

LED 太阳模拟器光学系统设计与仿真

孙健刚¹ 李果华^{1,2} 朱孔硕¹ 赵洁心¹ 马晓光²(¹ 江南大学理学院, 江苏 无锡 214122; ² 南京浦光新能源有限公司, 江苏 南京 211899)

摘要 设计了一款以大功率 LED 作为光源的针对光伏性能测试的太阳模拟器光学系统。利用不同峰值波长的 LED 作为模拟器的光源并介绍了光谱匹配方法。根据 LED 发光特点, 选取同轴透射式准直光学系统, 系统由大功率 LED、准直系统、菲涅耳透镜、光学积分器、光阑等光学器件组成。准直系统采用全内反射自由曲面透镜, 光学积分器采用对称式透镜阵列结构。系统采用光学仿真软件 TracePro 进行模拟, 模拟结果表明: 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°。

关键词 光学设计; 太阳模拟器; 光谱匹配; TracePro; 不均匀度; 准直角

中图分类号 O432 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP50.102204

Design and Simulation of the Optical System of LED Solar Simulator

Sun Jiangang¹ Li Guohua^{1,2} Zhu Kongshuo¹ Zhao Jiexin¹ Ma Xiaoguang²

(¹ School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)
(² Nanjing Puguang New Energy Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211899, China)

Abstract An optical system of LED solar simulator for photovoltaic performance test is designed by using LED source. A method of employing LEDs with different peak wavelengths as light source to build a solar spectrum is introduced. By taking use of the characteristics of the LEDs, a concentric transmission collimating system is used, including high power LEDs, collimating system, Fresnel lens, optical integrator and aperture. The free-form surface collimating system with the total internal reflection of free-form surface lens and symmetrical lens array structure in optical integrator is adopted. The results demonstrated by optical simulation software of TracePro show that in the effective radiation circle area within 220 mm diameter, the non-uniformity is 3.8% and the collimation angle is 3.2°.

Key words optical design; solar simulator; spectrum matching; TracePro; non-uniformity; collimation angle

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 220.3620; 220.4830

1 引言

太阳模拟器是一种具有一定光谱分布、辐照强度、辐照均匀度以及辐照稳定度的光源设备, 在光伏行业中应用非常广泛。目前, 晶硅太阳能电池生产线上和实验室内采用的太阳模拟器都以氙灯作为光源, 氙灯虽然具有与太阳光谱相似的光谱, 但却存在功率大、产热高、寿命短等缺点。对此, 一些研究者注意到 LED 体积小、光衰小、环保、寿命长等优点^[1-4], 研究了以 LED 作为光源的太阳模拟器。Tsunno 等^[5] 研究了一款有效辐照面为 100 mm × 100 mm 的 LED 太阳模拟器, 其光源尺寸为 335 mm × 335 mm, 包含 2304 颗 LED。Kohraku 等^[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^[7-8] 则对利用不同峰值波长 LED 组合进行太阳光光谱匹配进行了相关研究。但上述研究都是以小功率的 LED 作为光源, 并且只对模拟器部分性能进行了研究。本文根据 LED 技术发

收稿日期: 2013-05-14; **收到修改稿日期:** 2013-06-18; **网络出版日期:** 2013-09-02

作者简介: 孙健刚(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事 LED 照明设计、光电器件与材料等方面的研究。

E-mail: jiangang890603@163.com

导师简介: 李果华(1955—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事无机和有机半导体光电器件(太阳电池和 LED)等方面的研究。E-mail: guohua_li55@yahoo.com

展趋势,针对光伏生产线上 156 mm×156 mm 规格的标准硅片,采用不同峰值波长的大功率 LED 作为模拟器的光源,主要由大功率高显色指数的白光 LED、峰值波长分别为 660 nm 和 730 nm 的红光 LED 以及峰值波长分别为 850 nm 和 940 nm 的远红外 LED 交叉排列组成阵列。综合上述对 LED 太阳模拟器的研究,以提高模拟器的辐照均匀度和准直度为目标,针对 AM1.5 标准辐照度和光谱匹配设计了一款光学系统。

2 LED 太阳模拟器工作原理

本设计实现的 LED 太阳模拟器采用同轴透射式准直光学系统,如图 1 所示,该系统主要由各种峰值波长的大功率 LED、自由曲面准直透镜、菲涅耳聚焦透镜、光学积分器、光阑和非涅耳准直透镜等组合而成。LED 太阳模拟器采用不同峰值波长的 LED 组合作为光源,LED 发出的朗伯光经自由曲面准直透镜后形成平行光束,经菲涅耳聚焦透镜会聚后,在光学积分器场镜通光口径内形成一个较为均匀的辐照分布,再经过光学积分器充分混光、均光后,形成均匀的辐射光束再通过准直透镜后以平行光射出,在测试面上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^[9]。

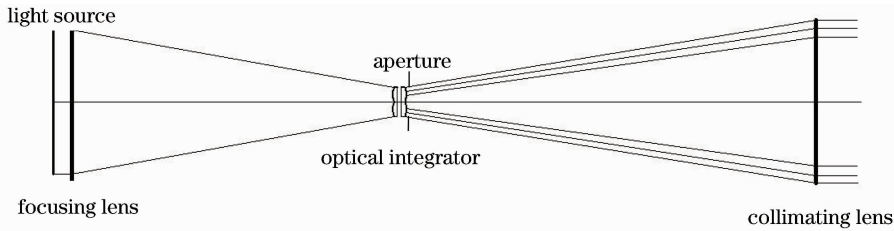


图 1 本设计采用的 LED 太阳模拟器光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system of LED solar simulator in this design

3 LED 太阳模拟器光学系统设计

3.1 面光源设计

3.1.1 光源准直设计

由于目前市场上的 LED 光源发散角较大(一般为 120°),光强呈余弦函数分布,能量较为分散,不能直接利用,因此需对 LED 进行二次光学设计以提高辐射准直度。根据文献[10]采用折射和全反射结构的全内反射(TIR)透镜对 LED 光源进行准直。设计时采用点光源进行理论计算,将光源的发散角从 120° 转变成 0° 的平行光,达到精确准直,但实际的光源是 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的面光源,因此在设计时必然要适当增加透镜的尺寸来减小面光源的相对尺寸,从而提高光源的准直性。但是,增大透镜尺寸必然会增加透镜材料对光的吸收和散射。综合考虑透镜尺寸和准直效果,选取折射部分和反射部分的分界角为 45° ,经下表面折射后的折射光线与光轴的夹角为对应入射光线与光轴夹角的一半。设计结果为自由曲面准直透镜中心厚度为 7.57 mm,口径为 21 mm,如图 2 所示。

根据设计建立模型,在 TracePro 光学软件中进行光线追迹仿真模拟,如图 3 所示。光源采用尺寸为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的朗伯型光源,透镜材料采用折射率为 1.49 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)树脂材料,通过 10^6 条光线追迹和对配光曲线的分析得到 LED 朗伯光源在经曲面折射后光线的准直性较好。图 4 是 LED 未加自由曲面透镜时的配光曲线,其发散角(半角)约为 70° ;当 LED 经组合自由曲面透镜后,配光曲线如图

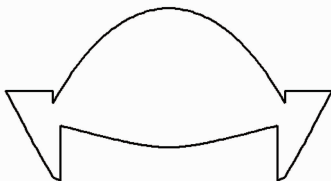


图 2 准直透镜的二维轮廓

Fig. 2 Two-dimensional layout of collimating lens

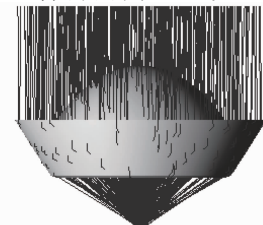


图 3 准直透镜光线追迹图

Fig. 3 Ray tracing of the collimating lens

5 所示,发散角(半角)减小到了 2.4° 。

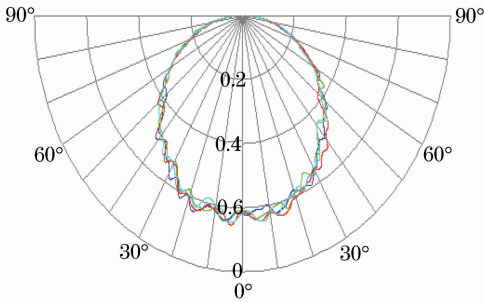


图4 准直前配光曲线

Fig. 4 Light distribution before collimating

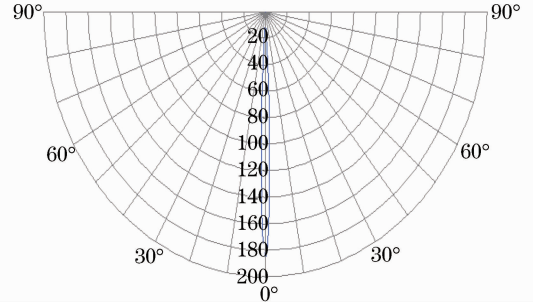


图5 准直后配光曲线

Fig. 5 Light distribution after collimating

设计准直性好的面光源是为了便于后续光学系统的设计,保证光线能够以小角度并集中地入射到光学积分器场镜通光口径内,提高光能的利用率。

3.1.2 光谱匹配方法

按照相关国家标准^[11],根据光伏生产线上测试用的太阳模拟器在测试平面上需达到 1000 W/m^2 的标准辐照度要求,可以得出:在直径为 240 mm 的圆形有效辐照面积上符合 AM1.5 标准太阳辐照分布的总辐照度为 45.22 W 。根据国家标准中标准光谱辐照度分布,可以算出有效辐照面上各个波段的辐照度,如表 1 所列。

表 1 有效辐照面内辐照度分布

Table 1 Irradiance distribution in the effective area

Wavelength range /nm	Percentage of total irradiation /%	Standard irradiation /mW
400~500	18.5	8365.70
500~600	20.1	9089.22
600~700	18.3	8275.26
700~800	14.8	6692.56
800~900	12.2	5516.84
900~1100	16.1	7280.42

根据表 1 中的数据,严格选取大功率高显色指数的白光 LED。采用白光的要求为:采用 460 nm 中心峰值波长的蓝光芯片作为激发光源,组合一定比例的不同颜色荧光粉^[12],在可见光波段产生连续的光谱,保证白光 LED 的出射光在 $400\sim 500 \text{ nm}$ 和 $500\sim 600 \text{ nm}$ 波段内的辐照度比值接近到 $18.5:20.1$ 的比例。对于辐照度不够的波段,分别采用大功率的峰值波长为 $660, 730, 850, 940 \text{ nm}$ 的单色 LED 进行补偿。

光谱的精确匹配采用以下方法实现:先采用积分球和光谱分析系统分别测试单颗 LED 在额定工作电流下的光辐射功率(表 2);然后根据各类透镜的材料属性和光学系统的结构模拟估算光学系统的光能损失,再对照表 1 中各波段的辐照度大致确定各类 LED 所需颗数;最后通过串联相同类型的 LED,调整相应驱动电流的大小,依次从短波长至长波长实现光谱的匹配。根据计算所得设计中共需 LED 86 颗。

表 2 各类 LED 在额定电流下的光辐射功率

Table 2 Radiation power of all kinds of LEDs at rated current

LED type	White LED	660 nm LED	730 nm LED	850 nm LED	940 nm LED
Optical radiation power /mW	5730	2720	880	720	670

3.2 聚焦透镜

聚焦透镜的目的是让 LED 发出的光会聚在光学积分器场镜的通光孔径内,并在场镜入口的截面处形成一个较均匀的辐照面。为使经准直透镜出射的光最大程度地会聚在光学积分器的通光口径内,会聚透镜的焦距应选得大一些。本设计中采用焦距为 700 mm 的非涅耳透镜。设计中采用非涅耳透镜进行会聚,其原因是若采用平凸透镜,在相同焦距和口径在 300 mm 条件下,平凸透镜的中心厚度将达到 37.5 mm ,而利用厚 3 mm 、纹距为 0.5 mm 的非涅耳透镜能够保证在相同的聚光效果下明显减小厚度,有效地降低由于材料引起的吸收和散射,减小光的损失。

3.3 光学积分器设计

光学积分器是由场镜组和投影镜组前后排列组成的具有均匀光辐射分布能力的光学器件,其场镜组和投影镜组由多个按中心对称排列的一一对应的且具有相同通光口径的元素透镜组成^[13],在本设计中的主要作用是将不同波长的光进行充分的混合并保证在有效辐照面上获得均匀的照明。光源发出的混合光经菲涅耳透镜会聚后,在光学积分器场镜组的通光口径内形成一个较为均匀的辐照分布,这个分布经场镜组元素透镜分割,成像到位于场镜元素透镜焦点处的投影镜元素透镜上,将这个辐照较均匀的辐照面分割形成 19 个光源像,这些像再经与场镜组元素透镜对应的投影镜组的元素透镜投影相互叠加到有效辐照面上,形成均匀的辐照^[14]。

设计中,采用对称式光学积分器,场镜和投影镜的口径相同,均由 19 块正六边形平凸透镜和 6 块与其结构相配的锯齿形状透镜,按照蜂窝结构排列构成,组成的光学积分器通光口径为 40.58 mm。元素透镜使用材料为 JGS1 石英玻璃、曲率半径 17.85 mm、厚度为 3 mm 的平凸正六边形透镜(正六边形的内接圆直径为 6 mm),再用光胶将透镜按排列胶在厚度为 6 mm、直径为 60 mm 的同种材料玻璃上。透镜的焦距公式为

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{(n-1)d}{nr_1r_2} \right], \quad (1)$$

式中 r_1, r_2 分别是透镜的左右曲率半径, d 是透镜的厚度。根据(1)式可以得到元素透镜的焦距为 39.23 mm。由于像差的存在和积分器的相对口径较小会引起边缘光线离散尺寸很大,需缩小场镜和投影镜的距离,减小离散尺寸,提高出射光的均匀度。

3.4 准直透镜设计

太阳模拟器是一种对辐照均匀度和辐照强度要求非常高的照明系统,本文采用同轴透射式准直系统,可以有效利用光源辐射能量和保证辐照的均匀度,但利用准直镜准直必然会引入像差。从文献[15-16]可知,像差对辐照均匀性的影响很小,可以忽略,并且针对太阳电池的光电转换等试验主要侧重于出射光的辐照强度、辐照均匀度和光谱分布的模拟,对辐射准直角的要求不是很严格,因此设计时只采用简单的菲涅耳透镜进行准直。采用菲涅耳透镜原因是 LED 太阳模拟器属于照明系统,对成像要求很低,对于可见光和红外线,菲涅耳透镜就相当于凸透镜,但厚度仅有 3 mm,减小了材料对光的吸收和散射,在同样的准直效果下提高了光能的利用率也降低了成本。

菲涅耳透镜的尺寸是根据有效辐照面的大小决定的。综合考虑光学系统的光路长度、准直效果和辐照面均匀度,按照有效辐照面直径为 220 mm 的要求,选取菲涅耳准直透镜的有效通光口径为 240 mm,以保证在有效辐照面内获得均匀的照明。菲涅耳透镜焦距选取方法为:依据光从光学积分器出射后的配光曲线图,根据国家标准对应的太阳模拟器不均匀度等级,计算出最小的辐照强度,选取对应的最大发散角,最后根据透镜的直径和发散角确定透镜的焦距。

设计中,光线经过积分器后,通过配光曲线图可知在全角为 12° 的范围内辐照强度能够达到国家 B 级不均匀度的标准,利用几何关系

$$f = \frac{R}{\tan(\theta/2)}, \quad (2)$$

式中 θ 为满足不均匀度的最大发散角,可求得菲涅耳透镜的焦距为 1142.8 mm。

4 软件仿真与结果

设计采用光学软件 TracePro 进行仿真模拟,该软件是一款用于照明系统、辐射度分析、光学分析和光度分析的光学模拟软件,能够对有效辐照面上的辐照均匀度和系统准直角进行较真实的模拟。

根据以上设计参数建立相应的模型。本设计设定的各类透镜的材料属性如表 3 所列。

设置参数建立模型并进行光线追迹,通过采用蒙特卡罗光线追迹方法追迹 1.02×10^7 条光线,并不断调整系统中各个透镜的位置参数,最终达到满足设计要求的仿真图,如图 6 所示。

表3 本设计各透镜材料属性

Table 3 Material properties of all lenses in this design

Lens	Reflectivity	Transmissivity	Absorptivity	Material
Free-form surface TIR lens	0.14	0.85	0.01	PMMA
Fresnel focusing lens	0.08	0.92	0.01	PMMA
Field lens	0.12	0.85	0.03	JGS1
Projective lens	0.12	0.85	0.03	JGS1
Fresnel collimating lens	0.08	0.92	0.01	PMMA

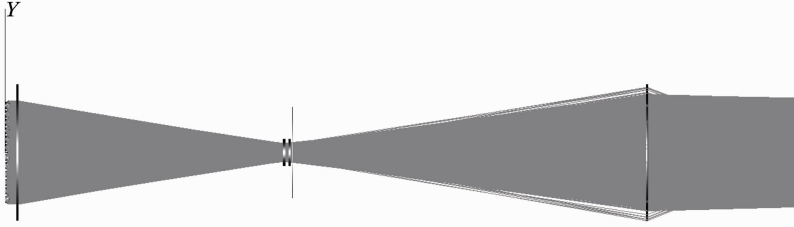


图6 LED太阳模拟器光线追迹仿真模型

Fig. 6 Ray tracing simulation model of LED solar simulator

在仿真模拟中,接收面积为直径 240 mm 的圆形区域,测试面距离菲涅耳准直透镜的距离为 400 mm,将测试面设定为完美吸收,通过对测试面进行辐照图的分析(图 7),选定直径为 220 mm 的有效辐照圆形区域。辐照不均匀度的计算公式为^[12]

$$\epsilon = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 E_{\max} 为有效辐照面内最大的辐照值, E_{\min} 为有效辐照面内最小辐照值。将直径为 220 mm 范围内的最大辐照值和最小辐照值代入(3)式,得到有效辐照面内的不均匀度为 3.8%。

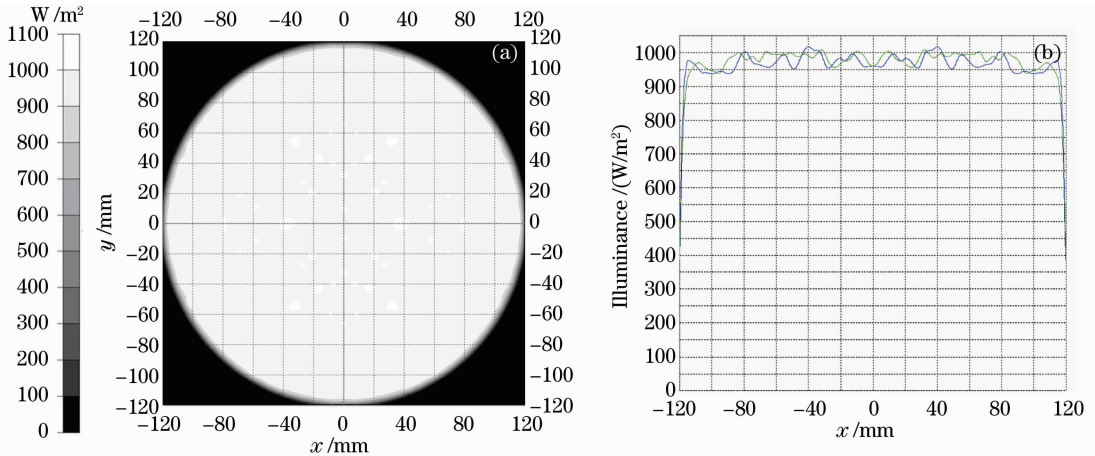


图7 有效辐照面内照明特性。(a)照度图;(b)照度轮廓图

Fig. 7 Illuminance performance in the effective area. (a) Illuminance distribution; (b) illuminance profile

对出射光准直角的分析采用矩形光强分布图。从图 8 中的光强分布曲线可知 LED 光源经过光学系统后,光束的发散角减小到了 3.2° 。

5 结 论

设计了一款利用大功率 LED 作为光源,采用同轴透射式准直光学系统的 LED 太阳模拟器,并通过蒙特卡洛光线追迹方法对系统进行了光学仿真模拟,结果显示在直径为 220 mm 的有效圆形辐照面上辐照不均匀度达到了 3.8%,准直角达到了 3.2° ,达到了国家 B 级标准,为以后的进一步研究奠定了基础。

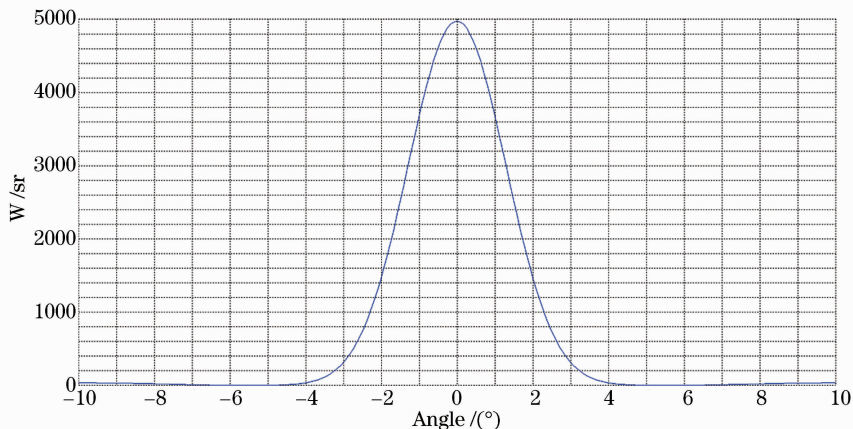


图 8 矩形光强分布图

Fig. 8 Rectangular light distribution

参 考 文 献

- 1 Su Zhouping, Xue Donglin, Ji Zhicheng. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm[J]. *Opt Express*, 2012, 20(s6): A843–A855.
- 2 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222002.
李 林,王光珍,王丽莉,等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222002.
- 3 Zhang Hang, Liang Xue, Yan Jinhua, *et al.*. Compound parabolic concentrator-simultaneous multiple surfaces design methods for LED collimators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922004.
张 航,梁 雪,严金华,等. LED 准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0922004.
- 4 Zhuo Jinzhai, Wang Min, Zhuang Zhenfeng. Design of efficient matched mirrors and arrays for small angle LED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 112202.
卓金寨,王 敏,庄振锋. 小角度 LED 高效配光镜组及阵列设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 112202.
- 5 Yiki Tsuno, Koichi Kamisako, Kosuke Kurokawa. New generation of PV module rating by LED solar simulator; a novel approach and its capabilities[C]. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2008.
- 6 Shogo Kohraku, Kosuke Kurokawa. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator[C]. *Photovoltaic Specialists Conference*, 2003, 2003, 2: 1977–1980.
- 7 Zhou Weihua, Zhou Hanchang. Study of LED solar simulator[J]. *Infrared*, 2009, 30(3): 46–48.
周卫华,周汉昌. LED 太阳模拟器的研究[J]. *红外*, 2009, 30(3): 46–48.
- 8 Gao Liang, Li Guohua, Meng Zhaoyuan. Design of LED solar simulator[C]. *The Tenth Session of the China Solar Photovoltaic Conference Proceedings*, 2008. 751–756.
高 亮,李果华,孟昭渊. LED 太阳模拟器的设计[C]. *第十届中国太阳能光伏会议论文集*, 2008. 751–756.
- 9 Li Gang, Zhou Yanping. Solar simulator and earth simulator for satellite simulation test design[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(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, 29(5): 283–287.
- 10 Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei, *et al.*. Optical system design of the compact collimator for LED source[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 022203.
苏宙平,阙立志,朱焯炜,等. 用于 LED 光源准直的紧凑型光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 022203.
- 11 State Bureau of Technical Supervision. GB/T6495. 9-2006, Photovoltaic Device, The Ninth Part: Solar Simulator Performance Requirements[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
国家技术监督局. GB/T6495. 9-2006 光伏器件, 第九部分: 太阳模拟器性能要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- 12 Cui Desheng, Guo Weiling, Cui Bifeng, *et al.*. Preparation and temperature-variation properties of high color rendering index LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0123005.
崔德胜,郭伟玲,崔碧峰,等. 高显色白光 LED 的制备及其变温特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0123005.
- 13 An Guifang, Zhang Guoyu, Su Shi, *et al.*. Analysis on improving the irradiation uniformity of the sun simulator by optical integrator[J]. *J Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(1): 1–3.
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(自然科学版)*, 2010, 33(1): 1–3.
- 14 Liu Chaobo, Zhang Guoyu. The optical design of the solar simulator[J]. *J Changchun University of Science and Technology*

(Natural Science Edition), 2010, 33(1): 14–17.

刘超博, 张国玉. 太阳模拟器光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(1): 14–17.

- 15 Zhang Guoyu, Lü Wenhua, He Xiaolei, *et al.*. Analysis on irradiation uniformity of sun simulator[J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2009, 2(1): 41–45.

张国玉, 吕文华, 贺晓雷, 等. 太阳模拟器辐照均匀性分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 41–45.

- 16 Wang Susu, Guo Yujiao. Design of accurate alignment of the solar simulator[J]. Space Control, 1984, (1): 64–68.

王素素, 郭玉蛟. 精确准直型太阳模拟器的设计[J]. 航天控制, 1984, (1): 64–68.