文章编号:1000-7032(2019)05-0635-08

多波段 LED 太阳模拟器及其测试系统的研制

李 超^{1,2}, 邵剑波^{1,2}, 席 曦^{1,2*}, 朱益清^{1,2}, 刘桂林^{1,2}, 王 晓^{1,2}, 钱维莹^{1,2}, 陈如龙³, 朱华新^{1,2}, 李果华^{1,2} (1. 江南大学理学院, 江苏无锡 214000; 2. 江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏无锡 214000; 3. 无锡尚德太阳能电力有限公司, 江苏无锡 214000)

摘要:为了克服传统氙灯太阳模拟器成本高、寿命短、功耗大等缺点,提高太阳电池测试的准确性,本文首先 设计了一种基于11种波段的 LED 太阳模拟器,在光谱匹配度、不均匀度和不稳定度上均达到 IEC60904-9-2007 规定的 A 级标准。在此基础上,开发了配套的太阳电池测试系统,经过光源控制、数据处理、温度修正以 及参数计算,得到太阳电池的电特性参数。实验结果表明,系统可以准确测得单晶硅太阳电池片的各项参 数,且结果稳定,从而验证了光源的可靠性及测试方法的科学性。

关键词:太阳模拟器; LED; 测试; 温度修正
 中图分类号: TM914.41
 文献标识码: A
 DOI: 10.3788/fgxb20194005.0635

Development of LED Solar Simulator and Solar Cell Test System

LI Chao^{1,2}, SHAO Jian-bo^{1,2}, XI Xi^{1,2*}, ZHU Yi-qing^{1,2}, LIU Gui-lin^{1,2},

WANG Xiao^{1,2}, QIAN Wei-ying^{1,2}, CHEN Ru-long³, ZHU Hua-xin^{1,2}, LI Guo-hua^{1,2}

(1. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214000, China;

2. Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, Wuxi 214000, China;

3. Wuxi Suntech Solar Power Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

* Corresponding Author, E-mail: xi. xi@ jiangnan. edu. cn

Abstract: The commonly-used xenon solar simulator has the disadvantage of high cost, short life circle and high power consumption. In order to improve the accuracy of the solar cell test, a multi-wavelength LED solar simulator was designed. The spectral matching, non-uniformity and instability of the irradiance satisfy the class A standard specified in IEC60904-9-2007. Moreover, a corresponding solar cell test system was developed, having the function of light source control, data processing, temperature calibration and parameter calculation. The experiment results showed that the electrical characteristics of monocrystalline sili-con solar cell could be accurately obtained, and the results were stable, comfirming the reliability of the light source and the scientificalness of the test method.

Key words: solar simulator; LED; test; temperature calibration

1 引

太阳模拟器作为一种人工光源,能够提供自

然光所具有的辐照特性,广泛用于太阳能电池的 检测与标定^[1]。目前,太阳电池的测试光源大部 分采用的是传统的氙灯^[24],这种光源经过光谱

言

收稿日期: 2018-05-21;修订日期: 2018-09-12

修正可以满足测试所需,但是它在近红外波段的 光谱较强,且成本高、寿命短、功耗大^[5-6]。发光 二极管(LED)是一种成本低、能耗小、寿命长的光 源,相比于氙灯,还具有光强可控的特点^[5]。根 据光谱叠加原理,通过调节不同 LED 光源的组分 比例,可以实现对日光光谱的模拟^[78]。2003年, 日本东京农工大学的 Kohraku 和 Kurokawa 采用 多种小功率 LED,首次研制出了基于 LED 光源的 太阳模拟器^[9]。2008年,李果华发布了国内首个 太阳模拟器^[9]。2008年,李果华发布了国内首个 太阳模拟器^[9]。自此,LED 太阳模拟器开始受到 关注并取得了巨大的研究进展。由于 LED 的可 控性,该太阳模拟器兼具了单色光测试、稳态瞬态 测试等功能,这是传统氙灯模拟器无法做到的,也 正因为如此,开发一套新的测试系统就显得尤为 必要。

本文设计出一种基于 11 种波段 LED 的太阳 模拟器,经过交流-直流(AC-DC)变换以及降压电 路之后,实现了各个波段 LED 的单独可调,最终 在光谱匹配、辐照不均匀度和辐照不稳定度上均 达到 IEC60904-9-2007^[11]规定的 A 级标准^[12-13]。 为了提供配套的测试系统,基于 National Instruments[™]公司的虚拟仪器开发软件 Labview、数学 软件 MATLAB 以及数据采集卡,开发出太阳电池 测试系统。该系统可以实时获取太阳电池的 *I-V* 特性曲线、开路电压、短路电流、填充因子、光电转换效率等性能参数,同时可以对多波段的 LED 进行控制。此外,研究发现,测试过程中的环境温度、辐照温度等因素会对太阳电池的开路电压、短路电流等参数造成影响^[14-15],为了提高测试的准确性,需要修正温度带来的测试误差,因此编写了温度修正算法,将测试数据修正到标准测试条件。通过实验验证,系统可以对硅太阳电池片进行准确的测试。

2 系统组成

系统组成如图 1 所示,整体可以分为三部分。 首先太阳模拟器作为光源,为太阳电池提供稳定 可靠的辐照,且各参数均达到了 AM1.5 标准^[11]。 其中,直流稳压电源完成 AC-DC 变换,降压电路 具有 5A 负载驱动能力,切合本系统的需求。

其次,采样电路将太阳电池的电流输出转化 为电压信号,并通过仪表放大器进行滤波放大,数 据采集卡对电压进行采集,并通过串口传送至 PC 端。

最后,在测试软件中进行数据处理,同时温度 探测模块采集到的实时温度可用于太阳电池的参 数修正。此外,软件可以通过继电器对 LED 进行 开关控制,以满足不同条件的测试需求。



图 1 系统组成 Fig. 1 System composition

3 LED 太阳模拟器设计

3.1 模拟器指标

太阳模拟器的指标主要涉及到光谱匹配、辐照不均匀度、长期不稳定度3个参数。中国太阳 模拟器通用标准^[16]与英国 IEC60904-9-2007^[11] 中都对太阳模拟器的等级及其对应指标作出了明 确规定。太阳电池的标准测试条件要求在辐照面 上满足 AM1.5 太阳光谱辐照度分布,且达到 1000 W/m²的光功率。常规单晶硅太阳电池片 的面积为159 mm×159 mm,因此本文选用该区 域作为测试面。

3.2 光谱匹配实现

为了实现各个波段范围的光谱匹配,采用11

种单色大功率 LED 作为光源,组合成对称的 LED 阵列。本设计采用的 LED 型号为欧司朗 SOLERIQ 单色系列。由于 LED 可控性强,光强可以通过调节 驱动电流进行控制,最终将各个波段范围的比重调 节至满足 A 级标准,测试结果如图 2 所示。





Fig. 2 Spectral distribution of LED solar simulator

3.3 不均匀度实现

辐照不均匀度的计算公式为:

$$E = [(E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) / (E_{\text{max}} + E_{\text{min}})] \times 100\%,$$
(1)

其中, *E*_{max} 是有效辐照范围内测得的最大辐照强度, *E*_{min} 是有效辐照范围内测得的最小辐照强度。 辐照不稳定度是指在指定测试点上辐照强度的波动。由于太阳电池的短路电流可以直接反映辐照 光的强度, 因此调节过程中, 利用规格为 2 cm × 2 cm 且标定过的硅太阳电池片进行短路电流测试, 将辐照面划分为 64 个面积相同的区域, 根据测试 结果绘制了分布热图, 如图 3 所示。经计算, 在辐 照面上的不均匀度为 1.81%, 满足 A 级标准。





3.4 长期不稳定度

IEC60904-9-2007标准规定的3个不稳定度 测试点如图4(a)所示,P1点位于测试面中心,P3 点位于测试面顶点,P2点为P1、P3连线上的任意 一点。在辐照面上用标定过的太阳电池片测试短 路电流的波动情况,测试结果如图4(b)。P1、P2、P3 3个点的长期不稳定度分别为0.997%、0.630%、 0.875%。



- 图 4 辐照不稳定度。(a)测试点分布示意图;(b)测试 结果。
- Fig. 4 Instability of the irradiance. (a) Distribution point of instability test of irradiance. (b) Test result.

4 硬件设计

4.1 测试方法

太阳电池是恒流源^[17],测试过程中,通过不 断改变外加负载可以达到改变测试回路电流的目 的^[18],从而得到回路的*I、V*数据。由图5所示的 伏安特性曲线可知,当负载为0时,等效为太阳电 池的短路状态,此时的回路电流即为短路电流;当 负载趋近于∞时,等效为太阳电池的开路状态,此 时的负载电压值即为开路电压。



但是,直接改变负载的测试方法存在如下问题:负载变化通常不连续,且不存在理想状态下阻值为0的负载。因此,可以采用外加偏压的方法,用于抵消光电压,这种方法具有以下优点:

(1)实现了电压的连续变化,等效于负载的 变化过程;

(2)负载电压可以由程序控制,且步长、方向 可调,能够满足不同条件下的电池片测试需要 (如正反向扫描)。 设回路电流为 *I*,数据采集卡的输入电压为 *U_i*,则:

$$U_i = kIR, \qquad (2)$$

其中,k为采样电路的放大倍数,R为采样电阻的 阻值。当外加偏压 U₀ 从 0 增大到直至回路电流 为 0 时,即完成了一次测试扫描。

4.2 采样电路

本系统中采样电路完成了电流采集的功能, 兼具硬件滤波作用。原理图如图6所示。





5 软件设计

软件设计流程图如图 7 所示。主要过程包 括:参数设定、采样、数据处理、参数计算和修正。





5.1 数据处理

为了得到更为精确的太阳电池参数,首先要 对数据进行软件滤波,以去除数据噪点,得到更为 理想的测试数据。使用 MATLAB 的移动平均滤 波算法可以实现数据的去噪和平滑化,有利于进 行参数计算。其次,进行回路电流的还原。数据 采集卡采集到的是经过放大后的采样电阻电压 值,因此利用公式(2)可将其还原为电流值。信 号采集过程中,利用移位寄存器,不断更新采集数 据并同步显示,最终将处理后的数据保存至本地, 方便后续的参数计算。各参数的具体计算方法在 MATLAB script 中实现。

5.2 修复算法

太阳电池的参数会随温度变化,具体表现为: 随着温度的升高,开路电压减小,短路电流增加, 太阳电池效率降低^[19-20]。机理为:温度上升时, 禁带宽度下降,导致暗电流增加,开路电压降低, 同时更多的光生载流子被激发,串联电阻下降,短 路电流增加。两者共同作用下,效率产生衰 减^[20]。由此可见,如何克服温度带来的影响就显 得至关重要。此外,测试参数还会由于光谱失配 产生误差^[21],但是由于本文所用的 LED 太阳模 拟器光源的光谱匹配度满足 A 级标准,所以产生 的误差可以忽略不计。

太阳电池测试过程中,引起温度变化的因素主 要是模拟器辐照。通过温度采集模块可以实时获取 测试面的温度,进而通过计算,将测试数据修正到25 ℃条件下。光伏器件实测特性和辐照度修正方法标 准(IEC 60891-2009)提出的修正公式^[22]为:

$$I_2 = I_1 + \alpha (T_2 - T_1), \qquad (3)$$

 $V_2 = V_1 + \beta(T_2 - T_1) - kI_2(T_2 - T_1),$ (4) 其中,α 是短路电流的温度系数,β 是开路电压的 温度系数,k 是曲线修正因子。对于本测试系统, I_1,V_1 分别是标准温度(25 ℃)下的测试数据, $I_2,$ V_2 分别是将 T_2 条件下的数据修正后的结果。

经过不同温度下的测试以及 MATLAB 程序 的拟合,得到开路电压、短路电流与温度的关系如 图 8 所示。

调整 k 的值, 使得 8 组 I-V 曲线最大功率的 极差最小。结果证明, 不同温度下的数据可以很







好地修正到 25 ℃条件下,如图 9 所示。 最终确定的修正公式如下:

$$I_2 = I_1 + 0.0005(T_2 - 25), \qquad (5)$$

$$V_2 = V_1 - (2.4357e - 4)(T_2 - 25) -$$

$$(3.8e - 6)I_2(T_2 - 25).$$
 (6)



Fig. 9 Temperature calibration result. (a) Before calibra-

tion. (b) After calibration.

6 测试结果

使用 LED 太阳模拟器和测试软件对 159 mm × 159 mm 的单晶硅太阳电池片进行测试,测试界面 如图 10。

对电池片在同一条件下进行5组测试,结果 如表1(电池片为无锡尚德太阳能电力有限公司 提供的单晶 PERC 电池)。

对电池片分别在 25,35,45,55 ℃4 个不同温 度下进行 4 组测试,结果如表 2。

由表1可知,各项参数测试结果的标准差均在0.205%以内,说明测试结果稳定,验证了测试 系统的稳定性。由表2可知电池效率的相对误差 最大为0.64%,相比于图9(a)中未修正的结果, 各参数误差均有所降低,说明系统可以在短时间 内对曲线进行修正和参数计算,证明实验所用的 光源是稳定的,且测试软件的修复算法可以达到 预期目的。



图 10 测试界面

Fig. 10 Test interface

表1 测试结果1

Tab. 1 Test result 1

组别	开路电压/V	短路电流/A	最大功率/W	填充因子	效率/%
1	0.677	9.419	4.981	0.781	20.541
2	0.678	9.419	4.982	0.780	20.571
3	0.678	9.421	4.985	0.780	20.576
4	0.678	9.418	4.981	0.780	20.569
5	0.677	9.418	4.985	0.782	20.539
标准差	0.000 55	0.001 22	0.002 05	0.000 89	0.000 31

表 2 测试结果 2

Tab. 2 Test result 2

温度/℃	开路电压/V	短路电流/A	最大功率/W	填充因子	效率/%	效率相对误差/%	•
25	0.678	9.419	4.981	0.780	20.541	—	
35	0.672	9.526	4.981	0.778	20.591	+0.24	
45	0.667	9.536	4.882	0.768	20.459	-0.40	
55	0.665	9.542	4.923	0.776	20.410	-0.64	

7 结 论

本文利用多种波段组成的 LED 阵列、光学 系统以及自主设计的 LED 驱动电路,开发出满 足太阳电池测试所需的太阳模拟器,且在光谱 匹配、不均匀度、不稳定度上满足 IEC60904-9-2007 规定的 A 级标准。同时,自主设计了配套 的测试系统,兼具光源控制、数据处理、温度修 正、参数计算功能。经实验测试,光源和测试系 统均可以稳定运行,且测试结果的误差很小,完 全可以满足实际测试要求。此外,相比于传统 的测试系统,成本大大降低,可满足实际工业和 生产中的测试需求。

致谢:感谢南京黛傲光电科技公司对本文工 作提供的支持,感谢无锡尚德太阳能电力有限公 司为本文实验提供的电池片。

参考文献:

[1]苏拾,张国玉,王凌云,等. 基于 LED 的太阳模拟器研究现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2018,55(4):040003-1-18.

SU S,ZHANG G Y, WANG L Y, et al. Research progress in solar simulators based on LEDs [J]. Laser Optoelectron. Prog., 2018,55(4):040003-1-18. (in Chinese)

- [2] 王元,张林华. 一种新型全光谱太阳模拟器设计 [J]. 太阳能学报, 2006,27(11):1132-1136.
 WANG Y,ZHANG L H. Design of a new type of full-spectrum solar simulator [J]. Acta Energ. Solar. Sinica, 2006, 27(11):1132-1136. (in Chinese)
- [3] BARI D, WRACHIEN N, TAGLIAFERRO R, et al. Reliability study of dye-sensitized solar cells by means of solar simulator and white LED [J]. Microelectron. Reliabil., 2012,52(9-10):2495-2499.
- [4] RIEDEL N, PRATT L, EDLER A, et al. Effects of a neutral density filter in measuring low-light performance with a pulsed light Xe arc solar simulator [C]. Proceedings of The 42nd Photovoltaic Specialist Conference, New Orleans, LA, USA, 2015: 1-4.
- [5] ESEN V, SAĞLAM Ş, ORAL B. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: a review [J]. Renew. Sustain. Energy Rev., 2017,77:1240-1250.
- [6] DOBROWOLSKI J A. Optical interference filters for the adjustment of spectral response and spectral power distribution [J]. Appl. Opt., 1970,9(6):1396-1402.
- [7]徐广强, 于慧媛, 张竞辉, 等. 基于单色 LED 补偿白光 LED 技术的模拟太阳光谱研究 [J]. 发光学报, 2017, 38(8):1117-1124.
 XU G Q, YU H Y, ZHANG J H, et al.. Solar spectrum matching based on white LED Compensated with monochromatic LEDs [J]. Chin. J. Lumin., 2017,38(8):1117-1124. (in Chinese)
- [8] WU C C, HU N C, FONG Y C, et al. Optimal pruning for selecting LEDs to synthesize tunable illumination spectra [J]. Light. Res. Technol., 2012,44(4):484-497.
- [9] 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, Osaka, Japan, 2003:1977-1980.
- [10] 李果华,钱维莹. LED 太阳模拟器:中国,CN 101290340 A [P]. 2008-04-29. LI G H,QIAN W Y. LED solar simulator: China, CN 101290340 A [P]. 2008-04-29. (in Chinese)
- [11] International Electrotechnical Commission. BS EN 60904-9:2007 Photovoltaic Devices: Part 9. Solar Simulator Performance Requirements [S]. Netherlands, 2007.
- [12] CHONG K K, KHLYABICH P P, HONG K J, et al. Comprehensive method for analyzing the power conversion efficiency of organic solar cells under different spectral irradiances considering both photonic and electrical characteristics [J]. Appl. Energy, 2016,180:516-523.
- [13] 杜景龙,唐大伟,黄湘. 太阳模拟器的研究概况及发展 [J]. 太阳能学报, 2012,33(S1):70-76.
 DU J L, TANG D W, HUANG X. Research status and future development of solar simulator [J]. Acta Energ. Solar. Sinica, 2012,33(S1):70-76. (in Chinese)
- [14] CHANDER S, PUROHIT A, SHARMA A, et al. A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature [J]. Energy Rep., 2015, 1:104-109.
- [15] 袁明翰,刘文祥,徐正元,等. 太阳电池 I-V 曲线修正参数的确定方法 [J]. 电源技术, 2013,37(1):58-61.
 YUAN M H,LIU W X,XU Z Y, et al. A method of I-V curves correction parameters determination for PV modules [J].
 Chin. J. Power Source., 2013,37(1):58-61. (in Chinese)
- [16] 国家技术监督局. GBT12637-1990 太阳模拟器通用规范 [S]. 北京:中国标准出版社, 1990.
 State Administration for Market Regulation. GBT12637-1990 General Specification for Solar Simulator [S]. Beijing:Standards Press of China, 1990. (in Chinese)
- [17] ORTIZ-CONDE A, SÁNCHEZ F J G, MUCI J. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated *I-V* characteristics [J]. Solar Energy Mater. Solar Cells, 2006,90(3):352-361.
- [18] 潘涛. 基于虚拟仪器和 Matlab 的太阳能电池测试系统 [D]. 武汉:华中科技大学, 2008.

PAN T. The Testing System of Solar Cell Based on Virtual Instrument and Matlab [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)

- [19] WEN C, FU C, TANG J L, et al. The influence of environment temperatures on single crystalline and polycrystalline silicon solar cell performance [J]. Sci. China Phys., Mech. Astron., 2012,55(2):235-241.
- [20] 刘锋,黄建华,陈军,等. 温度对晶体硅太阳电池模型参数的影响 [J]. 太阳能学报, 2012,33(7):1154-1157. LIU F,HUANG J H,CHEN J,*et al.*. Affect of temperature on silicon solar cell parameters [J]. *Acta Energ. Solaris Sinica*, 2012,33(7):1154-1157. (in Chinese)
- [21] SEAMAN C H. Calibration of solar cells by the reference cell method—the spectral mismatch problem [J]. Solar Energy, 1982,29(4):291-298.
- [22] IEC. BS EN 60891:2010 Photovoltaic Devices. Procedures for Temperature and Irradiance Corrections to Measured I-V Characteristics [S]. Geneva: IEC, 2009:6-7.



李超(1993 -),男,山西吕梁人,硕 士研究生,2016 年于东北大学获得 学士学位,主要从事太阳电池及其 相关设备方面的研究。 E-mail: lclylsr@163.com



席曦(1984-),男,江苏苏州人,博士, 副研究员,硕士生导师,2012 年于江 南大学获得博士学位,主要从事太阳 能光伏电池的研究。

E-mail: xi. xi@ jiangnan. edu. cn