

LED 太阳模拟器光谱匹配度与辐照不均匀度的实现

朱孔硕¹ 孙健刚¹ 李果华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 利用峰值波长分别为 460、525、625、730、850、940 nm 的 6 种大功率 LED 研制了一款 LED 太阳模拟器。LED 太阳模拟器的光源在满足有效辐照面上 1 个太阳辐照强度的同时, 还达到光谱匹配的 A 级标准。在设计中, 辐照不均匀度指的是 6 种波长 LED 组合下的光源在有效辐照面上能量的不均匀性。为了降低 LED 太阳模拟器在有效辐照面上的辐照不均匀度, 在设计过程中结合 LED 发光角度大的光学特点, 针对性的采用能够实现多次聚光的光学系统, 通过对 LED 阵列光源的控制, 实现 160 mm×160 mm 有效辐照面积上辐照不均匀度的 A 级标准。根据国际标准, 该 LED 太阳模拟器达到 AAA 级太阳模拟器的标准。

关键词 光学器件; 太阳模拟器; 光谱匹配; Tracepro; 不均匀度

中图分类号 O432 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.122202

Realization of LED Solar Simulator Matching and Irradiance Unevenness

Zhu Kongshuo¹ Sun Jiangang¹ Li Guohua¹ Ma Xiaoguang²

¹School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

²Nanjing Puguang New Energy Co. Ltd, Nanjing, Jiangsu 211899, China

Abstract Six kinds of high power LED which have peak wave length of 460, 525, 625, 730, 850, 940 nm respectively. The light source of the LED solar simulator meets the intensity of 1 solar irradiation on the effective radiation surface, and also achieves the level of spectral matching. In this design, the irradiation nonuniformity index is six wavelength combination of LED light source in the effective irradiated surface inhomogeneity of energy. In order to reduce non-uniformity on the effective irradiated surface of the LED solar simulator, we combine design process with optical characteristics of LED light emitting angle, and pointedly realize multiple converging optical systems. Through the control of LED light source array, we have achieved 160 mm×160 mm A-level standard of non-uniformity on effective irradiation area. According to the international standard, the standard of the LED solar simulator reaches the level of the AAA level solar simulator standard.

Key words optical devices; solar simulator; spectrum matching; Tracepro; non-uniformity

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 220.4830

1 引言

太阳模拟器是太阳能光伏产业研究与生产必不可少的测试设备, 实验室内太阳电池的生产研究、生产流水线上电池片的筛选等均离不开太阳模拟器。目前, 实验室及生产线上的模拟器均采用氙灯作为光源, 但氙灯光源具有价格高、能耗高、寿命有限等缺点, 使得氙灯太阳模拟器的生产成本及维修费用都居高不下。

随着发光二极管(LED)技术的不断成熟, 大功率 LED 技术也获得了惊人的进展, 诸多研究者开始研究利用 LED 作为光源研制太阳模拟器。

2003 年, 日本的 S Kohraku 和 K Kurokawa 两位学者首次利用太阳电池的光谱响应的特性, 分别采用 4 种(蓝、红、红外、白)和 6 种不同颜色的草帽型小功率 LED 制作了一款 LED 太阳模拟器^[1]。但由于 LED 功率太小,

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-06-25; 网络出版日期: 2015-11-07

作者简介: 朱孔硕(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: 690938914@qq.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) 方面的研究。E-mail: guohuali@jiangnan.edu.cn(通信联系人)

模拟器总的辐照度很低,只有 10 W/m^2 ,辐照不均匀度为 3%。随后,2006年,上述的两位研究者又研制了一款光源面积为 $205 \text{ mm} \times 205 \text{ mm}$,有效面积为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的太阳模拟器,辐照强度达到了 100 W/m^2 ,辐照不均匀度为 5%^[2]。2008年,Y Tsuno 等^[3]利用由蓝光、红光、红外 LED 制作的太阳模拟器测试了硅电池的 $I-V$ 曲线。模拟器采用了 LED 总数为 2304 颗的光源阵列结构,总辐照度达到了 420 W/m^2 。他们利用该模拟器测试了面积为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的单晶硅电池的各项参数,测试结果与标准数据最大差距仅为 4.73%。2011年,D Kolberg 等^[4]研制出了一款稳态的 LED 太阳模拟器,光谱与 AM1.5 标准光谱相近似,该 LED 太阳模拟器的光谱从紫外光波段覆盖至红外光波段。但该研究者没有对其余的技术指标进行研究,研究工作还需继续往下进行。2012年,Anon Namin 等^[5]分别利用 4 种大功率单色 LED(红、绿、蓝、白)和多色 RGB-LED 5 种光源制作了 5 款 LED 太阳模拟器。通过对比太阳电池在 LED 太阳模拟器和 AAA 级太阳模拟器下测得的太阳电池各项电性能参数(开路电压、短路电流、最大功率点、填充因子等),得到蓝光和红光 LED 模拟下的光强能够达到 1000 W/m^2 。太阳电池的各項电性能数值与 AAA 级太阳模拟器下测得参数值非常接近,在蓝光 LED 模拟器下最大功率点的偏差为 -4.1%,红光 LED 模拟器下最大功率点的偏差为 -2.4%^[5]。但该研究者研究的 LED 太阳模拟器只考虑到辐照不均匀度和辐照不稳定性,没有考虑光谱匹配的问题。2013年 7 月,位于莱比锡的新创企业 WAVELABS Solar Metrology Systems Gmb 与 HANWHA Q CELLS 签订了 SINUS-220 太阳模拟器供货合同。这是世界上首款商业化全部采用全固态固体光源 LED 制作的太阳模拟器。

本文基于国外研究者对 LED 太阳模拟器的研究,设计了一款利用 6 种不同峰值波长的大功率 LED 作为光源的 LED 太阳模拟器。研究的主要内容是太阳模拟器的光谱匹配与辐照不均匀度。

2 太阳模拟器标准

根据 IEC60904-9-2007^[6]对太阳模拟器的性能要求,太阳模拟器等级按照光谱匹配、辐照不均匀性、辐照稳定性 3 项指标中的最低水平可划分为 A、B、C 3 个等级。

在 IEC60904-9-2007 中,光谱匹配的定义为波段的光谱内占全光谱实际百分比与标准百分比之比。辐照不均匀度(η)的定义为:

$$\eta = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (1)$$

其中 E_{\max} , E_{\min} 分别是有效辐照面积内的最大辐照值和最小辐照值。

辐照不稳定性(η_T)的定义为:

$$\eta_T = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中 E_{\max} , E_{\min} 分别指的是数据采集时间段内在测试平面内任意指定测量点的最大辐照值和最小辐照值。

通常,模拟器标准中将太阳模拟器的等级分类按“XYZ”三位定义,其中 X 定义了光谱匹配, Y 定义了太阳模拟器有效辐照面上辐照强度的不均匀性, Z 定义了太阳模拟器有效辐照面上辐照强度的不稳定性。

3 LED 太阳模拟器光谱匹配的实现

3.1 LED 波长选择

在 LED 波长的选择上,根据国际标准对光谱辐照度波长的划分,LED 太阳模拟器的光源选取峰值波长分别为 460、525、625、730、850、940 nm 的 6 种大功率 LED,6 种峰值波长的 LED 均分布在规定的波长范围内。利用单独控制的方法实现各个波段光谱辐照度的匹配,是 LED 太阳模拟器相对于传统单光源太阳模拟器的一个绝对优势^[7]。

LED 光源选用单色光主要是因为 LED 白光光源有以下问题:

- 1) 目前蓝光的效率还不高,致使白光 LED 的光效低;
- 2) 荧光粉与封装材料随时间老化,会导致色温漂移和寿命缩短;
- 3) LED 芯片的温度对荧光粉的辐射特性影响很大,随着温度的升高,荧光粉的量子效率将降低,出射光会减少,辐射波长也会发生改变;
- 4) 现有的荧光粉调配技术还不够成熟,不能完全保证各色荧光粉充分混合,使得每颗白光 LED 发光光

谱存在一定的差异,这就使得辐照面上的光谱分布受到灯珠本身光谱的影响^[8]。

3.2 LED 结构选择

目前,市场上对于LED的加工已非常成熟,芯片的质量也越来越高,封装透镜的种类也趋于多样化。根据市场调研,LED太阳模拟器的光源采用深圳春达鑫光电有限公司的5W、四芯片组合、60°发光角模顶结构的灯珠,四芯片灯珠空间光强分布如图1所示。

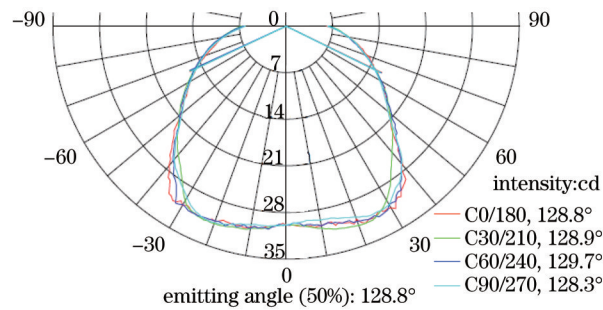


图1 四芯片灯珠空间光强分布

Fig.1 Space irradiation intensity distribution of four-chip LED

3.3 光谱匹配的的实现

LED太阳模拟器通过采用LED阵列光源实现有效辐照面上国际标准规定的各项技术指标。通过调整6类不同峰值波长的LED在各自有效辐照面上的辐照强度,可以实现LED太阳模拟器的光谱匹配。图2所示为LED太阳模拟器在有效辐照面上实现1个太阳辐照强度的要求时的光谱分布情况。

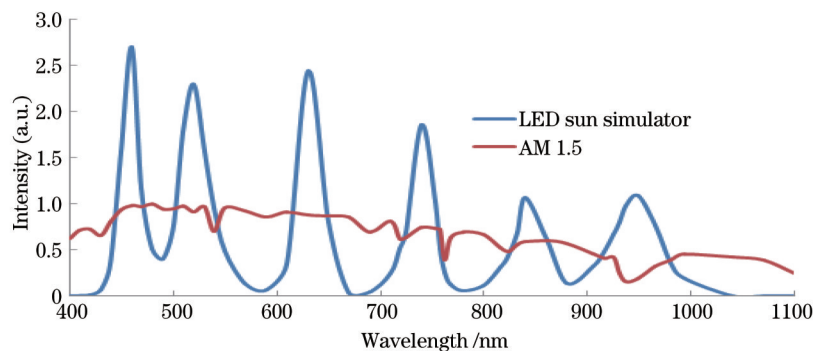


图2 LED太阳模拟器的光谱分布

Fig.2 Spectral distribution of LED solar simulator

通过光纤光谱仪测试,LED太阳模拟器的光谱分布在6个波长范围内的比例如表1所示。各个波段的光谱辐照度百分比与标准规定值非常接近,LED太阳模拟器的光谱匹配达到标准规定的A级标准。

表1 AM1.5及AM1.0条件下光谱辐照度分布

Table 1 Spectral match of LED solar simulator at AM1.5 and AM1.0

	Wavelength range /nm	Irradiation under AM1.5/%	Irradiation of the simulator /%	Spectral match	Class
1	400~500	18.4	18.5	1.08	A
2	500~600	19.9	20.1	1.07	A
3	600~700	18.4	18.3	0.92	A
4	700~800	14.9	14.8	0.94	A
5	800~900	12.5	12.2	0.99	A
6	900~1100	15.9	16.1	0.95	A

4 LED太阳模拟器辐照均匀性的实现

太阳模拟器是一种高光强输出设备,但单颗LED的光强有限,因此,LED太阳模拟器采用LED阵列光源实现强度指标。LED太阳模拟器光学由LED灯珠、聚光透镜、绒面玻璃和反射腔组成。由于LED之间的光电参数(开启电压、光强等)存在一定的差异^[9],因此,在LED太阳模拟器阵列光源的驱动控制上采用单独

控制的方法,以减小因LED差异导致有效辐照面上的辐照不均,从而增加阵列光源控制的灵活性。

LED太阳模拟器的工作原理为:将6种LED光源排列成阵列,组合聚光透镜形成阵列光源,阵列光源经过绒面玻璃混光,再经过高反射率反射腔进行聚光和二次混光,形成辐射均匀的光照射在有效辐照面上,实现有效辐照面上的均匀辐射。根据Tracepro软件的仿真模拟,LED太阳模拟器的阵列光源尺寸为280 mm×280 mm,反射腔长度为380 mm,有效辐照面到反射腔出光口的距离为50 mm,结构示意图如图3所示。

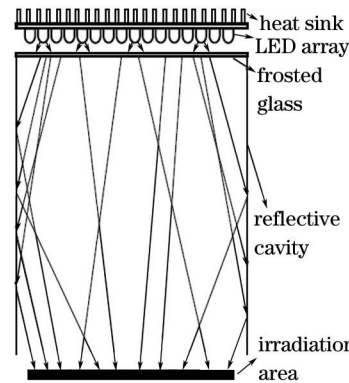


图3 LED太阳模拟器光学系统结构

Fig.3 Optical system structure of LED solar simulator

通过构建光学系统各部件的三维模型,结合材料属性及LED配光曲线,并在光学软件Tracepro中进行属性设置^[10],可以对6类LED阵列在有效辐照面上的辐照不均匀度进行仿真模拟。以红光为例,其在辐照面上的辐照度分布如图4所示。峰值波长分别为460、525、625、730、850、940 nm的6类LED灯珠在有效辐照面上的辐照不均匀度分别达到了1.52%、1.73%、1.20%、2.01%、2.45%和2.91%。

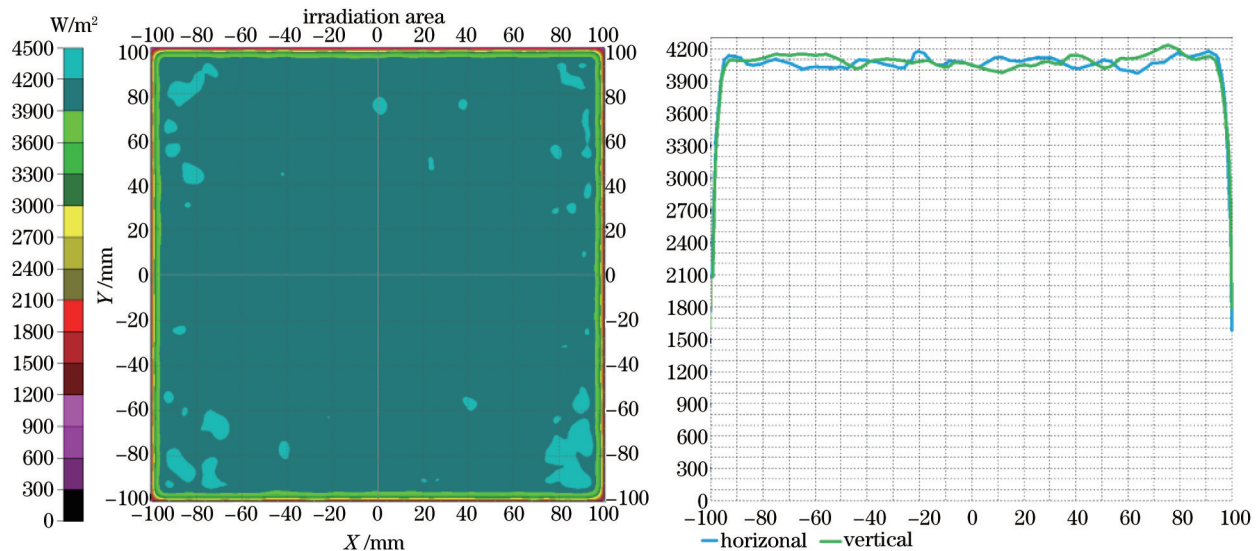


图4 红光LED在辐照面上辐照度分布

Fig.4 Irradiation distribution of red LEDs on irradiation area

通过软件的仿真分析指导实验设计,最终完成了LED太阳模拟器的组装调试。在有效辐照面上,将160 mm×160 mm的有效辐照面划分成100个区域,利用晶硅太阳能电池作为探测器,测试有效辐照面上的不均匀度。图5为辐照面上的照度分布情况。

根据辐照不均匀度计算公式,选取测试得到的最大辐照值和最小辐照值,蓝光LED、绿光LED、红光LED、730 nmLED、850 nmLED、940 nmLED在辐照面上的辐照不均匀度分别达到了1.89%、2.07%、1.03%、1.86%、2.12%和2.42%。LED太阳模拟器在有效辐照面上的辐照不均匀度达到了1.17%。

图6是作者研发的型号为PG-SS&TS-LED160×160 LED的AAA级太阳模拟器和太阳电池伏安特性测试系统。AAA级证书是由中国计量科学研究院授权。太阳电池的测试数据均经国家光伏质量检测中心(CPVT)检验。

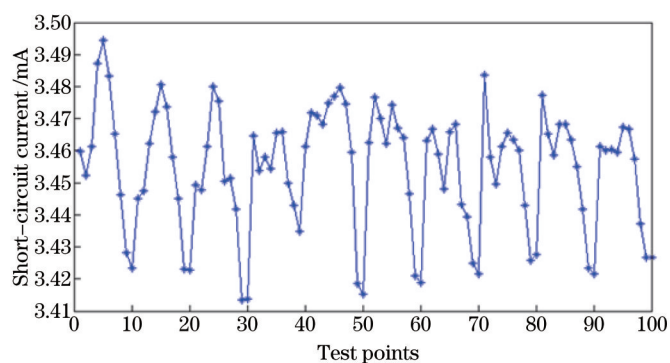


图5 辐照面上照度分布情况

Fig.5 Irradiation distribution on irradiated area



图6 AAA级LED太阳模拟器

Fig.6 AAA-class LED solar simulator

5 结 论

通过使用峰值波长分别为 460、525、625、730、850、940 nm 的 6 种大功率 LED 组成阵列光源, 实现了 LED 太阳模拟器的光谱匹配。采用能够实现多次聚光的光学系统, 通过对 LED 阵列光源的控制, 实现了 160 mm×160 mm 有效辐照面积上辐照不均匀度的 A 级标准。数据显示本设计实现的 LED 太阳模拟器的光谱匹配度达到了 0.92~1.08, 优于国际标准中 A 级要求的 0.75~1.25 范围。在 160 mm×160 mm 的有效辐照面上辐照不均匀度达到了 1.17%, 优于国际 A 级标准的 2.0%。

参 考 文 献

- 1 Kohraku S, Kurokawa K. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator[C]. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May11-18, 2003, 2: 1977-1980.
- 2 Kohraku S, Kurokawa K. A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2006, 90(18-19): 3364-3370.
- 3 Tsuno Y, Kamisako K, Kurokawa K. New generation of PV module rating by LED solar simulator—a novel approach and its capacities[C]. IEEE Photovoltaic Specialists Confereme, 2008: 1-5.
- 4 Kolberg D, Schubert F, Lontke N, *et al.*. Development of tunable close match LED solar simulator with extended spectral range to UV and IR[J]. Energy Procedia, 2011, 8: 100-105.
- 5 Namin Anon, Jivacate, Chaya, Chenvidhya Ohiragut, *et al.*. Determination of solar cell electrical parameters and resistances using color and white LED-based solar simulators with high amplitude pulse input voltages[J]. Renewable Energy, 2013, 54: 131-137.
- 6 International Electrical Commission. IEC60904-9-2007. Photovoltaic devices—part 9: solar simulator performance requirement[S].
- 7 Shen Xiaoxia, Cai Lüzhong, Dong Guoyan, *et al.*. Impact of structure design of photonic crystals on LED light extraction efficiency[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(s1): s106006.
沈晓霞, 蔡履中, 董国艳, 等. 光子晶体 LED 结构优化设计对光提取效率的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s106006.
- 8 Ye Zhao, Wang Chao, Cao Qipeng, *et al.*. Study of illumination uniformity of LED arrays for radiation calibration[J]. Chinese

J Lasers, 2014, 41(s1): s116007.

叶 钊, 王 超, 曹启鹏, 等. LED阵列用作定标光源的照明均匀性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(s1): s116007.

9 Yin Luqiao, Weng Fei, Song Peng, *et al.*. Thermal interact effects of LED chip with YAG phosphor layer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0323002.

殷录桥, 翁 菲, 宋 朋, 等. LED芯片与YAG荧光粉的相互热作用[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0323002.

10 Cheng Zhiming, Zeng Ping, Zhang Zhihai, *et al.*. Rsearch on multi-direction collimation beam on the plane parallel with LED lighting plane [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1008001.

程治明, 曾 平, 张志海, 等. 与LED发光面平行平面上多向准直光束的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1008001.

栏目编辑: 韩 峰