体光路如图 7 所示。由几何关系易知:

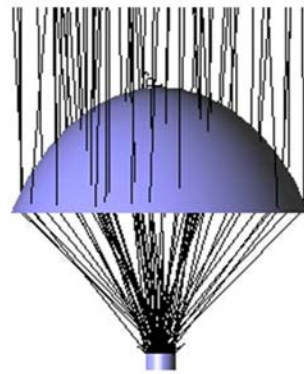


图 5 LED 光源二次光学设计仿真模型

Fig. 5 Simulation model of secondary optical design for LED light source

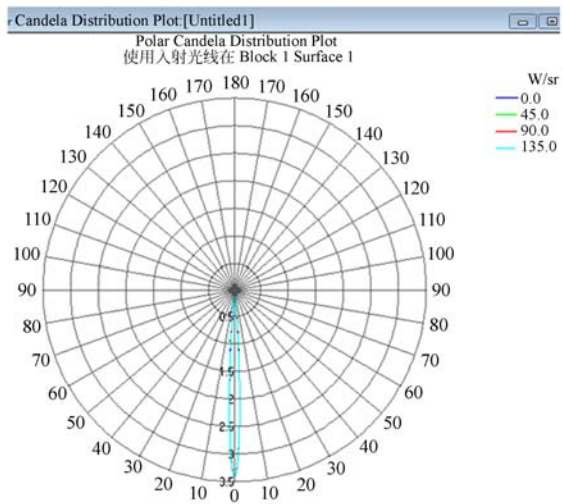


图 6 LED 光源优化后配光曲线

Fig. 6 Optimized light distribution curve of LED light source

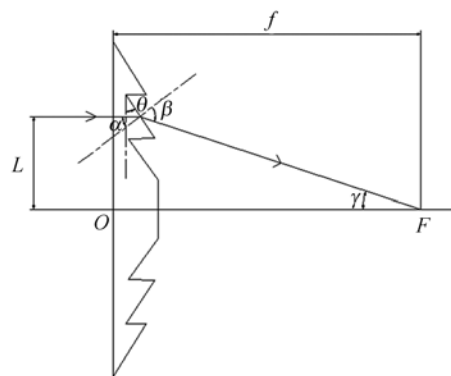


图 7 菲涅尔聚焦透镜原理

Fig. 7 Principle of Fresnel focusing lens

$$\theta = \alpha, \tag{4}$$

$$\gamma = \beta - \theta, \tag{5}$$

$$\tan \gamma = L/f, \tag{6}$$

其中:楔形浮雕的楔角为 θ ,入射角为 α ,折射角为 β ,出射光线与光轴的夹角为 γ , f 为菲涅尔透镜的焦距, L 为该浮雕到菲涅尔透镜镜面中心的距离。

由折射定律有:

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n \tag{7}$$

联立式(4)~式(7)可得:

$$\tan \theta = \frac{\sin(\beta - \theta)}{n - \cos(\beta - \theta)}, \tag{8}$$

将式(6)代入可得:

$$\tan \theta = \frac{\sin(\arctan(L/f))}{n - \cos(\arctan(L/f))}. \tag{9}$$

通过三角变换可得:

$$\tan \theta = \frac{L}{n \sqrt{f^2 + L^2} - 1}. \tag{10}$$

根据式(10)和每个楔形浮雕离光轴的距离 L 可以算出相应的楔角^[11-12]。根据设计的 LED 面阵光源尺寸,菲涅尔口径选取为 450 mm,相对孔径数为 1/4,则焦距 $f_1' = 1\ 800$ mm。透镜中心小曲面的半径为 15 mm,楔形浮雕间距为 0.5 mm,总计有 500 圈楔形浮雕。 L_n 为等差数列,其中 $L_1 = 15.25$ mm, $L_{500} = 224.75$,根据式(10)可计算各对应的楔角 θ 。采用 PMMA 材质加工菲涅尔透镜,折射率 $n = 1.493\ 6$ 。

3.3 光学积分器设计

菲涅尔透镜将 LED 光源发出的辐通量进行汇聚,在光学积分器前端形成一个高斯分布的辐照。这个辐照中心高两端低,呈中心对称,极不均匀,需要光学积分器对辐照进行匀化处理。光学积分器主要由场镜组、平行玻璃板和投影镜组组成^[13],如图 8 所示。

场镜组中阵列的每个小透镜将汇聚的高斯辐照分布进行分割,成像到后面投影镜组上。投影镜组中每个小透镜将场镜组分割的像进行叠加,再经后面的光学系统成像到最佳辐照面处,实质就是一个先微分再积分的过程,图 9 为积分器成像关系。积分器左侧形成的照度分布与右侧形成的照度分布呈中心对称,叠加时相互补偿,由此提高了辐照面上的辐照均匀性,图 10 为积分器的辐照分布曲线。

设计的光学积分器采用对称结构,每个小透

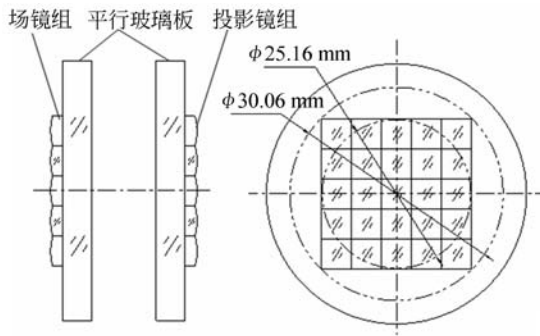


图 8 光学积分器组成

Fig. 8 Schematic of optical integrator

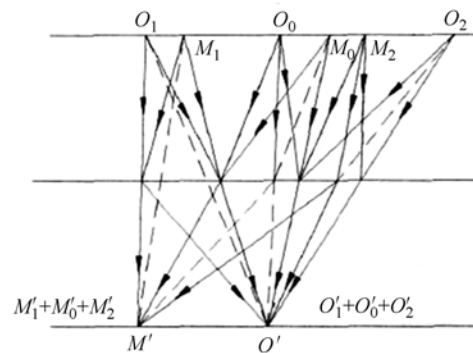


图 9 积分器成像关系

Fig. 9 Imaging relation of integrator

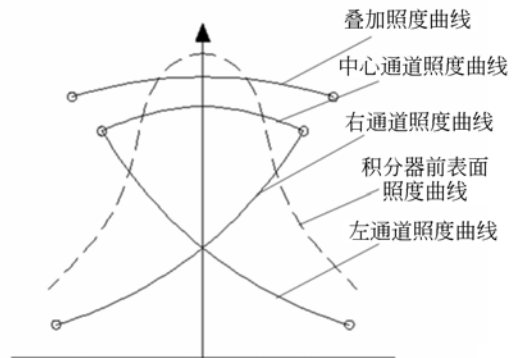


图 10 积分器辐照分布曲线

Fig. 10 Radiation distribution curve of integrator

镜的光学参数相同,设计时要充分考虑光通道数目、积分器口径利用率、投影镜组离焦距等因素对匀光效果的影响。为了获得 100 mm×100 mm 的辐照面,考虑当前的工艺水平,积分器的小透镜设计成 5.2 mm×5.2 mm 的正方形,共 50 个,通过光胶法分别在平行玻璃板上拼接成场镜组和投影镜组,形成 5×5=25 个光学通道的微透镜阵

列,拼接后内接圆的直径为 25.16 mm,外接圆直径为 30.06 mm,固定积分器微透镜阵列的玻璃板口径 $\Phi 40$ mm。每个小透镜均为平凸透镜,相对孔径取 $1/4$,由此计算小透镜焦距 $f_2' = 20.8$ mm。积分器位于菲涅尔透镜焦面处,能量大、温度高,材料采用耐高温的石英玻璃 JGS3, $n = 1.4586$,小透镜的曲率半径为 9.54 mm。

3.4 准直物镜设计

准直物镜用于产生平行光辐射,保证沿光轴方向一定深度内的辐照均匀性。为了更好地校正球差、色差和正弦差等像差,准直物镜选用双分离结构,正透镜选用 K9,负透镜选用 ZF1;视场光阑应位于光学积分器出瞳附近,即准直物镜焦面处。根据辐照面积确定准直物镜的通光口径为 160 mm,相对孔径取 $1:4$,优化后准直物镜的焦距 $f_3' = 638.4$ mm,光学系统结构如图 11 所示。

LED 太阳模拟器的光学系统是照明光学系统,对像差的要求不高。图 12、图 13 分别为准直物镜优化后的点列图和像差曲线。由图 11 可知,各视场弥散斑不大,表明整个系统的像差较小。由图 12 可知,系统对中心波长进行了球差校正,在 0.7 口径消色差,虽然存在一定的二级光谱,但对于照明光学系统来说可以不计。综合分析可知,优化后准直物镜各像差满足使用要求。

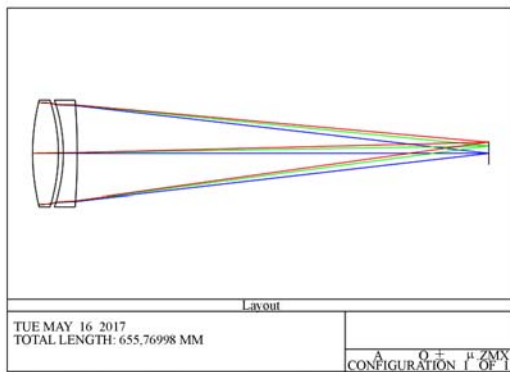


图 11 准直物镜结构

Fig. 11 Structure of collimating objective lens

3.5 光学系统仿真分析

采用 LightTools 软件,利用蒙特卡洛追迹法^[14-15]对设计的光学系统进行仿真与分析。15 种 LED 光源模型中分别导入对应的配光曲线和光谱曲线,设定各自的光功率,并按照网格间距 15 mm 进行阵列。根据前述光学系统设计,积分器位于菲涅尔透镜焦面处,且能充满整个积分器

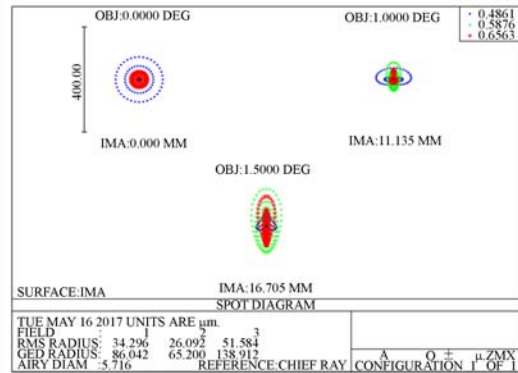


图 12 准直物镜的点列图

Fig. 12 Spot diagram of collimating objective lens

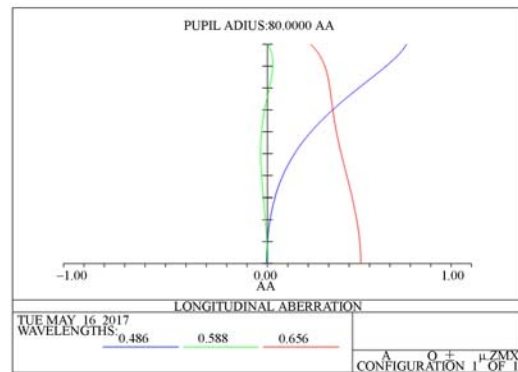


图 13 准直物镜像差曲线

Fig. 13 Spherical aberration and axial chromatic aberration curve of collimating objective lens

前端。沿光轴调整准直物镜,使积分器后端位于准直物镜的焦面处。光学元件位置确定好后,前后调整辐照接收器位置,确定工作距离 813 mm 为最佳辐照面位置。然后对系统中各光学元件设置透过率,在最佳辐照面添加接收器,接收面积为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,接收器进行 21×21 的网格划分,设置追迹光线 2000 万条,辐照误差峰值为 $1.8\% < 5\%$,追迹结果可以信赖,如图 14 所示。



图 14 LED 太阳模拟器光学系统仿真

Fig. 14 Simulation of optical system for LED solar simulator

最佳辐照面上的辐照分布二维光栅和辐照二维线性分布分别如图 15、图 16 所示。通过分析可知,在目标辐照面的最大辐照度为 1423.2 W/m^2 ,最小辐照度为 1382.7 W/m^2 ,辐照不均匀度为 $\pm 1.44\%$ 。

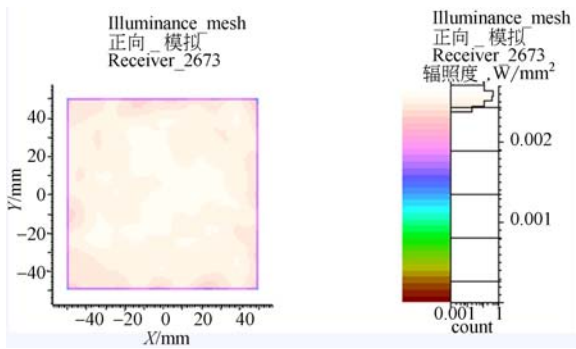
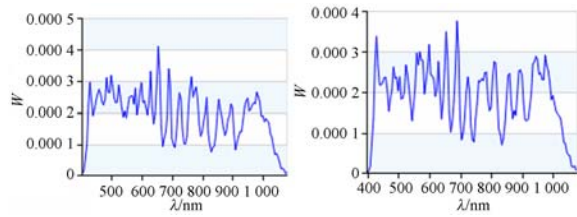


图 15 辐照分布二维光栅图

Fig. 15 Two dimensional grating pattern of radiation distribution



(c) 左下区域 (d) 右下区域
(c) Lower left area (d) Lower right area

图 17 辐照面局部光谱分布

Fig. 17 Local spectral distribution of radiation surface

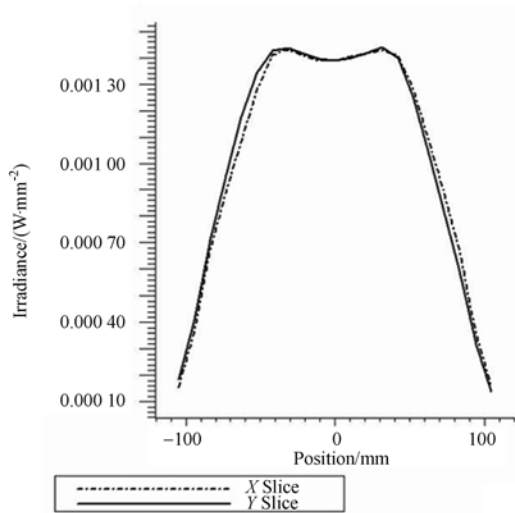
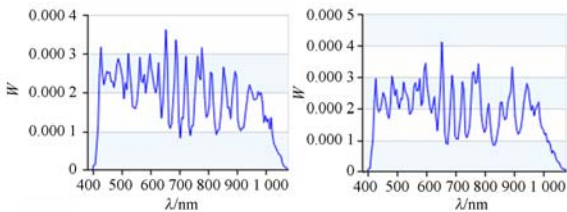


图 16 辐照二维线性分布

Fig. 16 Two dimensional linear distribution of radiation

然后对光谱一致性进行仿真分析。将最佳辐照面划分为对称的四个区域,每个区域面积为 50 mm×50 mm,利用蒙特卡洛光线追迹法对局部光谱进行计算,其光谱曲线如图 17 所示。整体来说混光充分,光谱一致性较好,但在近红外波段和紫外波段光谱有明显差异。



(a) 左上区域 (b) 右上区域
(a) Upper left area (b) Upper right area

4 实验分析

采用 LED 阵列光源、菲涅尔汇聚透镜、光学积分器、准直物镜搭建的 LED 太阳模拟器光学系统实验装置如图 18 所示。



图 18 LED 太阳模拟器光学系统实验装置

Fig. 18 Experimental devices of LED solar simulator

以 AM1.5 条件中 A 级光谱为目标,通过调整 LED 电流获得不同的辐射通量,近似满足标准光谱辐照分布,采用光纤光谱仪测试 LED 太阳光谱拟合曲线,结果如图 19 所示。

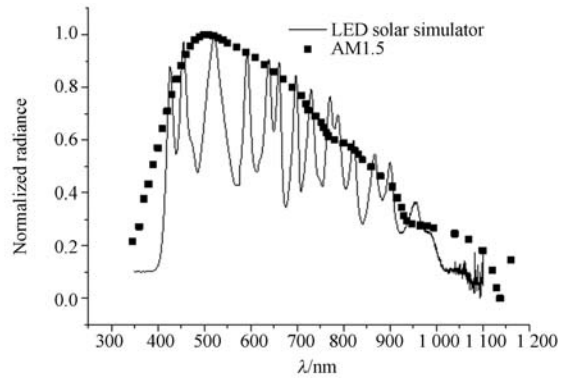


图 19 LED 拟合太阳光谱测试曲线

Fig. 19 Fitting curve of solar spectrum by LED

由光谱仪自带软件测试各波段太阳光谱的匹配度,如表 3 所示,拟合太阳光谱各波段均达到 A 级。

表 3 拟合的太阳光谱匹配度测试结果

Tab.3 Test results of solar spectrum matching rate

Wavelength/nm	Ratio/%	Match
400~500	99.4	A
500~600	99.8	A
600~700	96.6	A
700~800	99.3	A
800~900	100.8	A
900~1100	105.5	A

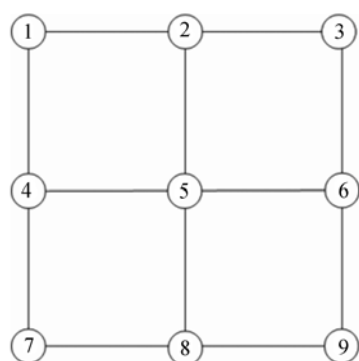


图 20 辐照度测试位置

Fig. 20 Irradiance test position

采用辐照计,按照图 20 对最佳辐照面上 9 个位置的辐照度进行测试,最高辐照度为 $1\,376.3\text{ W/m}^2$,最低辐照度为 $1\,329.5\text{ W/m}^2$,辐照不均匀度为 $\pm 1.73\%$,满足太阳模拟器辐照均匀性 A 级水平。

将输出辐照调整至 $1\,000\text{ W/m}^2$,采用辐照计

每隔 5 min 对光斑中心的辐照度进行测试,30 min 内的最高辐照度为 $1\,000\text{ W/m}^2$,最低辐照度为 983.7 W/m^2 ,辐照不稳定性为 $\pm 0.82\%$,达到了太阳模拟器辐照稳定性 A 级水平。

5 结 论

本文针对当前 LED 太阳模拟器的不足,以提高太阳光谱匹配性、输出辐照度、辐照均匀性为目的,提出了一种基于 LED 阵列光源的太阳模拟器。重点对 LED 阵列光源、菲涅尔透镜、光学积分器、准直物镜的设计过程进行了阐述。优选 15 种不同波段的 LED,利用多光谱拟合方法对 $400\sim 1\,100\text{ nm}$ 内的太阳光谱进行合成,并对合成光谱进行评价。为了使不同 LED 混光充分,对 LED 进行了二次开发,获得准直光束,并对 LED 光源的阵列方式进行了优化。另外,为了提高辐照度和辐照均匀性,利用菲涅尔透镜对阵列光源辐射通量进行会聚,借助光学积分器对辐射通量进行匀化处理,经准直物镜输出平行辐射,并采用 LightTools 软件对设计的光学系统进行仿真分析。最后搭建了基于 LED 阵列光源的太阳模拟器实验装置,测试结果表明:在 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的辐照光斑内最大辐照强度为 $1\,376.3\text{ W/m}^2$,辐照不均匀度为 $\pm 1.73\%$,辐照不稳定性为 $\pm 0.82\%$,拟合的太阳光谱匹配度达到标准太阳光谱 AM1.5 条件中的 A 级,综合性能达到 3A 级水平,对研制新型 LED 太阳模拟器,解决关键技术具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 苏拾,张国玉,付芸,等. 太阳模拟器的新发展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070003. SU SH, ZHANG G Y, FU Y, *et al.*. New development of solar simulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7):070003. (in Chinese)
- [2] 任建岳,苏克强,王兵,等. 真空应用太阳模拟灯及其灯阵的研制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1699-1706. REN J Y, SU K Q, WANG B, *et al.*. Development of vacuum application solar simulation Xe flash-lamp array[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,

18(8): 1699-1706. (in Chinese)

- [3] KOHRAKU S, KUROKAWA K. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator [C]. *Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, IEEE, 2003, 2: 1977-1980.
- [4] KREBS F C, SYLVESTER-HVID K O, JØRGENSEN M. A self-calibrating led-based solar test platform[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, 19(1): 97-112.
- [5] SWITZER G W, MCFARLAND T A, BUCZALA R K, *et al.*. LED-based solar simulator system and method of use: WIPO, WO/2015/048591[P].

- 2015-04-02.
- [6] 陈凤,袁银麟,郑小兵,等. LED 的光谱分布可调光源的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2060-2064.
CHEN F, YUAN Y L, ZHENG X B, *et al.*. Design of spectral tunable LED light source[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2060-2064. (in Chinese)
- [7] 刘洪兴,孙景旭,刘则洵,等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1447-1454.
LIU H X, SUN J X, LIU Z X, *et al.*. Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1447-1454. (in Chinese)
- [8] 刘洪波. 太阳模拟技术[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2): 177-181.
LIU H B. Solar simulation technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(2): 177-181. (in Chinese)
- [9] 国家技术监督局. GB/T 12637-1990 太阳模拟器通用规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
National Bureau of Technical Supervision. GB/T 12637-1990 general specification for solar simulator [S]. Beijing: Standards Press of China, 1990. (in Chinese)
- [10] 赵会富,刘华,孙强,等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1472-1479.
ZHAO H F, LIU H, SUN Q, *et al.*. Design of RIXR LED collimatine system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1472-1479. (in Chinese)
- [11] 杨茂华,田兆硕,尹田田,等. 高效大尺寸短焦距菲涅尔透镜设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(11): 98-101.
YANG M H, TIAN ZH SH, YIN T T, *et al.*. Design of Fresnel lens with high efficiency short focal length and large size[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(11): 98-101. (in Chinese)
- [12] 白红艳. 高倍聚光菲涅尔透镜设计及光学性能研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2014.
BAI H Y. *High Magnification Fresnel Lens Design and Optical Performance Research* [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2014. (in Chinese)
- [13] 安桂芳,张国玉,苏拾,等. 利用光学积分器提高太阳模拟器辐照均匀性的分析[J]. 长春理工大学学报, 2010, 33(1): 1-3.
AN G F, ZHANG G Y, SU SH, *et al.*. Analysis on improving the irradiation uniformity of the sun simulator by optical integrator [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2010, 33(1): 1-3. (in Chinese)
- [14] 向艳红,张容,黄本诚. KFTA 太阳模拟器辐照均匀性仿真[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 288-292.
XIANG Y H, ZHANG R, HUANG B CH. Irradiation uniformity simulation of KFTA solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(5): 288-292. (in Chinese)
- [15] 胡志威,彭润玲,秦汉,等. LightTools 软件在均匀光分布的照明系统设计中的应用[J]. 光学仪器, 2012, 34(4): 49-53.
HU ZH W, PENG R L, QIN H, *et al.*. The application of LightTools software in uniform light distribution of the lighting system design[J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(4): 49-53. (in Chinese)

作者简介:



苏 拾(1978—),男,吉林长春人,博士,副教授,硕士生导师,2012 年于长春理工大学获得博士学位,主要从事太阳模拟技术与 LED 应用技术等方面的研究。E-mail:sushi@cust.edu.cn



张国玉(1962—),男,吉林松原人,博士,研究员,博士生导师,2005 年于长春理工大学获得博士学位,主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究。E-mail:zh_guoyu@163.com