

多源分布式稳态太阳模拟器设计

孙超^{1,2}, 金志樑^{2**}, 宋扬², 凌宗权^{1,2}, 蓝凯秋^{1,2}, 黄阳^{1,2}, 张明亮^{1,2}, 熊大曦^{1,2*}¹中国科学技术大学生物医学工程学院(苏州)生命科学与医学部, 江苏 苏州 215000;²中国科学院苏州生物医学工程技术研究所光与健康研究中心, 江苏 苏州 215163

摘要 太阳模拟器是光伏和材料降解研究中的关键设备,能够为光浸泡与耐久度测试提供稳定可控的特征辐照度光谱。基于大功率、单晶窄带小发光面的 LED 光源采用超半球齐明透镜进行全孔径集光,设计曲面分布式光学结构,从而高效实现目标靶面上的光谱匹配及 1 个太阳常数(辐照度为 100 mW/cm²)的辐照度。实验结果表明,本文所设计的太阳模拟器在 1000 h 的时间内的辐照度波动低于 1.15%,靶面中心 60 mm×60 mm 的正方形区域内辐照度不均匀性为 1.98%,80 mm×80 mm 区域内辐照度不均匀性为 4.99%,光斑的光谱匹配度达到 A 级。该系统结构紧凑,可扩展性强,可用于长期稳态测量。

关键词 光学设计; 太阳模拟器; 发光二极管; 光能传递效率; 稳态测量

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1022001

Design of Multi-Source Distributed Steady-State Solar Simulator

Sun Chao^{1,2}, Jin Zhiliang^{2**}, Song Yang², Ling Zongquan^{1,2}, Lan Kaiqiu^{1,2},
Huang Yang^{1,2}, Zhang Mingliang^{1,2}, Xiong Daxi^{1,2*}¹ School of Biomedical Engineering (Suzhou), Division of Life Sciences and Medicine,
University of Science and Technology of China, Suzhou 215000, Jiangsu, China;² Center of Light and Health, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, Jiangsu, China

Abstract Solar simulator is a key equipment in the research of photovoltaic and material degradation, which can provide stable and controllable characteristic irradiance spectrum for light immersion and durability testing. Based on the high-power single-crystal narrow-band small-emitting surface LED light source, a super-hemispherical homogeneous lens is used to collect light in full aperture, and the distributed optical structure of the curved surface is designed, so as to achieve efficient spectral matching on the target surface and irradiance of one solar constant (irradiance of 100 mW/cm²). The experimental results show that the irradiance fluctuation of the solar simulator designed in this paper is less than 1.15% within 1000 h, the irradiance non-uniformity in the square area of 60 mm×60 mm in the center of the target surface is 1.98%, the irradiance non-uniformity in the 80 mm×80 mm region is 4.99%, and the spectral matching of light spot reaches class A. The system has compact structure and strong expansibility, and can be used for long-term steady-state measurement.

Key words optical design; solar simulator; light-emitting diode; efficiency of light transmission; stable state measurement

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2021-11-09; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(51376191)、中国科学院重点项目(KZCC-EW-109)

通信作者: *xiongdx@sibet.ac.cn; **jinzl@sibet.ac.cn

1 引言

太阳模拟器是一种模拟太阳辐射物理特性与几何特性的实验或定标设备^[1], 辐照均匀性、辐照面积、辐照稳定性是太阳模拟器的关键指标。在太阳能电池和材料老化领域, 产品的光浸泡与耐久度测试均需要一个长期稳定的光模拟环境。光催化剂等样品需在超过 3 个月的恒定光照下探究其降解行为与活性变化^[2-3], 太阳模拟器的寿命与性能将直接影响其长期实验的准确性。新型钙钛矿太阳能电池 (PSCs) 是目前光电池领域的一个研究热点^[4], 大多数学者采用商用氙灯太阳模拟器并对其长期稳定性进行测量^[5-7]。然而, 氙灯光源通常只能在 1000 h 的时间内维持光谱性能, 长期测量需要更换并校准昂贵且危险的光源, 但这会破坏测试实验的完整性。发光二极管 (LED) 以其高效环保、安全稳定而逐渐成为太阳模拟器的热点光源^[8]。

2003 年, Kohraku 等^[9] 基于 6 个波长的 LED 成功研制了第一台 LED 太阳模拟器, 其通常采用多光源阵列排布的方法在特定表面上实现稳态均匀照明^[10-12]。相关学者通过搭建复杂的光学系统, 可以使 LED 太阳模拟器获取更大的匀光面积与更好的匀光效果^[13-15]。此外, 特殊需求的 LED 太阳模拟器也被广泛研究。苏拾等^[16] 使用白光 LED 研制出大于 0.2 个太阳常数的高准直运动式太阳模拟器。Stuckelberger 等^[17] 研制出波长在 400~750 nm 之间、5 个太阳常数的太阳模拟器,

其专门为非晶硅太阳能电池的光浸泡测量设计。但是, 上述太阳模拟器均存在能量传递效率过低的问题, 部分杂散光的反射会影响实验结果的准确性, 尤其在长期测量过程中的影响更为突出。近些年, 对于太阳模拟器中关键部件的研究旨在加强辐照度的均匀性、可调性等, 而这通常是以光能效率低为代价的^[18-19]。到目前为止, 鲜见开发专门用于耐久度测试的 LED 全光谱太阳模拟器, 因此研制高效紧凑、长期稳态的太阳模拟器是一个亟待解决的问题。

本文采用大功率、垂直结构的晶片窄带 LED 光源, 通过高导热单晶 COB (Chips on Board) 封装的方式来实现高光功率密度的稳定输出。同时, 基于超半球齐明透镜来实现全孔径的集光, 采用多光源曲面分布式光学系统搭建一种高能量传递效率的太阳模拟器, 这可以有效解决超长时间内光浸泡与耐久度等连续稳态测量的难题。

2 太阳模拟器的设计

2.1 效率分析

目前, 太阳模拟器的匀光系统主要包括反射光学系统与折射光学系统。反射光学系统以积分球、匀光棒为代表, 通过光线的反射叠加在出射面以达到匀光的效果, 而过多的反射会导致大量的能量损耗。折射光学系统以科勒照明、复眼照明为代表, 复杂的光学系统同样会造成大量的能量损耗。典型太阳模拟器的效率如表 1 所示。

表 1 典型太阳模拟器的效率

Table 1 Efficiency of typical solar simulator

| Institution (time) | Light source | Feature | Electric power of light source /W | Optical power in uniform area (irradiance non-uniformity) /W | System efficiency /% |
|---|--------------|--|-----------------------------------|--|----------------------------|
| Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics (2017) ^[20] | Xenon lamps | Large-area projection solar simulator | 28000 | 1263.000(class B) | 4.50 |
| Changchun University of Technology (2018) ^[13] | LEDs | Multi-light source array collimation | 60 (optical power) | 13.295(class A) | 22.20 (optical efficiency) |
| University of Kashan (2021) ^[12] | LEDs | Planar arrangement of LEDs with secondary optical design | 61 | 0.529(class A) | 0.88 |

LED 太阳模拟器是一种模拟紫外到近红外太阳光的宽光谱光源, 使用不同峰值波长的 LED 光源对太阳光谱进行强度拟合。本文设计的目标是使用

多光谱窄带 LED 光源来实现对目标区域的复色均匀照明。在照明设计的过程中, 为了减小能耗与杂散光的影响, 光源的传递效率十分重要, 图 1 定义有

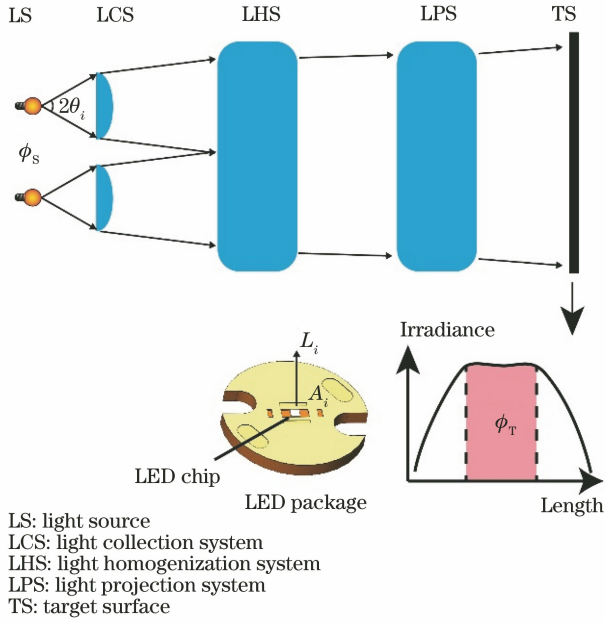


图 1 有效光能传递示意图

Fig. 1 Schematic of effective light energy transfer

有效光能传递效率为目标匀光区域的光通量 Φ_T 与光源发射通量 Φ_s 之比,即

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\Phi_T}{\Phi_s} = \frac{\Phi_T}{\sum_{i=1}^k \Phi_i}, \quad (1)$$

式中: Φ_i 表示第 i 颗光源的发射光通量。式(1)中包含了目标靶面匀光区域的全部辐射方向和全部辐射光谱,即

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\iiint h_T(r, \Omega, \lambda) L_T(r, \Omega, \lambda) dr d\Omega d\lambda}{\sum \iiint h_i(r, \Omega, \lambda) L_i(r, \Omega, \lambda) dr d\Omega d\lambda}, \quad (2)$$

式中: h_T 和 h_i 分别表示目标区域和第 i 颗光源关于位置 r 、立体角 Ω 、波长 λ 的分布函数; L_T 和 L_i 分别表示目标区域和第 i 颗光源的亮度。由此可见,式(2)的分析与求解相当复杂,由于采用的窄带 LED 是朗伯体光源,为此分析过程可以近似与简化。空间均匀分布的朗伯体光源在光学系统中传输的光通量 Φ_{ti} 与光学扩展量 ξ_i 的关系为

$$\Phi_{ti} = \frac{L_i \xi_i}{n^2} \tau_{1i} \tau_{2i}, \quad (3)$$

式中: n 表示光源的空间折射率; τ_{1i} 表示经过吸收、散射、反射等的损耗; τ_{2i} 表示系统公差和视场所造成的损耗。忽略系统公差,假设光源的扩展尺寸不会明显改变光束的接收角,所以

$$\Phi_{ti} = \pi L_i A_i \tau_{1i} \sin^2 \theta_i, \quad (4)$$

式中: A_i 表示光源的面积,为常数; θ_i 表示光学系统所接收到的单颗光源的光束的发散半角。由于将采

用的窄带 LED 近似为单色光源,数量众多的 LED 单色光源拟合宽谱太阳光的过程,即在目标匀光区域的光通量对波长的积分可以简化为对离散数据的求和。同样的,非相干光源发射的总光通量也为全部光源的光通量之和,那么有效光能传递效率可简化为

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^k \tau_i \Phi_i}{\sum_{i=1}^k \Phi_i} = \frac{\sum_{i=1}^k L_i A_i \tau_i \tau_{1i} \sin^2 \theta_i}{\sum_{i=1}^k L_i A_i}, \quad (5)$$

式中: τ_i 表示第 i 颗光源经过光学系统后的光通量投射在目标匀光区域的光能传递效率。由式(5)表明,提升复色宽带光源的太阳光斑效率可以简化为对窄带准单色 LED 光学结构的优化。当光源总数量 k 确定时,光能有效传递效率与 θ_i 、 τ_{1i} 、 τ_i 三个参数有关。当 θ_i 取最大值 $\pi/2$ 时,表明光学系统需要对朗伯体 LED 光源进行全孔径集光。 τ_{1i} 越大,即吸收、散射、反射等损耗越小,表明光学系统越精简。 τ_i 越大,表明多色光源投射在匀光区域的效率越大,这里主要与两个因素有关($\tau_i = \tau_{ia} \tau_{ib}$),一个是单色光源在其靶面匀光区域的效率 τ_{ia} ,另一个是多光源在公共匀光区与单光源匀光区的效率比率 τ_{ib} 。图 1 中右下角表示靶面上辐照度分布轮廓度,阴影区域为目标匀光区的一维轮廓。

2.2 单光源优化

一次光学采用超半球齐明球透镜对尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 LED 晶片进行全孔径集光^[21] ($\theta_i = \pi/2$)。二次光学为了增大 τ_{1i} 使用单块薄透镜,以提高单色光源在其靶面匀光区域的效率 τ_{ia} 为目标对其结构进行优化。

这里所有透镜均选用色散较低的 BK7 材料,球透镜的半径选用 6.4 mm 。将晶片放在超半球透镜的齐明点上,球透镜后使用平凸透镜进行投光,平凸透镜的结构参数通过 ZEMAX 软件来优化。ZEMAX 中的评价函数(MF)算法采用阻尼最小二乘(DLS)法来获得凸面曲率半径、圆锥系数、透镜厚度等操作数的最优解,表达式为

$$x_{\text{MF}}^2 = \frac{\sum \omega_i (T_i - V_i)^2}{\sum \omega_i}, \quad (6)$$

式中: ω_i 表示操作数的权重; T_i 表示目标值; V_i 表示当前值。选择间隔为 100 mm 、不同工作距 ($400 \sim 1400 \text{ mm}$) 来优化透镜(某一工作距下优化的透镜均称为该工作距投光透镜),其评价函数使用光斑半径方法,另外使用角半径方法来优化准直透镜。薄透镜参数的优化设置:波长分别为 $0.400, 0.550,$

0.630, 0.708, 0.780, 0.940 μm , 权重均为 1; 变量曲率半径的初始值为 7.9 mm; 操作数 MNEG 和 MXCG 的目标值分别为 1 mm 和 7 mm, 权重分别为 100 和 1。如图 2 所示, 使用蒙特卡罗射线追踪 (MCRT) 法来分析光学系统的光效率与光分布。所有透镜元件均镀上与光源波长相关的减反膜, 在仿真过程中设置透镜表面为全透以忽略菲涅耳损耗

($\tau_{li}=1$) 等。峰值波长在 555 nm 的 LED 晶片光源经过投光透镜后投射到目标靶面, 靶面的光线追迹结果如图 2(b) 所示。从图 2(b) 可以看到, 目标靶面上的光斑呈现正方形分布。光伏行业对太阳模拟器辐照度不均匀性 A 级指标的要求低于 2%, 这使得目标靶面顶端的匀光区域为测量区域, 如何将光能有效地投射到匀光区域是一个关键问题。

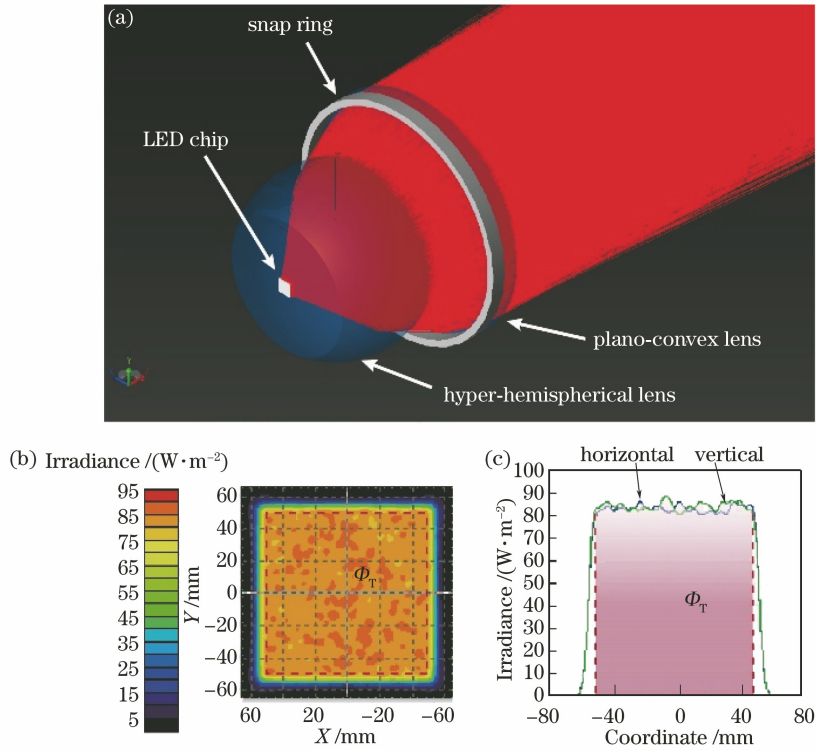


图 2 单光源系统的仿真与分析。(a) 单光源投光系统的仿真示意图; (b) 900 mm 投光透镜在工作距为 900 mm 的目标靶面上的光斑分布图; (c) 光斑中心水平和竖直方向的模拟辐照度轮廓分布

Fig. 2 Simulation and analysis of single light source system. (a) Schematic of simulation of single light source projection system; (b) spot distribution diagram of 900 mm projection lens on target surface with working distance of 900 mm; (c) simulated irradiance profile distribution in horizontal and vertical directions of spot center

为了探究靶面上有效光能的利用率, 采用 MCRT 法来分析不同投光透镜 (准直透镜) 的光效率与光分布, 记录每块透镜 (准直透镜) 在不同工作距 (400~1400 mm) 下光斑平顶匀光区的辐照度和面积, 从而计算出单光源的有效光能传递效率 (仅由 τ_{ia} 决定)。尺寸为 1 mm × 1 mm 的朗伯体光源的光功率设为 1 W, 匀光面积与平均辐照度如图 3(b) 所示。从图 3(b) 可以看到, 随着工作距以 100 mm 的步进从 400 mm 增加到 1400 mm, 均匀平顶光斑的平均辐照度不断降低, 但是具有不同参数的透镜 (准直透镜的工作距为 ∞) 在相同的工作距下辐照度近似。因此, 同一工作距下匀光区面积越大, 则有效光能传递效率越大。如图 3(a) 所示: 准直透镜在 400~1400 mm 的工作距下有效光能传递效率呈上

升趋势且不超过 78% (此外在 50 m 处的仿真结果显示有效光能传递效率为 77.3%); 经参数优化的投光透镜在工作距附近可以取得最大的有效光能传递效率, 工作距越远效率越低; 所有透镜中, 经优化的 900 mm 投光透镜在 900 mm 的工作距下取得最大的有效光能传递效率为 83%, 此时透镜的口径为 16.8 mm, 厚度为 4.92 mm, 凸面半径为 9.912 mm, 圆锥系数为 -0.567, 本文使用该透镜在 900 mm 的工作距处匀光。

2.3 系统结构设计

为了增加多光源在公共匀光区与单光源匀光区的效率比率 τ_{ib} , 不同的窄带光源和透镜所组成的光源系统紧凑排布在距离靶面中心 900 mm 处的球面上, 考虑到采用环形排布, 每一环层光源所在的平面

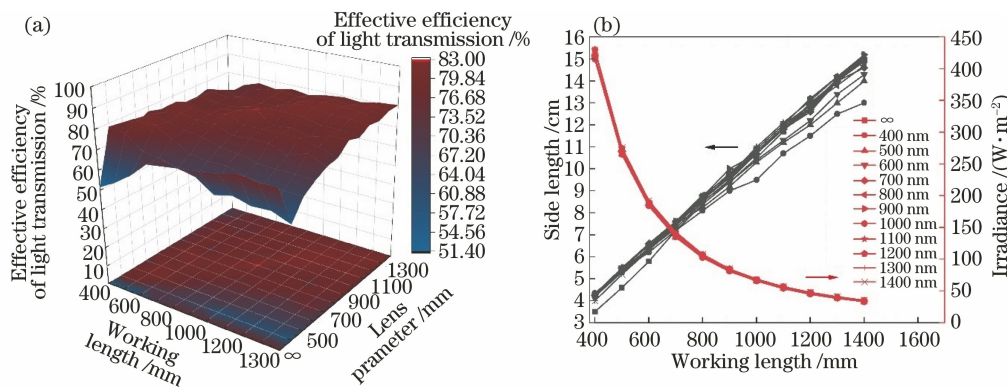


图 3 单光源系统(光功率为 1 W, 波长为 555 nm)在不同工作距下靶面上匀光区的性能结果。

(a)有效光能传递效率;(b)匀光面积与平均辐照度

Fig. 3 Performance results of single light source system (optical power is 1 W, wavelength is 555 nm) in uniform light region on target surface at different working distances. (a) Effective light energy transfer efficiency; (b) uniform light area and average irradiance

与内层偏转 $\alpha = 1.273^\circ$, 每一环层的厚度 $d = 20$ mm。目标靶面上的光斑均匀性同样采用光线追迹结果进行分析, 如图 4 插图所示。光斑的匀光区分为 3×3 的 9 个区域, 计算每个区域的平均辐照度, 光源偏转所导致的不均匀性为

$$N = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2 \times E_{\text{mean}}} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: E_{\max} 表示最大的平均辐照度; E_{\min} 表示最小的平均辐照度; E_{mean} 表示总的平均辐照度。不同层 LED 偏转所导致的均匀性变化如图 4 所示。

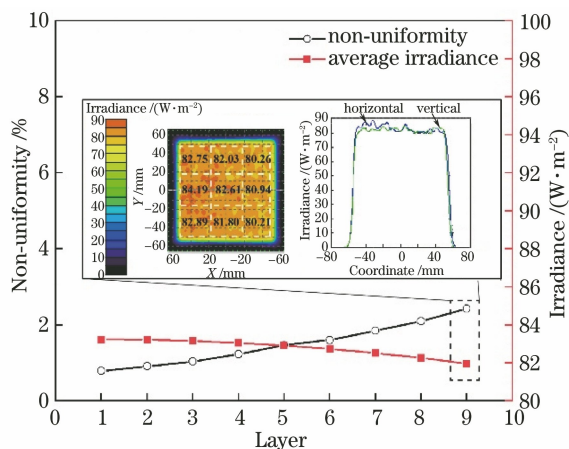


图 4 555 nm 单光源在不同结构层处匀光区的不均匀性与平均辐照度

Fig. 4 Non-uniformity and average irradiance of 555 nm single light source in uniform region at different structural layers

从图 4 可以看到: 即使结构达到 7 层, 555 nm 单光源的不均匀性仍低于 2%, 并且光能传递效率仍高于 0.82; 大于 7 层的微小不均匀性影响可通过在同一环形层的对称位置设置相同的 LED 晶片来

消除。由图 4 表明, 光源层数对光斑均匀性与光能传递效率的影响均很低。

对于环形层排列的 LED 光源系统, 总光源颗数 k 与层数 m 的关系为

$$k = 3m(m - 1) + 1. \quad (8)$$

由于光源每层之间偏转的角度较小, 可以近似认为光源系统的半径 r 为

$$r = (2k - 1)d/2. \quad (9)$$

目标靶面上光斑沿边长方向的发散全角 γ 为

$$\gamma = \pm \arctan \left[\frac{(r + L/2)}{R} \right], \quad (10)$$

式中: L 表示靶面上矩形光斑的边长; R 表示环形光源所在的球面的半径, 这里为常数, 即 $R = 900$ mm。由式(10)表明, 发散角与光源层数和光斑大小有关, 理论结果和仿真结果均表明光斑大小几乎不变, 因此发散角主要由光源层数决定。

考虑到成本以及所有透镜的结构参数相同, 因此可知色散对有效光能传递效率的影响较大, 这里设置三层共 19 颗单色光源来模拟波长在 400 ~ 1200 nm 之间的太阳光谱, MCRT 法的追迹结果如图 5 所示。从图 5 可以看到, 有效区域(尺寸约为 93 mm × 93 mm)的光能传递效率仍高达 71.4%, 900 mm 工作距下靶面上光斑边长方向的发散角约为 $\pm 6.3^\circ$ 。

2.4 光谱拟合

使用校准过的海洋光学 USB4000 型光纤光谱仪与 ThorLabs S425C-L 型功率计, 测量紫外到红外下大功率 LED 晶片(尺寸约为 1 mm × 1 mm)的功率谱, 所有晶片均封装在热电分离紫铜基板上, 归一化光谱如图 6 所示。从图 6 可以看到, 光谱覆盖

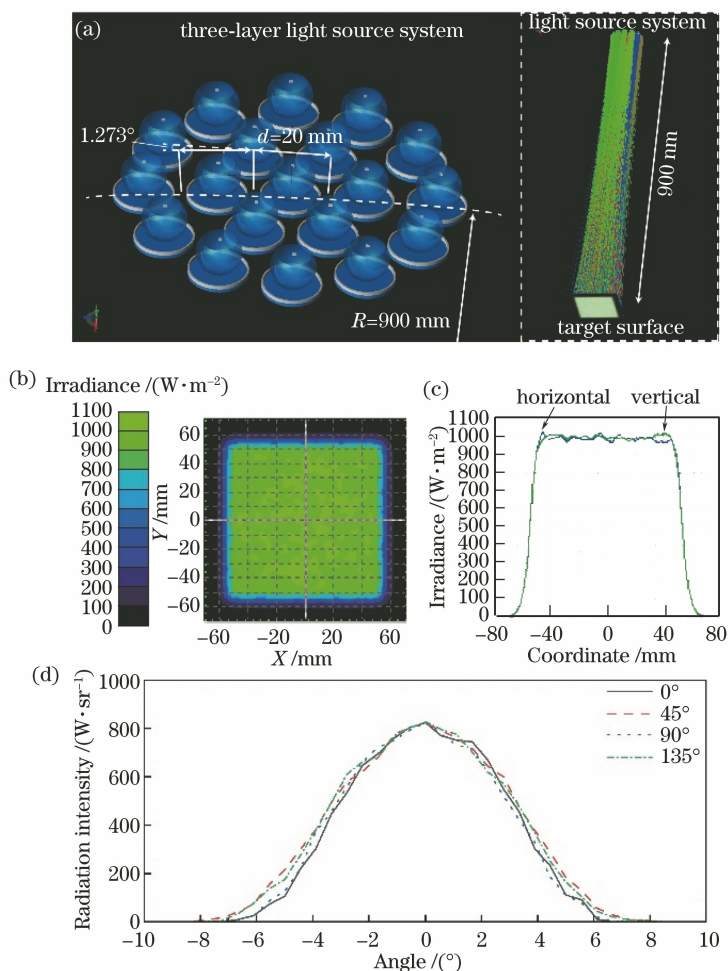


图 5 三层多光源太阳模拟器的追迹结果。(a)光源结构及系统的仿真示意图;(b) 900 mm 工作距下靶面的辐照度分布;(c) 900 mm 工作距下靶面的光强分布;(d) 靶面光强分布,不同的曲线代表不同的方位角

Fig. 5 Tracking results of three-layer multi-light source solar simulator. (a) Schematic of optical simulation of light source structure and system; (b) irradiance distribution of target surface at working distance of 900 mm; (c) intensity distribution of target surface at working distance of 900 mm; (d) intensity distribution of target surface, with different curves representing different azimuth angles

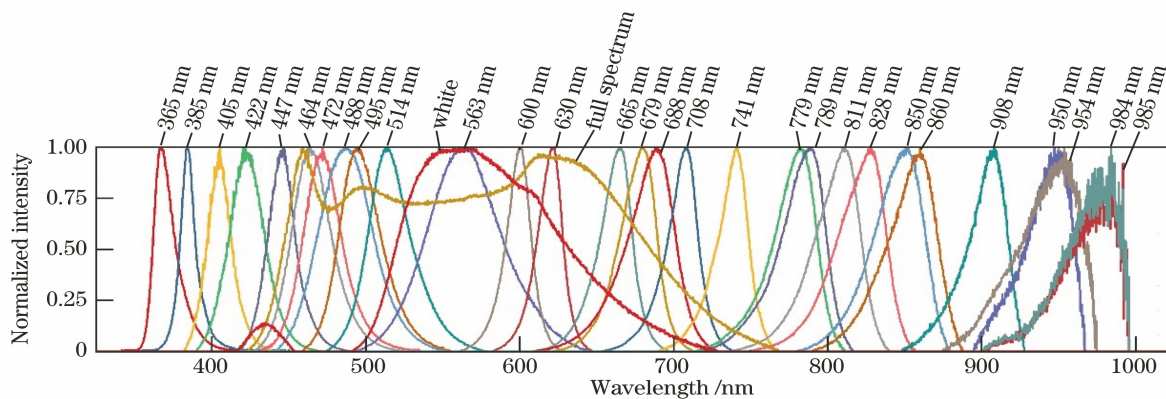


图 6 LED 晶片的归一化光谱
Fig. 6 Normalized spectra of LED chips

紫外 350 nm 到红外 1000 nm, 这表明 LED 作为光源能很好地覆盖太阳模拟器的光谱范围。在实际应用

中, 太阳光谱被标准化为 AM1.5G、AM1.5D 等光谱, 其中 AM 代表大气质量, 1.5 代表阳光穿过大气的相

对路径长度为从天顶垂直入射(AM1)的 1.5 倍, D 代表直射光谱, G 代表在 37° 的倾斜平面上测量到的直射光加上大气散射光的全局光谱。

使用测量得到的 LED 光谱对 AM1.5G 光谱进行拟合, 优先模拟标准光谱的吸收谷与吸收峰, 根据标准光谱的特征与 LED 光谱的分布来选择出具有合适峰值波长的 LED, 使用最小二乘法进行光谱拟合。如图 7(a) 所示, 在紫外 350 nm 到红外 1000 nm 的范围内, LED 的模拟光谱显示出其在模

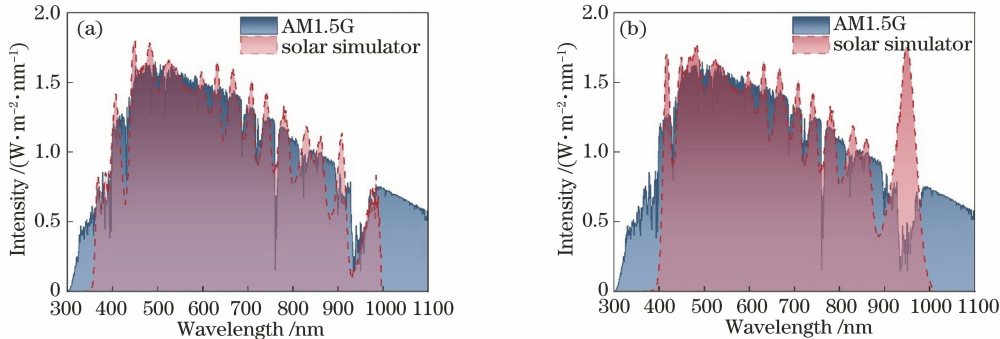


图 7 太阳光谱的拟合结果。(a) 350~1000 nm 波长之间的光谱拟合结果;(b) 400~1100 nm 波长之间的光谱拟合结果

Fig. 7 Fitting results of solar spectra. (a) Spectral fitting results between 350 nm and 1000 nm; (b) spectral fitting results between 400 nm and 1100 nm

3 实验与分析

3.1 太阳模拟器分级

IEC 对于太阳模拟器的分类标准使用广泛, AAA 级太阳模拟器指光谱匹配度、辐照度不均匀性、辐照度不稳定性均达到 A 等级^[22]。如表 2 所示, 光谱匹配度定义[400 nm, 500 nm]、[500 nm, 600 nm]、[600 nm, 700 nm]、[700 nm, 800 nm]、[800 nm, 900 nm]、[900 nm, 1100 nm]6 个波长范围内的辐照度占比均满足等级要求。辐照度不均匀性与系统的辐照度时间不稳定性可表示为

$$\mu = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%, \quad (11)$$

式中: μ 表示不均匀度。辐照度不均匀性与系统的辐照度时间不稳定性不同的是前者采用空间平面的辐照度, 后者采用测量时间内系统的辐照度。

表 2 稳态太阳模拟器的分类

Table 2 Classification of steady state solar simulators

| Classification | Spectral match to all intervals / % | Spatial non-uniformity of irradiance / % | Long term instability of irradiance / % |
|----------------|-------------------------------------|--|---|
| A | 75-125 | 2 | 2 |
| B | 60-140 | 5 | 5 |
| C | 40-200 | 10 | 10 |

拟太阳光谱峰谷细节方面具有巨大潜力。然而, 根据国际电工委员会(IEC)对太阳模拟器光谱的分级标准, 光谱匹配需要在 400~1100 nm 波段为 6 个波长匹配各自的辐照度占比, A 级光谱要求每个区间范围内均达到 $\pm 25\%$ 的匹配度^[22]。考虑到现有峰值波长在 350 nm 以下与 1000 nm 以上, LED 的光电转换效率与功率均偏低, 太阳模拟器的耐久度测试要求其具有更高的功率与能量传递效率, 太阳模拟器 A 级光谱的匹配结果如图 7(b) 所示。

3.2 系统搭建与功率测量

大功率 LED 的散热对提高太阳模拟器的稳定性与寿命至关重要, 本文采用纳米银浆使高导热、垂直结构的小 LED 晶片在沉金 PCB(Printed Circuit Board)上固晶, 烧结好的多孔银粉焊膏的热传导率可达 240 W/(K·m)且不会被氧化, 不同波长的单晶 LED 晶片分别在直径为 16 mm、厚度为 1.5 mm 的绝缘导热沉金紫铜基板上完成单颗晶片的 COB 封装。封装模块通过纯铜底座固定在铝型材散热器上, 底面倾斜的纯铜底座保持每一层芯片的倾角为 1.273°。将一台风扇正对铝散热器以进行主动冷却操作, 在稳态测试过程中紫铜底座的温度恒定且低于 35 °C。考虑到太阳模拟器对辐照度及其均匀性的要求均最高, 在满足光谱匹配要求的前提下, 这里使用三层共 19 颗光源来验证太阳模拟器的性能, 通过自研的计算机端软件来实现对太阳模拟器的实时调控, 光源、散热系统、控制电源均装配在尺寸为 184 mm×209 mm×117 mm 的光源箱中, 如图 8 所示。

使用汉晟普源生产的 HSPY-60-10 型可调直流电源驱动单颗 LED 光源, ThorLabs 生产的 S120VC 型标准光电二极管探头的光谱响应覆盖 200~1100 nm, 在 900 mm 的工作距下使用 S120VC 型探头功率计分别测量每个 LED 在靶面

中心的辐照度。在达到 1 个太阳常数的要求下, 计算拟合 AM1.5G 光谱中各个光源的辐照度, 调整电源的驱动电流达到目标辐照度。在此驱动电流下拆卸器件, 使 ThorLabs 生产的 S425C-L 型热敏探头功率计紧贴在封装晶片表面并记录裸光源的光功率。如表 3 所示, 太阳模拟器中 LED 驱动电源的总电功率为 53.23 W, 总光功率为 12.33 W (仿真的总

光功率为 12.12 W), 总电光转换效率为 23.2%。单颗光源的平均驱动电流为 0.9 A。三层结构共 19 颗太阳模拟器除了峰值波长在 488 nm 和 708 nm 的 LED 以外, 其他类型的 LED 均未达到其最大功率的 55%, 这表明在超长时间的使用过程中可以提高单颗 LED 的驱动电流来抵消 LED 光功率的衰减, 从而维持光谱的稳定性与辐照度时间的稳定性。

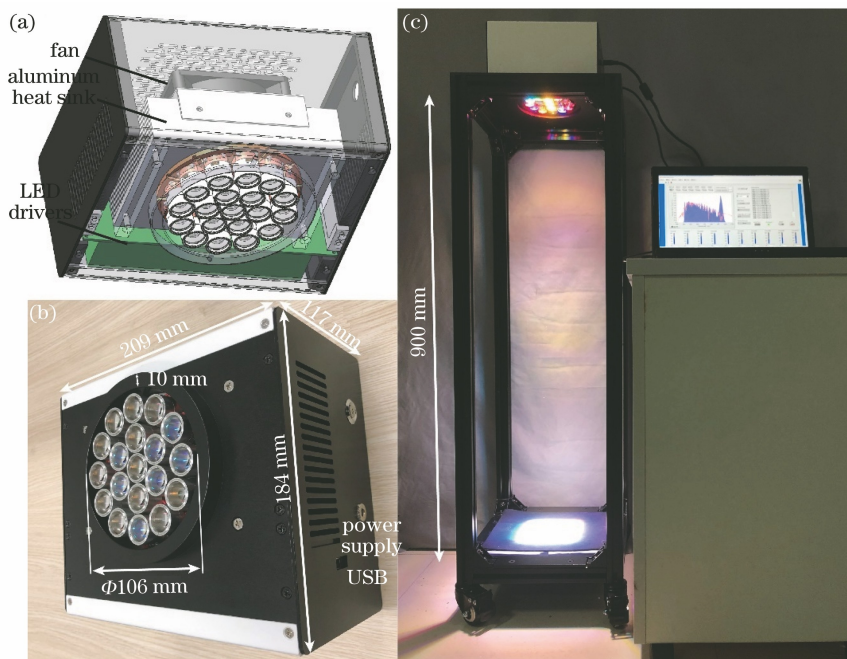


图 8 太阳模拟器的结构示意图。(a)光源箱模型;(b)太阳模拟器实物;(c)实验装置

Fig. 8 Structure diagram of solar simulator. (a) Light source box model; (b) physical solar simulator; (c) experimental equipment

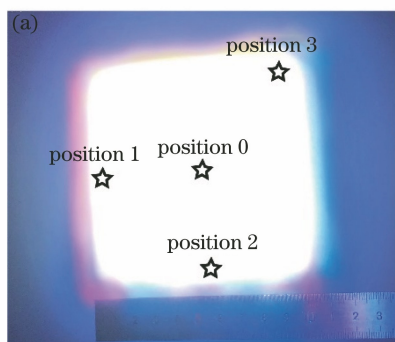
表 3 太阳模拟器的光源参数

Table 3 Light source parameters of solar simulator

| Peak wavelength / nm | Full width at half maximum / nm | Current / A | Voltage / V | Simulated optical power / mW | Measured optical power / mW | Irradiance / (mW · cm ⁻²) |
|----------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 422 | 26.0 | 0.60 | 3.35 | 608 | 676.0 | 5.090 |
| 447 | 19.8 | 0.47 | 3.09 | 484 | 512.0 | 3.980 |
| 464 | 38.0 | 0.89 | 3.19 | 704 | 608.0 | 5.830 |
| 488 | 40.6 | 1.85 | 3.61 | 658 | 825.0 | 5.380 |
| 514 | 31.1 | 0.85 | 3.75 | 453 | 345.0 | 3.730 |
| 600 | 18.0 | 0.39 | 2.34 | 142 | 115.0 | 1.177 |
| 622 | 18.5 | 0.49 | 2.42 | 321 | 302.0 | 2.680 |
| 665 | 23.2 | 0.39 | 2.31 | 339 | 315.0 | 2.830 |
| 679 | 26.9 | 0.75 | 2.40 | 400 | 390.0 | 3.280 |
| 708 | 21.7 | 1.30 | 2.38 | 560 | 596.0 | 4.630 |
| 741 | 22.3 | 0.70 | 3.44 | 561 | 518.0 | 4.620 |
| 789 | 32.2 | 1.03 | 3.83 | 765 | 643.0 | 6.330 |
| 828 | 35.1 | 1.01 | 2.02 | 640 | 715.0 | 5.270 |
| 860 | 35.3 | 0.91 | 3.24 | 751 | 808.0 | 6.220 |
| 954 | 45.3 | 1.13/1.27 | 3.29/3.30 | 900/900 | 1118.0/1131.0 | 7.460/7.420 |
| 568 | 115.2 | 1.18/0.90/ 0.96 | 3.33/3.18/ 3.26 | 978/978/978 | 911.3/917.0/ 886.0 | 8.100/8.080/ 8.020 |

3.3 光谱匹配度

在标准条件(辐照度为 100 mW/cm², 温度为 25 °C)下, 正方形光斑的边长 L 约为 104 mm, 如图 9(a)所示。结合式(9)和式(10)可知, 三层结构、半径 $r=50$ mm 的光源在工作距 $R=900$ mm 的靶面上, 光斑沿边长方向的发散全角 $\gamma = \pm 6.47^\circ$, 其



与图 5 的仿真结果 $\pm 6.3^\circ$ 吻合。

按照 IEC 设计的光谱测试方案, 在图 9(a)的标记位置处进行光谱测量。USB4000 型光纤光谱仪所测量的相对辐照度如图 9(b)所示, 光谱匹配度如表 4 所示。从图 9 和表 4 可以看到, 光斑的光谱匹配度符合 A 级标准。

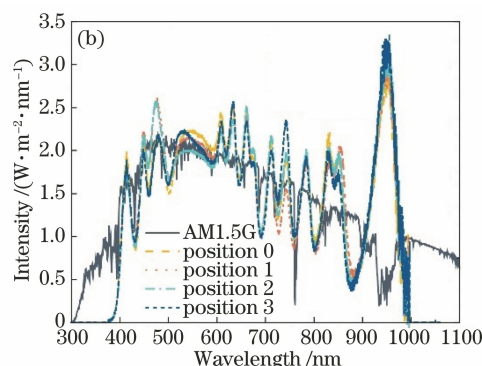


图 9 太阳模拟器的测试结构。(a)输出光斑, 其中五角星代表光谱测量点的位置; (b)图(a)中不同测量点的光谱匹配度
Fig. 9 Test structure of solar simulator. (a) Output light spot, where pentacle represents position of spectral measuring point; (b) spectral matching of different measuring points in Fig. (a)

表 4 光谱匹配度

Table 4 Spectral matching

| Wavelength interval / nm | AM 1.5G irradiance / % | Fitted spectral irradiance / % | Position 0 / % | Position 1 / % | Position 2 / % | Position 3 / % | Class |
|--------------------------|------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| 400–500 | 18.4 | 18.65 | 16.26 | 17.96 | 17.55 | 16.11 | A |
| 500–600 | 19.9 | 20.13 | 20.65 | 20.25 | 19.07 | 20.25 | A |
| 600–700 | 18.4 | 17.67 | 19.39 | 19.07 | 18.89 | 18.80 | A |
| 700–800 | 14.9 | 15.12 | 15.21 | 13.78 | 15.50 | 15.93 | A |
| 800–900 | 12.5 | 12.37 | 12.52 | 12.40 | 12.11 | 11.22 | A |
| 900–1100 | 15.9 | 16.07 | 15.97 | 16.54 | 16.85 | 17.67 | A |

3.4 空间不均匀性

实际 COB 所封装的 LED 晶片由引线焊点导致光斑残缺, 如图 10(a)所示。从图 10 可以看到, 光

斑在引线位置的残缺会导致实际太阳光斑的匀光尺寸比模拟太阳光斑偏小, 进而导致光能传递效率的下降。

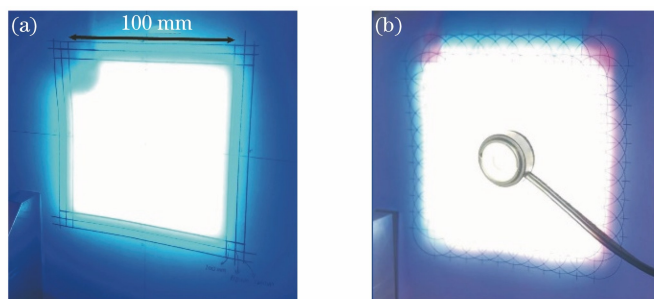


图 10 目标靶面上的实际光斑。(a)峰值波长在 464 nm 的光源光斑(左上角光斑缺口源自 LED 晶片引线焊点); (b)模拟太阳光斑的辐照度探测过程(目标靶面在探头平面上)

Fig. 10 Actual spot of light on target surface. (a) Light spot with peak wavelength of 464 nm (spot notch in upper left corner is from lead solder spot of LED chip); (b) irradiance detection process of simulated solar spot (target surface is on probe plane)

在控制电路中所有 LED 驱动电源均打开的情况下,调整 AM1.5G 光谱的辐照度为 100 mW/cm²。使用 S120VC 型光电二极管探头来测量目标靶面上光斑的辐照度,参考式(11)辐照度空间不均匀性使用测量得到的归一化电流来表征光斑的辐照度。光电二极管中探测器的探头孔径为 9.5 mm,在目标靶面上以 10 mm 为间距来测量辐照度空间不均匀性。如图 11 所示;测量目标靶面中心 100 mm×100 mm 区域内的辐照度,在靶面中心 60 mm×60 mm 的区域内辐照度空间不均匀性为 1.98%,达到太阳模拟器的 A 级标准;在约 80 mm×80 mm 的区域内辐照度空间不均匀性为 4.99%,达到太阳模拟器的 B 级标准。如表 5 所示,A 级、B 级太阳模拟器的有效传递效率分别为 30.2% 和 51.9%,系统的总效率分

别为 7.01% 和 12.04%,这均高于现存的太阳模拟器,但是目前晶片的实际缺陷会导致效率相比模拟值偏低。

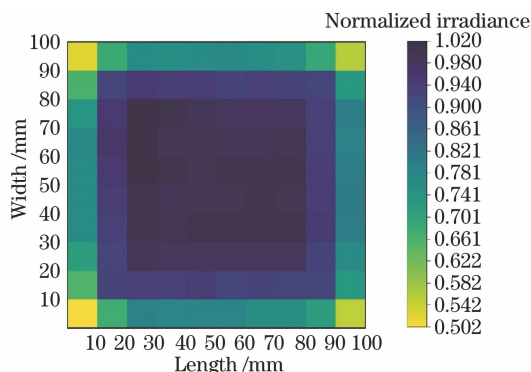


图 11 目标靶面上实测的归一化辐照度

Fig. 11 Normalized irradiance measured on target surface

表 5 系统效率

Table 5 System efficiency

| Non-uniformity | Optical power of LEDs/W | Optical power in uniform area /W | Area / (mm×mm) | Effective efficiency of light transmission /% | Efficiency of system /% |
|----------------|-------------------------|----------------------------------|----------------|---|-------------------------|
| Simulation | 12.12 | 8.65 | 93×93 | 71.4 | — |
| <2% | 12.33 | 3.60 | 60×60 | 30.2 | 7.01 |
| <5% | 12.33 | 6.40 | 80×80 | 51.9 | 12.04 |

3.5 时间不稳定性

在 25 °C 的暗室中开启仪器并预热 30 min,在光斑中心使用 S120VC 型探头来测量系统的不稳定性。如图 12 所示,在 1000 h 的时间内测量得到的辐照度同样采用归一化电流来表示,计算出辐照度的不稳定性低于 1.15%,达到时间不稳定性的 A 级标准。此外,LED 光源用光通量衰减至初始光通量的 70% 来表示其寿命,LED 的平均寿命一般都在数万小时以上。在长期的使用与测量过程中,如 10000 h 以上的使用期限可以增加反馈回路来提高 LED 光源的驱动电流,从而弥补 LED 的部分光通

量衰减,进而实现 LED 太阳模拟器在其寿命期限内的辐照度稳定。

4 结 论

本文设计了一种专门用于器件与材料的长期光浸泡与耐久度测试的太阳模拟器,器件具有体积小、工作距离大的优点,便于安装在其他控制与测试设备上。实验搭建了三层光源结构,光束的发散全角为±6.47°。在靶面中心的 60 mm×60 mm 区域内实现 1 个太阳常数的 AAA 级照明,在 80 mm×80 mm 区域内系统的有效光能利用率达到 51.9%,1000 h 时间内辐照度的不稳定性低于 1.15%。本设计在光源结构与光谱范围上具有可扩展性,可实现更高辐照度的照明,以及更大范围的光谱模拟。

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 S, Zhang G Y, Fu Y, et al. New development of solar simulator [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070003.
- [2] Huang X N, Kocaefe D, Kocaefe Y, et al. Study of the degradation behavior of heat-treated jack pine (Pinus banksiana) under artificial sunlight irradiation

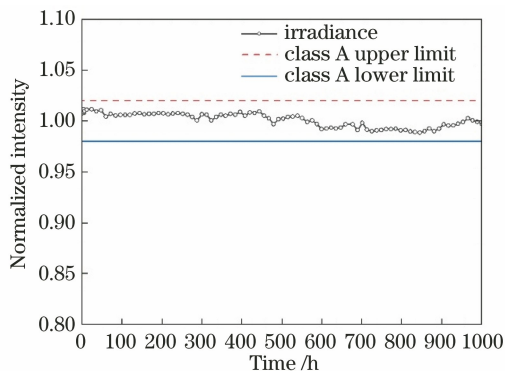


图 12 辐照度的时间不稳定性

Fig. 12 Temporal instability of irradiance

- [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, 97(7): 1197-1214.
- [3] Lyu H, Hisatomi T, Goto Y, et al. An Al-doped SrTiO₃ photocatalyst maintaining sunlight-driven overall water splitting activity for over 1000 h of constant illumination[J]. *Chemical Science*, 2019, 10(11): 3196-3201.
- [4] Wang R, Mujahid M, Duan Y, et al. A review of perovskites solar cell stability [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(47): 1808843.
- [5] Leijtens T, Eperon G E, Noel N K, et al. Stability of metal halide perovskite solar cells[J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(20): 1500963.
- [6] Arora N, Dar M I, Hinderhofer A, et al. Perovskite solar cells with CuSCN hole extraction layers yield stabilized efficiencies greater than 20% [J]. *Science*, 2017, 358(6364): 768-771.
- [7] Turren-Cruz S H, Hagfeldt A, Saliba M. Methylammonium-free, high-performance, and stable perovskite solar cells on a planar architecture [J]. *Science*, 2018, 362(6413): 449-453.
- [8] 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): 070003.
Su S, Zhang G Y, Wang L Y, et al. Solar simulators based on light emitting diodes [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070003.
- [9] Kohraku S, Kurokawa K. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator[C]//3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11-18, 2003, Osaka, Japan. New York: IEEE Press, 2003: 1977-1980.
- [10] Linden K J, Neal W R, Serreze H B. Adjustable spectrum LED solar simulator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9003: 900317.
- [11] 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.
- [12] Tavakoli M, Jahantigh F, Zarookian H. Adjustable high-power-LED solar simulator with extended spectrum in UV region [J]. *Solar Energy*, 2021, 220: 1130-1136.
- [13] 苏拾, 张国玉, 王凌云, 等. 基于LED阵列光源的太阳模拟器[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 307-315.
Su S, Zhang G Y, Wang L Y, et al. Solar simulator based on LED array light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 307-315.
- [14] Al-Ahmad A Y, Holdsworth J, Vaughan B, et al. Modular LED arrays for large area solar simulation [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2019, 27(2): 179-189.
- [15] Song J Y, Zeng R M, Xu D Y, et al. A compact AAA-compatible multispectral solar simulator based on spherical cap chamber [J]. *Solar Energy*, 2021, 220: 1053-1064.
- [16] 苏拾, 王逸文, 张国玉, 等. 运动式太阳模拟器LED阵列光源及其准直光学系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0808001.
Su S, Wang Y W, Zhang G Y, et al. Design of LED array light source and collimating optical system for mobile solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0808001.
- [17] Stuckelberger M, Perruche B, Bonnet-Eymard M, et al. Class AAA LED-based solar simulator for steady-state measurements and light soaking [J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(5): 1282-1287.
- [18] 苏拾, 孟凡琳, 张国玉, 等. 氙灯光源太阳模拟器辐照衰减器设计方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0208001.
Su S, Meng F L, Zhang G Y, et al. Design method of irradiance attenuator for solar simulator of xenon lamp [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0208001.
- [19] 王广才, 林兴, 顾晨, 等. 用于太阳模拟器的新型匀光器[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2436001.
Wang G C, Lin X, Gu C, et al. New type of uniform light device for solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2436001.
- [20] 杜志强, 张黎明, 司孝龙, 等. 大面积投影式太阳模拟器的光学设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0623003.
Du Z Q, Zhang L M, Si X L, et al. Optical design of large-area projection solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0623003.
- [21] 孙超, 金志樑, 熊大曦. 一种集光准直装置及准直照明系统: CN213178202U[P]. 2021-05-11.
Sun C, Jin Z L, Xiong D X. A light-collecting collimating device and collimating lighting system: CN213178202U[P]. 2021-05-11.
- [22] Photovoltaic devices-part 9: classification of solar simulator characteristics: EN IEC 60904-9-2020[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2020.