

基于发光二极管的太阳模拟器的研究现状

苏拾^{1,2}, 张国玉^{1,2}, 王凌云^{1,2}, 王逸文¹, 王基强¹, 王立辉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 太阳模拟器作为一种重要的试验设备,广泛应用于空间技术、航空航天及太阳能产业等领域。在太阳模拟器的发展中,光源发光二极管(LED)的加入对其性能的增强起到了重要作用。介绍了太阳模拟器发展的背景,论述了LED作为其光源的优点和价值。列举了针对太阳模拟器性能评测的各项标准,逐个介绍并进行对比。叙述了国内外具有代表性的LED太阳模拟器结构、控制及光学设计,从光谱匹配度、辐照不均匀度、辐照不稳定性等方面进行分析比较。总结了LED太阳模拟器的研发重点和发展趋势。

关键词 光学器件; 太阳模拟器; 发光二极管; 光学结构; 研究现状; 技术标准

中图分类号 TK515 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070003

Solar Simulators Based on Light Emitting Diodes

Su Shi^{1,2}, Zhang Guoyu^{1,2}, Wang Lingyun^{1,2}, Wang Yiwen¹, Wang Jiqiang¹, Wang Lihui¹

¹ School of Photoelectrical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China;

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

Abstract As important experimental devices, solar simulators are widely used in the fields of space technology, aerospace and solar energy industry. During the development of solar simulator, the joining of light emitting diode (LED) has an important impact on the property enhancement of solar simulator. Firstly, the development background of solar simulator is briefly introduced, and the advantages and value of light source LED are expounded. Then, the standards of performance evaluation for solar simulator are enumerated and every standard is introduced and compared with each other. Structure, control and optical design of representative LED solar simulator at home and abroad are narrated. Comparisons of spectral matching degree, irradiation inhomogeneity and irradiation instability are made. Finally, priority research and development tendency of LED solar simulator are summarized.

Key words optical devices; solar simulator; light emitting diode (LED); optical structure; research status; technical standard

OCIS codes 120.4570; 120.3688; 220.2945

1 引言

太阳模拟器是一种人工模拟太阳辐射特征的测试设备,在空间飞行器环境模拟试验、气象科学研究、太阳能电池特性测试、材料老化试验、农林培育、

医疗保健等领域具有广泛应用^[1-4]。以前,研究人员常将氙灯、卤钨灯等气体灯作为太阳模拟器光源,这些灯存在发光效率低、稳定性差、释放有毒气体等缺点,严重制约了太阳模拟器的性能。

随着发光二极管(LED)的出现,传统照明技术

收稿日期: 2017-09-04; 收到修改稿日期: 2018-06-02

基金项目: 吉林省科技发展计划(20150204048G)、吉林省省级产业创新专项资金项目(2016C084)、吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目

作者简介: 苏拾(1978—),男,博士,副教授,主要从事太阳模拟技术与LED应用技术方面的研究。

E-mail: sushi@cust.edu.cn

开始向固体照明技术飞速发展,LED 以其节能高效、绿色环保、结构简单、价格低廉等优势已被广泛应用于各种照明系统中^[5-7]。LED 种类繁多,可选性丰富,涵盖了紫外到红外不同波段,并具有可控性好的特点,可利用不同波段的 LED 对某一目标光谱曲线进行拟合。

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,并已逐渐成为众多科研单位或生产企业竞相研究的热点。

2 太阳模拟器技术标准

对于太阳模拟器的性能评测,全世界范围内先后出现了许多标准。针对模拟器的不同作用以及各地的现状,标准也会稍有不同,但均以国际电工委员会(IEC)发布的评测标准为主要基础。

2007 年,IEC 修改了之前的太阳模拟器性能评测方法,选择光谱匹配度、辐照不均匀度和辐照不稳定性这 3 项参数,以 IEC 60904-9(Edition 2.0 2007-10)为标准对应用于光伏组件测试的太阳模拟器性能进行了等级划分,新标准将太阳模拟器划分为 3 个等级:A、B、C 级(如表 1 所示)。对于光谱匹配度的评测,主要是根据规定的标准太阳光谱分布,采用分段能量占比的方法对合成光谱与太阳光谱的匹配程度进行分级^[8]。表 2 为 IEC 标准规定的最佳光谱匹配度。

表 1 太阳模拟器标准

Table 1 Solar simulator standards

Grade	Spectral matching degree	Irradiation heterogeneity / %	Irradiation instability / %
A	0.75-1.25	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 2$
B	0.60-1.40	$\leq \pm 5$	$\leq \pm 5$
C	0.40-2.00	$\leq \pm 10$	$\leq \pm 10$

表 2 IEC 标准规定的最佳光谱匹配度

Table 2 Best spectral matching degree according to IEC standard

Spectral range /nm	Total irradiance range /%	Best spectral matching degree /%
400-500	13.9-23.1	18.5
500-600	15.1-25.1	20.1
600-700	13.7-22.9	18.3
700-800	11.1-18.5	14.8
800-900	9.2-15.3	12.2
900-1000	12.1-20.1	16.1

各地方发布的太阳模拟器的评测方法都是以 IEC 发布的标准为蓝本,即通过对辐照强度、辐照不均匀度、辐照不稳定性这 3 项参数的评测来确定太阳模拟器的性能等级。光谱匹配度评测方法也与 IEC 60904-9 相同。

2009 年,日本发布了 JIS C 8942—2009 工业标准,该标准的主要评测对象是多结太阳能电池和模块用太阳模拟器^[9],其最佳光谱辐照度分布如表 3 所示,等级划分如表 4 所示。

表 3 JIS 标准规定的最佳光谱匹配度

Table 3 Best spectral matching degree according to JIS standard

Spectral range /nm	Total irradiance range /%
400-500	18.4
500-600	19.9
600-700	18.4
700-800	14.9
800-900	12.5
900-1000	15.9

表 4 JIS 标准规定的太阳模拟器的等级

Table 4 Grade of solar simulator according to JIS standard

Grade	Spectral matching degree	Irradiation heterogeneity / %	Irradiation instability / %
MS	0.95-1.05	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 1$
MA	0.75-1.25	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 1$
B	0.60-1.40	$\leq \pm 3$	$\leq \pm 3$
C	0.40-2.00	$\leq \pm 10$	$\leq \pm 10$

2015 年,美国发布了 ANSI/ASTM E927-10 (2015)地面光伏测试用太阳模拟器规范^[10],规定的最佳光谱辐照度分布与 JIS C 8942—2009 规定的相同。太阳模拟器分级如表 5 所示。

表 5 ASTM 标准规定的太阳模拟器标准

Table 5 Solar simulator standards according to ASTM standard

Grade	Spectral matching degree	Irradiation heterogeneity / %	Irradiation instability / %
A	0.75-1.25	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 2$
B	0.60-1.40	$\leq \pm 5$	$\leq \pm 5$
C	0.40-2.00	$\leq \pm 10$	$\leq \pm 10$

由于国内光伏市场的相对缺失,故而无法参与国际上关于光伏产业规则及标准的制定。就太阳模拟器标准来说,现行的国家标准 GB/T 6495.9—2006《光伏器件 第 9 部分:太阳模拟器性能要求》等

效采用了 IEC 60904-9—2007 标准^[11], 其分级与 IEC 标准相同。表 6 与表 7 为不同标准的对比。

表 6 不同标准下太阳模拟器的等级划分

Table 6 Grade classification of solar simulators with different standards

Standard	Spectral matching degree/Irradiation heterogeneity/Irradiation instability			
	MS	A	B	C
IEC 60904-9—2007	—	0.75-1.25/ $\leq 2\%$ / $\leq 0.5\%$ (STI) $\leq 2\%$ (LTI)	0.6-1.4/ $\leq 5\%$ / $\leq 2\%$ (STI) $\leq 5\%$ (LTI)	0.4-2.0/ $\leq 10\%$ / $\leq 10\%$ (STI) $\leq 10\%$ (LTI)
JIS C 8942—2009	0.95-1.05/ $\leq 2\%$ / $\leq 1\%$	0.75-1.25/ $\leq 2\%$ / $\leq 1\%$	0.6-1.4/ $\leq 3\%$ / $\leq 3\%$	0.4-2.0/ $\leq 10\%$ / $\leq 10\%$
ANSI/ASTM E927-10	—	0.75-1.25/ $\leq 2\%$ / $\leq 2\%$	0.6-1.4/ $\leq 5\%$ / $\leq 5\%$ (LTI)	0.4-2.0/ $\leq 10\%$ / $\leq 10\%$
GB/T 6495.9—2006	—	0.75-1.25/ $\leq 2\%$ / $\leq 2\%$	0.6-1.4/ $\leq 5\%$ / $\leq 5\%$ (LTI)	0.4-2.0/ $\leq 10\%$ / $\leq 10\%$

Note: STI represents short term instability; LTI represents long term instability.

表 7 不同标准下太阳模拟器的光谱辐照度分布

Table 7 Spectral irradiance distribution of solar simulators with different standards

Standard	Standard spectral irradiance distribution (AM1.5)					
	0.4-0.5 μm	0.5-0.6 μm	0.6-0.7 μm	0.7-0.8 μm	0.8-0.9 μm	0.9-1.1 μm
IEC 60904-9—2007	18.5	20.1	18.3	14.8	12.2	16.1
JIS C 8942—2009	18.4	19.9	18.4	14.9	12.5	15.9
ANSI/ASTM E927-10	18.4	19.9	18.4	14.9	12.5	15.9
GB/T 6495.9—2006	18.5	20.1	18.3	14.8	12.2	16.1

对比各标准可以看出:国内太阳模拟器的标准完全参照 IEC 60904-9—2007 标准;美国和日本制定的标准在最佳光谱辐照度分布上与 IEC 60904-9—2007 标准存在微小的差异;在太阳模拟器的级别方面, JIS C 8942—2009 标准增加了 MS 作为最高等级, 并且 B 级指标中的不稳定性和不均匀度与其他标准也有所差别。

3 国内外研究现状

近年来,国内外对于 LED 太阳模拟器进行了很多研究,提出了许多不同的光谱匹配算法和设计结构。

3.1 国外研究现状

国外多采取不同波长 LED 阵列排布的方式来满足光源需求。日本东京农业科技大学在 2003 年就提出了基于 4 种颜色的 LED 太阳模拟器的设计,并研制出了世界上第一台 LED 太阳模拟器 MK-1 (如图 1 所示)。在太阳能电池测量中,入射光需要尽可能平坦地照射整个物体,使用 4 个或 6 个不同波长的芯片型 LED,颜色为蓝色、红色、红外、白色等,采取矩形或六边形排布法,矩形排布法中相同颜色 LED 之间的距离为 8 mm(六边形排布法中相同 LED 的距离为 12 mm),每个 LED 之间的距离为 4 mm。以此组成一个 LED 阵列提供强光源,有效辐照面积可达 100 mm \times 100 mm,最小不均匀性接近

2%。其主要作用是测试单晶硅电池的 I - V (电流-电压)特性^[12]。在以氙灯为主光源的太阳模拟器的现状下,基于 LED 的太阳模拟器显现出了巨大潜力。

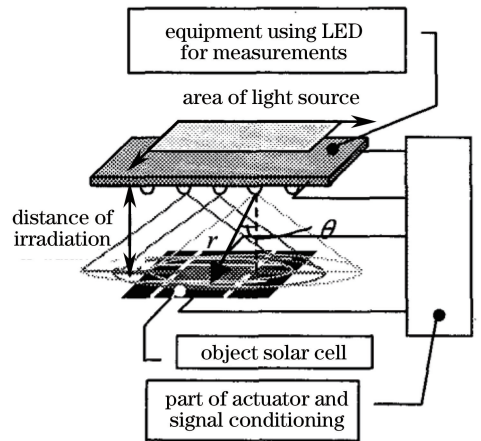


图 1 日本研制的第一台 LED 太阳模拟器的结构

Fig. 1 Structure of the first LED solar simulator developed by Japan

2006 年,东京农业科技大学研制出了 MK-2 型 LED 太阳模拟器(如图 2 所示),该太阳模拟器选择了中心波长为 470, 644, 950, 470(570) nm 且发散角在 30°~35°的 4 种螺帽型 LED,光源结构采用矩形网格分布,以 4 个灯为一组,49 组(196 个)LED 为一个模块,4 个模块共计 784 个 LED。其中,每两个 LED 的距离为 7.62 mm,相同颜色的 LED 之间

相距 15.24 mm。最终的辐照面积可达 $205\text{ mm} \times 205\text{ mm}$ 。光源与辐照面相距 84 mm,并能通过垫片调整辐照距离。通过改变电流的大小可以控制各个 LED 的光强。此模拟器的辐照不均匀度为 5%^[13]。2008 年,东京农业科技大学推出了 MK-3 型 LED 太阳模拟器(如图 3 所示),共使用了 2304 个高亮 LED,以 4 个 LED 组成一组,共计 576 组,每组中包括 1 个中心波长为 473 nm 的蓝色 LED、1 个中心波长为 643 nm 的红色 LED 以及 2 个中心波长为 845 nm 的红外 LED。2304 个高亮 LED 的面积可达 $335\text{ mm} \times 335\text{ mm}$,辐照不均匀度为 2%,辐照强度为 $0.42S_0$ (S_0 为 1 个太阳常数, $S_0 = 1350\text{ W/m}^2$)^[14]。

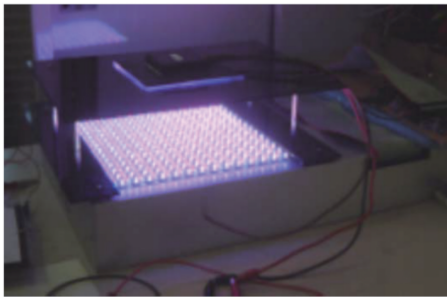


图 2 MK-2 型离散波长 LED 太阳模拟器

Fig. 2 MK-2 discrete-wavelength LED solar simulator

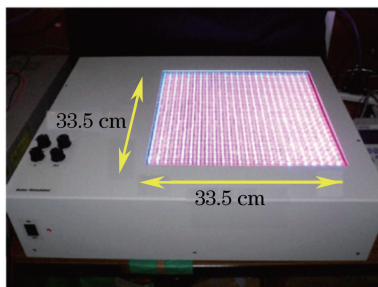


图 3 MK-3 LED 太阳模拟器

Fig. 3 MK-3 LED solar simulator

2010 年,丹麦科技大学可持续能源国家实验室研制出第三代 ProMoSimevo LED 光伏模拟器,用于测试太阳能电池。模拟器以大型表面多色 LED 阵列作为光源,在 $47\text{ mm} \times 17\text{ mm}$ 的平面上放置了 26 段,包括 18 个波长为 390~940 nm 的 182 个单独的 LED 芯片,每段由 7 个串联连接的 LED 组成,发射波长相同。从 LED 阵列到太阳能电池基板的距离固定为 55 mm,可以提供短脉冲闪烁和持续光照,并且可以实现对发光强度的 2^{14} 位的精确控制。该设备还配备有参考二极管和光纤耦合器,可以校准、监测和控制模拟的太阳光。模拟器结构如图 4

所示(1 为基座,2 为支架,3 为反光罩)。基座中间装有一个大小为 $25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 、厚度为 0.7~1.0 mm 的基板,主要对太阳能电池进行定位。支架上部与反光罩相连,反光罩中放置 LED 阵列和冷却风扇,整个上部通过 4 根垂直杆进行上下移动。在实际测量中,整个系统处于关闭状态,即支架与基座接触。系统使用 24 个可编程的电流源独立控制 24 个单独的波长,通过配置 14 位数模转换器来控制 LED 阵列中每段的电流。实验测得该模拟器的辐照不稳定性优于 0.5%,光谱匹配度优于 $\pm 10\%$,辐照不均匀性优于 0.4%^[15]。

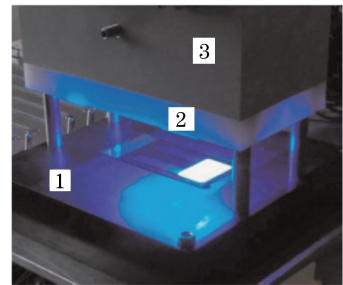


图 4 丹麦研制的 LED 太阳模拟器

Fig. 4 LED solar simulator developed by Demark

2011 年 4 月,Kolberg 等^[16]开发了一种以光谱可调 LED 为基础的太阳模拟器。该模拟器光源采用波长为 350~1100 nm 的芯片型 LED(约 800 个),组成约 70 个封装,将其放入一个大的反射镜通道中,如图 5(a)所示。将线性电流调节器作为电流源,以控制流经 LED 的电流和经过水冷装置的电流与输入电压成比例。电流调节器内部采用表面贴装设备(SMD)技术,包括 6 个定制式驱动电路,如图 5(b)所示,最终的应用程序包含 40 个驱动程序(用来控制 LED 的亮度)和 1 个多路数模转换器(用来控制电压)。为满足 AM1.5G 规范的要求,对每个 LED 的正向电流进行优化,使其达到最合适的发光强度。另外,经过实验得出了此太阳模拟器的光强度稳定性为 $\pm 0.3\%$ 。随着时间的推移,辐照强度略有减小,为了控制这种误差,拟同时采用珀耳帖元件和水冷散热器对太阳模拟器进行主动温度控制。模拟结果显示,此设计不仅可以实现 AM1.5G 的光谱匹配,还能够实现对几乎任何光谱分布的模拟,使用有效的冷却技术后可实现一个完整强度的全谱照明^[16]。

2013 年,Namin 等^[17]提出了一种测定太阳能电池电学参数的设计,主要通过高振幅脉冲输入电压下的 LED 太阳模拟器来完成。其光源模块以 5

个面积为 $275\text{ mm} \times 275\text{ mm}$ 的 LED 阵列为主,其中 4 个单色阵列均由 1024 个 LED 组成,以 64×16 的方式排列,每行加 1 个限流电阻器。另外 1 个红绿蓝多色混合阵列也包含 1024 个 LED,以 128×8

的形式排布,其中红、绿、蓝三色的辐照度占总辐照度的比例分别为 35%、33% 和 32%,如图 6 所示。5 个模拟器辐照非均匀性和辐照不稳定性都达到了 B 级标准^[17]。

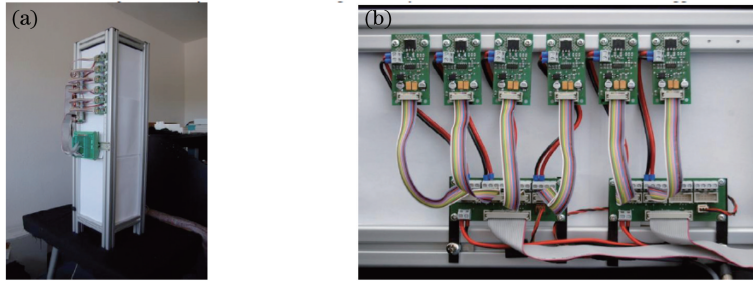


图 5 (a) Kolberg 等研发的 LED 太阳能模拟器原型版本^[16]; (b) 6 个定制式驱动电路^[16]

Fig. 5 (a) Prototype version of LED solar simulator developed by Kolberg *et al.*^[16]; (b) six customized drive circuits^[16]

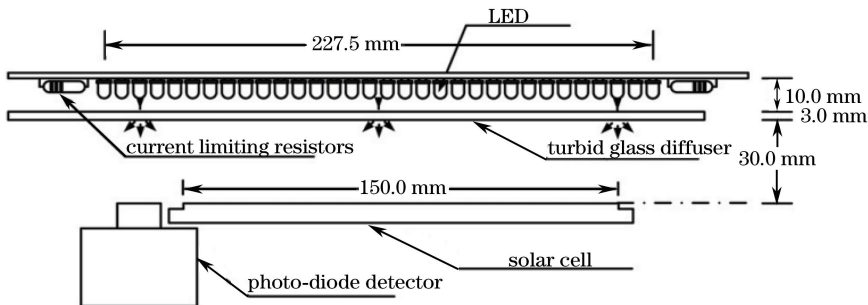


图 6 Namin 等提出的 LED 太阳模拟器结构图^[17]

Fig. 6 Structure of LED solar simulator proposed by Namin *et al.*^[17]

2014 年, Kurt 等^[18] 开发了一种可调光谱 LED 太阳模拟器,如图 7 所示。此模拟器利用了模块化设计,每个模块由 4 块 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的导热印刷电路板(PCB)组成,每块 PCB 板包含 100 个 LED 芯片,以 10×10 的方式组成 LED 阵列,相邻 LED 间隔 5 mm。除了 100 个 LED 芯片外,每块 PCB 板还包含 1 个硅光电二极管和 1 个热敏电阻温度传感器,在引线连接之后,整块 PCB 板覆盖有透明的室温硫化(RTV)密封剂,然后将 4 个 PCB 安装到 4 个互锁金属板上。在 4 个互锁金属板下方,每组驱动板也由 4 块 PCB 组成,其中包含 1 块电缆连接板。每组驱动包含 35 个驱动电路(两块板上的 12 个 LED 驱动电路和第 3 块板上的 11 个电路),用以保证 LED 电流为 $250 \sim 350\text{ mA}$ 。作为控制的 CPU 板安装于整个系统的最底部。为防止光的流失,系统四周安装有 10 cm 高的镜面壁。整个系统采用计算机控制,可以通过输入 $0 \sim 350\text{ mA}$ 之间的数值来控制不同波长 LED 链中每个 LED 的发光时间和发光强度。LED 芯片平面与测试平面之间的距离设定为 10 cm,最终模拟器的测试结果符合 AAA 级标准^[18]。

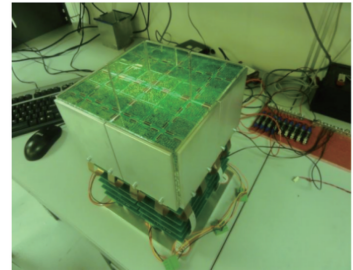


图 7 Kurt 等开发的未封闭的四模块 LED 太阳能模拟器^[18]

Fig. 7 Un-enclosed four-module LED solar simulator developed by Kurt *et al.*^[18]

2015 年,美国 Newport 公司研发出了 LSH-7520 型 LED 太阳模拟器,如图 8 所示。在 $400 \sim 1100\text{ nm}$ 范围内选取 19 种 LED 排布组成光源模块,太阳模拟器的辐射光斑为 $51\text{ mm} \times 51\text{ mm}$,可实现辐照强度为 $0.1 \sim 1$ 个太阳常数可调。此太阳模拟器的光谱匹配度、辐照均匀度、辐照不稳定性均可达到 A 级标准。另外,可以通过 USB 端口单独调节每个 LED 的输出,使用过的光谱匹配会作为控制仪表中的预置值而保存下来。

2015 年,Novič kovas 等^[19] 完成了基于小型

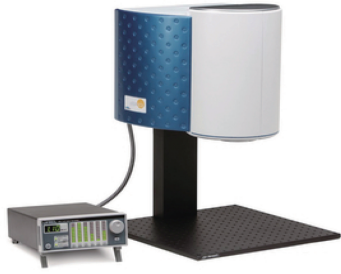
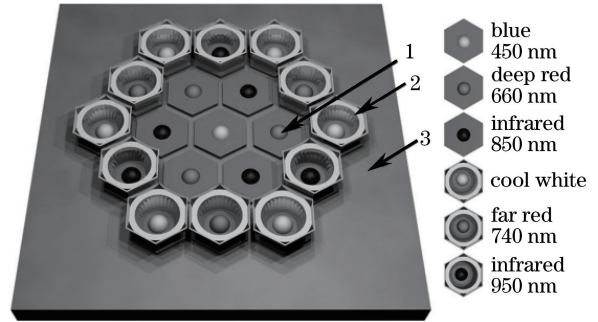


图 8 LSH-7520 型 LED 太阳模拟器

Fig. 8 LSH-7520 LED solar simulator

LED 的 AAA 级太阳模拟器的设计,利用 19 个 LED 便可完成对太阳光谱的匹配。此系统的 LED 安装在单个六角型金属印刷电路板 (MCPCB) 上。每个 LED 布置在“蜂窝状”的单元中,相邻两个 LED 中心相距 22 mm。整个 LED 板安装在铝散热器上,并且增加一个风扇用来散热。使用硅氧烷导热油脂来确保 LED、铝板和散热片之间的热界面。整个 LED 板的外部尺寸为 96 mm×104 mm。在 LED 的选择排布方面,6 个白色 LED 是首选,因为它们可以作为 400~500 nm 和 500~600 nm 范围的主要光源,另外 700~800 nm 和 900~1100 nm 范围的辐照度要求也很高。因此,3 个远红光和 3 个红外光 LED 被放置在周边。此外,只需要 1 个蓝色 LED 来轻微调整光谱即可,因此它被放置在中心。内六角 6 个剩余的 LED 位置填充有 3 个深红色和 3 个 850 nm 的红外 LED(系统结构及 LED 排布如图 9 所示)。在控制方面,所有单相 LED 串联,每个串联阵列的辐照度由 TTIQL564-TP 和 Mastech HY-5003 电源提供的独立驱动电流控制。最终测试结果在 6 cm×6 cm 区域可达到 AAA 级标准^[19]。

图 9 Novičkovas 等^[19]设计的太阳模拟器Fig. 9 Solar simulator designed by Novičkovas *et al.*^[19]

德国 STRAMA-MPS 公司推出了第三代 ProMoSimevo LED 光伏模拟器,如图 10 所示,它可对 8 inch(1 inch=2.54 cm)光伏电池进行测试。基于大型表面多色 LED 阵列,该模拟器可提供短脉冲闪烁和持续光照。测试表明,该模拟器的辐照不稳定性优于 0.5%,光谱匹配度优于±10%,辐照不均匀性优于 0.4%。表 8 为国外几种 LED 太阳模拟器的性能对比。

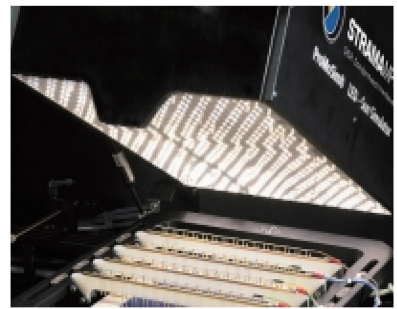


图 10 STRAMA-MPS 公司的 ProMoSimevo 太阳模拟器

Fig. 10 ProMoSimevo solar simulator developed by STRAMA-MPS company

表 8 国外几种 LED 太阳模拟器的性能

Table 8 Performance of several kinds of LED solar simulators in abroad

Institution (country-the first paper published time)	Light source	Light source area/ Irradiation area/ Irradiation surface distance/Cooling method	Irradiation intensity/ Spectral grade/ Irradiation heterogeneity/ Irradiation instability	Research content based on simulator
Tokyo University of Agriculture and Technology (Japan-2003)	4-color or 6-color low-power LEDs (473, 643, 845 nm, white light)	—/10 cm×10 cm/—/ Al heat radiation	10 W·m ⁻² / —/3%/—	Solar spectrum simulation, irradiation uniformity design, spectral response test, I-V characteristic test and calibration, plant grow light
Loughborough University (Britain-2003)	8-color LEDs (375-680 nm)+ Halogen	38 cm×38 cm/ 22 cm×22 cm/ 65 cm/Al heat radiation	765 W·m ⁻² / B/A/A	Spectral/light intensity/thermal stability, contrast with xenon lamp; I-V characteristic correction; LED current feedback control

Institution (country-the first paper published time)	Light source	Light source area/ Irradiation area/ Irradiation surface distance/Cooling method	Irradiation intensity/ Spectral grade/ Irradiation heterogeneity/ Irradiation instability	Research content based on simulator
ISFH (Germany-2004)	3-color LED-flasher-arrays (470, 700, 940 nm)	8 cm×8 cm/ 2 cm×2 cm/ —/Al heat radiation	—	Spectral response; Jsc and body life of single and double color light and comparison with PCID simulation results
Tokyo University of Agriculture and Technology (Japan-2006)	4 kinds of nut type LED (470, 644, 950, 570 nm)	20.5 cm×20.5 cm/ 10 cm×10 cm/ —/Al heat radiation	100 W·m ⁻² /—/5%/—	The SR and <i>I-V</i> characteristics of a single crystal Si solar cell are measured
Tokyo University of Agriculture and Technology (Japan-2008)	4 kinds of LED (473, 643, 845, 845 nm)	33.5 cm×33.5 cm/ 10 cm×10 cm/ —/Al heat radiation	420 W·m ⁻² —/—/—	Test the parameters of monocrystalline silicon cells
Technical University of Denmark (Denmark-2009)	18-color high-power LED (390-940 nm)	4.7 cm×1.7 cm/ 5 cm×2.5 cm/ 5.5 cm/ Al heat radiation	3000 W·m ⁻² A/ A/A	Solarspectrum simulation, irradiation uniformity design, film organic battery testing, <i>I-V</i> test self calibration
Myong Ji University (Korea-2010)	Package 1.5 W×90	22 cm×55 cm/—/ —/Al heat radiation	900 W·m ⁻² /—/—/—	LED simulator heat sink thermal analysis, filter, collimation
EPFL, IMT (Switzerland-2010)	LEDs+Halogen	100 cm×100 cm/ 85 cm×85 cm/50 cm/ Al heat radiation	—/B/A/A	Measurement of thin-H-J battery <i>I-V</i> characteristics and Wacon test results vs. Z for different pulse time under FF and <i>I-V</i> sampling direction
University of Illinois (America-2011)	6-color LED (375-680 nm)+ Halogen	15 cm×15 cm/ 10 cm×5 cm/—/ Al heat radiation	—/—/C/—	Solar spectroscopy simulation, irradiance uniformity design
Newport Corporation (America-2015)	19 kinds of LED (400-1100 nm)	—/5.1 cm×5.1 cm/ —/Al heat radiation	1000 W·m ⁻² / A/A/A	Solar spectroscopy simulation, irradiance uniformity design

Note: Jsc represents short circuit current density; PCID represents a kind of solar cell simulation software; SR represents spectral response; FF represents fill factor, and represents the characteristics of the maximum power that a solar cell can output when it has an optimal load.

3.2 国内研究现状

近年来,国内在 LED 太阳模拟器开发方面也进行了大量研究。李果华等^[20-21]于 2008 年研制了一款 LED 太阳模拟器(如图 11 所示),它能对 AM1.5 标准太阳光照射下的太阳能电池或小型光伏组件的

发光效率进行测试。利用多个不同颜色的 LED 进行光谱混合,可以达到太阳光谱中近红外到近紫外波段的全覆盖。通过控制 LED 的电流来控制各个波段的光强。该模拟器由 LED 光源气筒、光学混合处理系统、光谱修正系统、控制器等组成。LED 光

源发出的光线经光学混合系统合成复色光,然后利用光谱修正系统筛选无用光谱或增强某一光谱,使其与太阳光谱更加吻合。此设计加快了对国内太阳模拟器的研究进程,对后续太阳模拟器的优化创新起到了决定性作用^[20]。

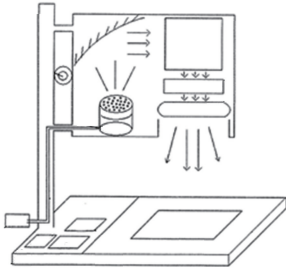


图 11 李果华等^[20-21]设计的太阳模拟器结构

Fig. 11 Structure of solar simulator designed by Li Guohua *et al.*^[20-21]

2008年,江南大学与尚德能源工程公司合作研制出了一台LED太阳模拟器,该模拟器主要选取波长为460 nm的白光LED和波长分别750, 850, 940 nm的4种LED管。首先利用三次样条插值法描出不同波段的曲线图,然后根据各波段辐照度与总辐照度的比值以及LED的辐照强度,计算出LED管的数量。在结构方面,白光LED管共54个,其余三类波长的LED管各20个,一起放置在5块板上,构成了一个台型灯室,如图12所示。此模拟器在仿真中的光谱匹配度可达0.77,且各项指标均能达A级标准^[21]。

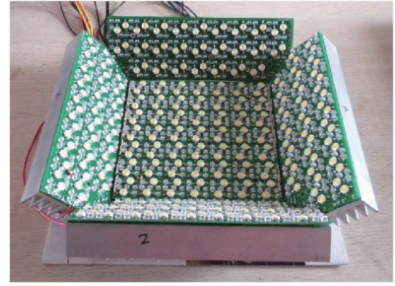


图 12 太阳模拟器台型灯室结构^[21]

Fig. 12 Table lamp room structure of solar simulator^[21]

2009年,中北大学的周卫华等^[22]开发了一台具有全光谱模拟的新型太阳模拟器,该模拟器同样利用LED复合太阳光谱,采用波谱曲线分峰拟合技术选择所需的LED。具体方法是先用软件对标准太阳光谱图像进行曲线拟合,再对曲线进行分峰拟合,最终得出各个分峰峰值对应的波长。将LED光源经光学积分球复合,并辅以电位器和直流稳压源调节亮度,即可接近太阳光谱。

2012年,刘洪兴等^[23]设计出了一台积分球太阳模拟器(如图13所示),其光源采用几种LED复合而成。为保证太阳模拟器的光强需求,以氙灯作为基底光源。模拟器光源是经过退火算法得出的光谱合成精度最高的LED组合,选用Epitex公司的53种单色LED和氙灯进行充分混光,设计了4个环带模块,令LED呈三角形分布在每个环带上。实验结果显示,模拟器可对AM1.5标准太阳光谱实现完全模拟,其光谱匹配度、辐照不稳定度、辐照不均匀度均小于 $\pm 3\%$ 。

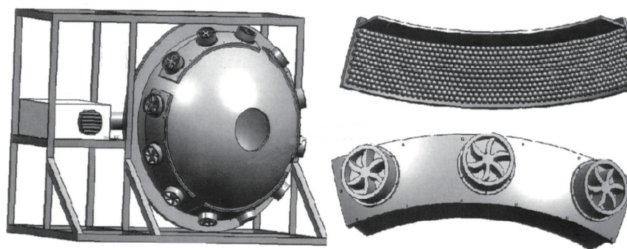
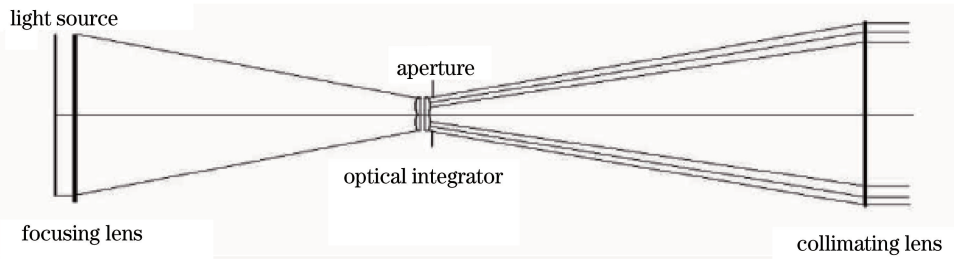


图 13 积分球太阳光谱模拟器的结构^[23]

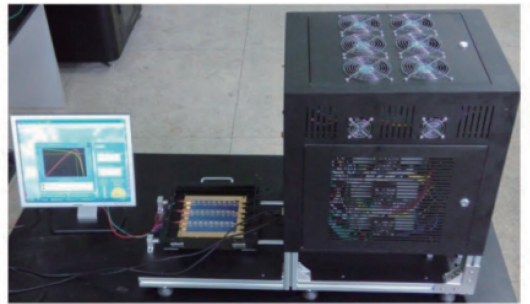
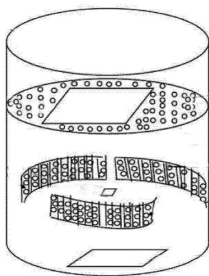
Fig. 13 Structure of integrating sphere solar simulator^[23]

2013年,江南大学与南京浦光新能源公司共同开发了一种基于LED的光伏性能测试用太阳模拟器,使用的是同轴透射式准直光学系统。模拟器包括大功率LED、光学积分器、准直系统、光阑、菲涅耳透镜等(如图14所示)。其中,准直系统采用全内反射自由曲面透镜,光学积分器采取对称式透镜阵列结构。采取蒙特卡罗光线追迹法模拟LED中光线的传播,并完成系统的光学仿真。结果表明,此系统在直径220 mm的辐照面上的辐照不均匀度为3.8%^[24]。

2014年,山西大同大学申请了一项名为全光谱LED太阳模拟器的专利(如图15所示),该模拟器主要以一个圆柱体结构为依托,内部布置有菲涅耳透镜、电路控制室、散热器和光源室。模拟器光源选择波长范围为365~940 nm的LED,每10 nm选取一次。每条LED支路中加1个串联电位器。在仿真中获取与太阳光谱相匹配的LED排列方式以及电流电压等参数。各个单色LED通过菲涅耳透镜的复合完成太阳全光谱模拟^[25]。

图 14 基于 LED 的光伏性能测试用太阳模拟器光学系统^[24]Fig. 14 Solar simulator optical system based on LED for measurement of photovoltaic property^[24]

2015 年,江南大学与南京浦光公司再次合作开发了一款 LED 太阳模拟器(如图 16 所示),该模拟器采用峰值波长分别为 460,525,625,730,850,940 nm 的 6 种大功率 LED 作为光源。由于 LED 发光角度过大,工作过程中会产生能量浪费,所以加入了具有聚光功能的光学系统,有效地降低了模拟器的辐照不均匀度。结果表明,该 LED 太阳模拟器在 160 mm×160 mm 的有效辐照面积上可以达到 AAA 级标准^[26]。

图 16 AAA 级 LED 太阳模拟器^[26]Fig. 16 AAA class LED solar simulator^[26]图 15 全光谱太阳模拟器结构^[25]Fig. 15 Structure of full spectrum solar simulator^[25]

2015 年,陕西众森电能科技公司的赵刚等^[27]提出了一项基于 LED 的太阳模拟器光谱合成设计方案,以多种颜色 LED 混光作为光源,辅以控制电路调整发光强度,最终完成了 AM1.5G 标准太阳光谱的模拟,光谱失配度小于 1%,其合成光谱较国外太阳模拟器更出众,达到了超 A 级光谱。表 9 为国内对于 LED 太阳光谱模拟器的研究对比。

表 9 国内几种 LED 太阳模拟器的性能

Table 9 Performance comparison of several domestic LED solar simulators

Institution or company/ Inventor (time)	Type of light source	Irradiation area	Irradiation intensity/ Spectral grade/ Irradiation heterogeneity/ Irradiation instability	Advantage and disadvantage
Jiangnan University, Suntech Energy Engineering Company/Gao Liang (2008)	L750-OSAU/L850/ L940-05V/White light LED	5 cm×5 cm	—/A/B/—	Low cost, light can carry, uniformity to be improved
—/Li Guohua (2008)	—	—	1000 W·m ⁻² /—/—/A	Complex structure, spectral matching, uniformity to be improved
North University of China/Zhou Weihua (2009)	5-color LED (530, 647, 750, 810, 1066 nm)	—	—/A/—/—	Small and lightweight, low radiation intensity

Institution or company/ Inventor (time)	Type of light source	Irradiation area	Irradiation intensity/ Spectral grade/ Irradiation heterogeneity/ Irradiation instability	Advantage and disadvantage
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences/ Liu Hongxing (2012)	53 kinds of LED+ xenon lamp	$\Phi 60$ mm	—/5.67%/ $\pm 3\%/\pm 3\%$	Radiation characteristics, irradiation area, poor uniformity
Jiangnan University, Nanjing Puguang New Energy Company/ Sun Jiangang (2013)	5-color LED (high color white; 660,730,850,940 nm)	Diameter of 220 mm circular area	—/—/3.8%/—	High degree of alignment, uneven irradiation to be improved
Datong University/ Han Bingchen (2014)	20 kinds of LED (365-960 nm)	—	—	The circuit is simple and flexible, easy to control, and less irradiation
Gsolar Power Co., Ltd./ Zhao Menggang (2015)	High power LED (300-1100 nm)	—	—/1%/—/—	Spectral matching is high, the system is in the optimization stage
Jiangnan University, Nanjing Puguang New Energy Company/ Zhu Kongshuo (2015)	6 kinds of high power LED (460,525,625, 730,850,940 nm)	160 mm \times 160 mm	1000 W \cdot m ⁻² /A/A/A	Irradiation characteristics are good, uneven irradiation heterogeneity
Hycreat (Beijing) Technology Co.,Ltd. /—	LED (365-1070 nm)	100 mm \times 100 mm	1000 W \cdot m ⁻² /A/B/A	Irradiation intensity is high, heterogeneity is slightly low

国内对 LED 太阳模拟器的研究相较于国外起步稍晚,但进展迅速,辐照不均匀度和不确定度等参数处于先进行列,并且已经可以做到对每个光源的精确控制。近些年国内研制的 LED 太阳模拟器具有结构小、易于控制等特点,研究的主要内容集中在 LED 的结构排布和光学系统方面,由于大功率 LED 光源的发散角较大,会产生较多的能量损失,所以合理的 LED 排布可以最大限度地解决这一问题。如山西大同大学研制的圆柱体结构可以尽可能地减少光的流失。添加合适的光学系统也可增强辐照,使混光更加均匀,降低了辐照不均匀度。另外,大功率 LED 在工作中会产生较多热量,如不及时散去,会对仪器的可靠性产生影响,目前多采用安装金属复合基板的方法解决这一问题,基板材料多为铝、铜等高导热金属材料或高导热陶瓷材料^[28-29]。在以后的发展中,LED 光源的种类日趋繁多,新型光学元

件不断涌现,所以对 LED 太阳模拟器的研究重点应集中在设计出更加合理的光源排布结构和光学系统,以降低光谱失配误差,提高辐照强度和辐照均匀性。

4 结 论

从国内外研究现状来看,随着 LED 种类的增多和光学技术的提升,LED 太阳模拟器的光谱匹配度逐渐提高。随着混光、匀光技术的发展,LED 太阳模拟器的辐照更加均匀,辐照不稳定性也随着控制技术的提高达到更高水平。在未来的发展中,LED 太阳模拟器研发的关键体现在以下几个方面。

1) 在评定太阳模拟器参数方面采取更高标准,即进一步提高 LED 合成太阳光的光谱匹配度、辐照均匀度和辐照稳定度,这是模拟器自身性能发展的重点所在。

2) 提升 LED 太阳模拟器的功率。未来发展的诸多技术,如太阳能发电、热化学、光热发电、空间技术等,都需要有大功率的太阳模拟器配合完成。

3) 具有连续稳定的功率可调性。这主要是为更加多元化、需求更多的实验提供条件,同时可以满足不同时间、不同地域太阳光的更精确的模拟。

在今后的研发中,适合多种环境的 LED 太阳模拟器将会不断出现,从而在世界航天科研和太阳能产业等方面起到重要作用。

参 考 文 献

- [1] Du J L, Tang D W, Huang X. Research status and future development of solar simulator [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(s1): 70-76.
杜景龙, 唐大伟, 黄湘. 太阳模拟器的研究概况及发展趋势[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(s1): 70-76.
- [2] Gao Y, Liu H B, Wang L. Solar simulation technology[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(2): 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, 3(2): 104-111.
- [3] Lin J, Sang L X, Zhang J, *et al.* Analysis, application and development of solar simulator [J]. *Solar Energy*, 2015(10): 37-43.
蔺佳, 桑丽霞, 张静, 等. 太阳光模拟器的解析、应用及其发展[J]. *太阳能*, 2015(10): 37-43.
- [4] Chen W Z, Jiang L L, Jiang L, *et al.* Experimental research of spectral design of solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222002.
陈文志, 蒋绿林, 姜黎, 等. 太阳模拟器的光谱设计实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0222002.
- [5] Su S, Zhang G Y, Fu Y, *et al.* New development of solar simulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 070003.
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.
- [6] Gao W X, Ni K K, Li Z W, *et al.* The study on simulating sunlight with LED [J]. *Zhaoming Gongcheng Xuebao*, 2015, 26(1): 80-83.
高维惜, 倪凯凯, 林泽文, 等. LED 模拟太阳光研究[J]. *照明工程学报*, 2015, 26(1): 80-83.
- [7] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0300001.
- [8] International Electrotechnical Commission.

- Photovoltaic devices-part 9: solar simulator performance requirements: IEC 60904-9 [S]. Geneva: [s.n.], 2007.
- [9] Japan Industrial Standards Survey. Solar simulator for multi-junction solar cells and modules: JIS C 8942—2009[S]. [S.l.]: [s.n.], 2009.
- [10] American Society for Testing and Materials. Standard specification for solar simulation for photovoltaic testing: ANSI/ASTM E927-10 (2015) [S]. [S.l.]: [s.n.], 2015.
- [11] China National Standardization Administration. Photovoltaic devices — part 9: solar simulator performance requirements: GB/T 6495.9—2006[S]. Beijing: Standards Press of China.
中国国家标准化管理委员会. 光伏器件第 9 部分: 太阳模拟器性能要求: GB/T6495.9—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [12] Kohraku S, Kurokawa K. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator [C] // *Proceedings of World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. 2003, 2: 1977-1980.
- [13] Kohraku S, Kurokawa K. A fundamental experiment for discrete-wavelength LED solar simulator [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, 90(18): 3364-3370.
- [14] Tsuno Y, Kamisako K, Kurokawa K. New generation of PV module rating by LED solar simulator—a novel approach and its capabilities [C]. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008: 1-5.
- [15] Krebs F C, Sylvester-Hvid K O, Jørgensen M. A self-calibrating led-based solar test platform [J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2011, 19(1):97-112.
- [16] 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(4): 100-105.
- [17] Namin A, Jivacate C, Chenvidhya D, *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(6): 131-137.
- [18] Kurt L, William R N, Harvey S. Adjustable spectrum LED solar simulator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9003: 900317.
- [19] Novičkovas A, Baguckis A, Mekys A, *et al.* Compact light-emitting diode-based AAA class solar simulator: design and application peculiarities [J].

- IEEE Journal of Photovoltaics, 2015, 5(4): 1137-1142.
- [20] Li G H, Qian W Y. LED solar simulator: 101290340A[P]. 2008-10-22.
李果华, 钱维莹. LED 太阳模拟器: 101290340A [P]. 2008-10-22.
- [21] Gao L, Li G H, Meng Z Y. The design of LED solar simulator[C] // The Symposium of the 10th Chinese Conference on Solar Photovoltaic [S. l.]: [s. n.], 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[S. l.]: [s. n.], 2008: 751-756.
- [22] Zhou W H, Zhou H C. Study of LED solar simulator [J]. Infrared, 2009(3): 46-48.
周卫华, 周汉昌. LED 太阳模拟器的研究[J]. 红外, 2009(3): 46-48.
- [23] 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]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1447-1454.
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.
- [24] Sun J G, Li G H, Zhu K S, *et al.* Design and simulation of the optical system of LED solar simulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 102204.
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): 102204.
- [25] Han B C, Lian D H, Liu Y H, *et al.* Full spectrum LED solar simulator:104100873A[P]. 2014-10-15.
韩丙辰, 连德浩, 刘艳红, 等. 全光谱 LED 太阳模拟器: 104100873A[P]. 2014-10-15.
- [26] Zhu K S, Sun J G, Li G H, *et al.* Realization of LED solar simulator matching and irradiance unevenness[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122202.
朱孔硕, 孙健刚, 李果华, 等. LED 太阳模拟器光谱匹配度与辐照不均匀度的实现[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122202.
- [27] Zhao M G, Feng Y F, Liu J, *et al.* Spectral synthesis design of solar simulator based on LED light source[J]. Solar Energy, 2015(6): 41-43.
赵孟钢, 冯云峰, 刘皎, 等. 基于 LED 光源的太阳模拟器光谱合成设计[J]. 太阳能, 2015(6): 41-43.
- [28] Zhu H T, Fu R L, Fei M, *et al.* The optical and thermal performance of led source packaged with Al/Al₂O₃ substrate [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1023002.
朱海涛, 傅仁利, 费盟, 等. 铝/氧化铝复合基板的 LED 光源的光热特性研究[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1023002.
- [29] Tang F, Wang D, Guo Z N. Optimization analysis of radiator for cooling of LED using chimney effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 072301.
唐帆, 王丹, 郭震宁. 基于烟囱效应的 LED 冷却用散热器优化分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 072301.