

# 简易太阳能电池性能测试仪的研制

赵徐禛<sup>1</sup>, 陈佳玥<sup>1</sup>, 黄仕华<sup>1</sup>, 蒋洪奎<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 浙江 金华

<sup>2</sup>浙江师范大学行知学院, 浙江 金华

收稿日期: 2022年8月6日; 录用日期: 2022年9月12日; 发布日期: 2022年9月19日

## 摘要

为降低太阳能电池性能测试的成本以及提高实验结果的精确程度, 通过利用常用的LED投影仪来进行对太阳光的模拟, 并通过简单的电路连接, 测试获得标准太阳能电池板在不同RGB颜色光照下的特性曲线, 以此计算该电池的开路电压、短路电路、填充因子、光电转换效率等关键数据。最终获得相对可行和精确度较高的低成本太阳能电池测试仪方案。

## 关键词

LED投影仪, 太阳能电池性能测试, 简易太阳能电池测试仪

# Development of a Simple Solar Cell Performance Tester

Xuzhen Zhao<sup>1</sup>, Jiayue Chen<sup>1</sup>, Shihua Huang<sup>1</sup>, Hongkui Jiang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

<sup>2</sup>Xingzhi College, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Aug. 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 19<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to reduce the cost of the solar cell performance test and improve the accuracy of the experimental results, the commonly used LED projector is used to simulate the solar light, and through simple circuit connection, the characteristic curve of the standard solar cell panel under different RGB color illuminations is obtained through the test, so as to calculate the open circuit voltage, short circuit circuit, filling factor, photoelectric conversion efficiency and other key data of the battery. Finally, a relatively feasible and high-precision low-cost solar cell tester is obtained.

\*通讯作者。

## Keywords

### LED Projector, Solar Cell Performance Test, Simple Solar Cell Tester

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来伴随着半导体器件的不断发展,人们对于太阳能作为可再生清洁能源的认识和重视程度也在不断加深,光伏器件在市场上越来越多见。如何高效、稳定、安全地获取太阳能,成为了各国科学家努力攻克的目标。而与之相对应的,如何模拟太阳光和研制高精度的光伏器件测试仪,成为了比较热门的研究分支。

而在学生实验中,太阳能电池性能的测试是近代物理实验的重要组成部分。在实验室中进行这个实验,往往难以获得标准太阳光的供应,因此需要一个太阳光模拟器。而太阳光模拟器的性能,例如色温、辐照度、与自然阳光的光谱匹配、空间均匀性和时间稳定性等一系列数据,很大程度地影响着实验测试结果的精确性和可信度。因此,获得较高精度的同时降低模拟器成本,成为了众多光伏工作者的目标之一。本文就是想利用生活中随处可见的光源(如 LED 投影仪等)和简单电路,在低成本条件下尽可能地获得精度、并达到一定标准的太阳能电池测试仪。

当然,对学生实验来说,模拟太阳光的条件相对宽松,通常的做法是使用碘钨灯或者氙灯作为光源。但作为学生实验,这依然是一个成本相对较高的耗材,同时钨丝灯寿命短,辐射热量严重等问题都会对实验产生极大的影响。太阳光的色温约为 6000 K,而钨丝白炽灯的色温通常不超过 2800 K,否则灯丝寿命会大大缩短。白炽灯使用广泛且价格低廉,但光谱质量较差,与太阳光谱分布相差甚远,根据维恩定律,发射峰值在 2800 K,其对应波长 1030 nm,即在红外区。根据普朗克定律,这意味着灯丝发出的大多数光子根本没有足够的能量来激发太阳能电池中的电子,导致测量出的太阳能电池效率非常低。

迄今为止,出现了多种测试太阳能性能的方法与优化测试体系的装置。陈斌等[1]采用大功率冷光灯做模拟太阳光源,对主机及样品架采取有效的温控措施,利用光强自动跟踪锁定装置保证光强稳定,并使用单板微处理器对测试结果进行联机实时处理,通过实验测出的准确度偏差在 1% 以内。张洪欣等[2]采用脉冲双氙灯方式模拟调节光源,反射膜聚集光线进行反射,漫反射镜使光线入射均匀,以及降温系统等组成一个太阳光模拟器装置。利用计算机软件对采集的数据进行计算和补偿,测出开路电压、短路电流、最大功率点电压和电流等参数,并兼具自动换档功能,通过电阻放大缩小实现了不同规格的太阳能电池测试时的量程自适应的切换。Martínez 等[3]利用金属卤化物灯作为光源,选择抛物面反射器作为聚光器,以便以准直方式将辐射能量传递到平面目标上。设置合适的灯反射子单元的光学排列——六边形排列,利用风扇调节太阳模拟器提供的散热通量,以提供一个完全可控的室内测试环境,通过射线追踪分析集中太阳能,改进了太阳能电池性能测试仪。但这些测试太阳能电池性能的系统大多都用了较为精密的仪器,以追求精确度为目的,忽略了简单、安全、便捷的条件,不适宜用于学生实验室。

在本文中,利用辐射热量小、低成本的普通投影仪作为太阳能电池测试仪的光源,通过简单的电路连接,改变连入的电阻值来进行电压、电流的调节。这样能有效避免上述情况的影响,同时兼具使用便捷、安全性好等适合学生操作的特点,更有助于学生利用太阳能电池测试仪准确测量太阳能电池的性能。

## 2. 测量原理

### 2.1. LED 光源

人们对于发光光源的认识，往往是通过对其光谱进行分析得到的，从而通过光谱鉴别确认其化学组成。而在太阳光模拟中，对太阳光谱的分析，也是确认人们是否获得了类似太阳光的一个重要手段。太阳是能量最强、天然稳定的自然辐射源，内部发生由氢转换成氦的聚核反应，其中心温度为  $1.5 \times 10^7$  K。太阳辐射主要集中在可见光部分(0.4~0.76  $\mu\text{m}$ )，占太阳辐射总量的 50%，红外部分占 43%，紫外部分占 7%。

发光二极管(LED)是目前全世界最主流的人造光源，投影仪、照明灯具、显示屏的背光源系统大多采用 LED 的发光方式，LED 技术的进步以及普及为太阳能模拟光源提供了一种低成本的新方法。LED 发光不受热发射定律的约束，可以在 2500 K(暖白色)到 6000 K(日光)的各种等效色温下使用。

在 LED 加上正向偏压后，从 p 区注入到 n 区的空穴和由 n 区注入到 p 区的电子，在 p-n 结附近分别与 n 区的电子和 p 区的空穴复合，产生自发辐射的光。目前，主流的氮化镓 LED 发出的主要是蓝光，通过蓝光与黄色荧光粉发出的光结合，最后形成白光，这就是所谓的二波长发光(蓝光 + 黄光)模式，也有三波长发光(蓝光 + 绿光 + 红光)的模式。太阳光是连续性光谱，包含整个可见光光谱段，而白光 LED 光谱则不连续，只在 430~680 nm 的区间段，因此 LED 发光光谱受到其发光模式的影响。

### 2.2. 太阳能电池的性能表征

太阳能电池测试仪是测试太阳能电池的各种性能参数，如开路电压( $V_{OC}$ )、短路电流( $I_{SC}$ )、填充因子(FF)、光电转换效率( $\eta$ )等。而为了获得这些数据，我们就需要测试太阳能电池的电流 - 电压(I-V)特性曲线。如图 1 所示，将变阻箱与电池板串联，作为电路负载，再串联一个电流表，并联一个电压表。然后，通过不断改变电阻箱阻值大小，获得一条关于负载的 I-V 曲线，然后经过简单计算获得负载的功率 - 电压(P-V)曲线。

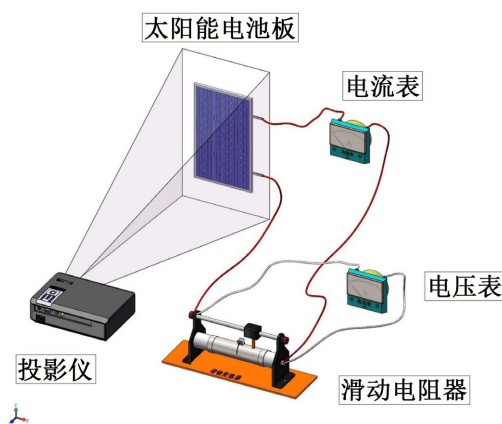


Figure 1. Schematic diagram of simple solar cell performance measurement  
图 1. 简易太阳能电池性能测量示意图

在光照下，电池的最大输出功率时的电流和电压的乘积与短路电流和开路电压乘积的比值称为填充因子 FF，代表了太阳能电池质量的好坏，其计算公式为：

$$FF = \frac{I_{\max} * V_{\max}}{I_{SC} * V_{OC}}$$

其中， $I_{\max}$  和  $V_{\max}$  分别是最大输出功率时的电流和电压。

太阳能电池效率  $\eta$  是照射输入光功率与输出功率的比值, 其计算公式为:

$$\eta = \frac{I_{SC} * V_{OC} * FF}{\text{电池面积} * \text{光照强度}} * 100\%$$

### 3. 实验方法

#### 3.1. 光源准备

采用 LED 投影仪作为测试仪光源, 通过 RGB 色彩模式投影获得不同光谱特性的光源, 从而加以分析获得更优测试仪光源方案。首先在电脑上准备好不同 RGB 色彩模式的投影内容: 白色(255, 255, 255)、蓝色(0, 176, 240)、绿色(33, 255, 44)、黄色(255, 255, 0)和红色(255, 0, 0)。连接至投影仪, 设定初始亮度, 固定投影仪与太阳能电池板的距离, 即可作为对应颜色的光源。

采用紫外可见光积分球测试仪分析 LED 投影仪的光谱特性。对投影光进行光谱分析以及输入光功率测试, 获得如图 2 所示的不同投影光的光谱, 在最后结合实验数据分析并与太阳光照射下的真实情况进行比较, 分析设备的精确性和改进空间, 讨论其光谱匹配程度对实验的整体影响。

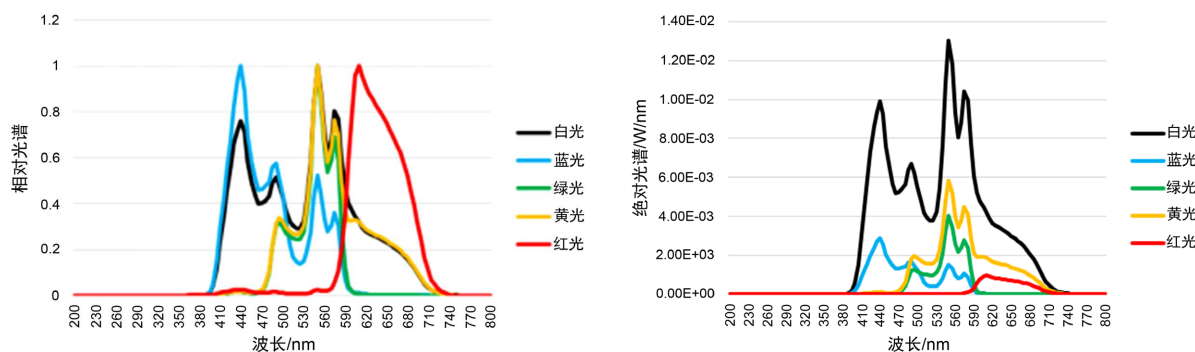


Figure 2. Spectral characteristics of different RGB color modes of LED projectors

图 2. LED 投影仪不同 RGB 色彩模式的光谱特性

从图 2 可以看出, 来自 LED 投影仪的白色照明在可见光中的光谱范围从 380 nm 到 740 nm, 主峰在 440 nm、480 nm、550 nm、575 nm 和 620 nm, LED 投影仪的白色光谱与太阳光的可见光谱非常相似。因此, LED 投影仪可以被用作太阳能电池 I-V 特性测量的太阳能模拟器上的光源。图 2 给出了 LED 投影仪蓝光、绿光、黄光和红光的光谱特性, 照明的蓝色光谱具有从 425 nm 到 590 nm 的波长范围, 最强峰值在 440 nm。绿色和黄色的照明光谱的波长区域分别为 470~590 nm 和 470~710 nm, 最强峰值都位于 550 nm。同时, 红色的照明光谱波长区域分布在 560~720 nm, 在 620 nm 处具有峰值。这些实验结果表明, LED 投影仪上的滤色器功能在过滤和控制特定波长区域输出方面是成功的。

#### 3.2. 电路组装

利用变阻箱和万用表, 组装成如图 1 的电路, 并将太阳能电池板放置于距光源 25 cm 处, 垂直光照方向。最后人工手动调节电阻箱从大到小记录相应的电流、电压数据, 绘制图表并分析。

### 4. 结果与讨论

测试使用的太阳能电池组件样品的有效面积为  $59 \times 56 \text{ mm}^2$ 。在  $25^\circ\text{C}$  温度下, 采用光强为  $100 \text{ mW/cm}^2$  的标准太阳光模拟器(美国 Newport Oriel Sol3A), 样品的测试数据见表 1。从表 1 不难看出, 所采用的太阳能电池板效率较低, 同时填充因子不高, 但相对低廉的价格, 符合我们对低成本学生实验的追求, 因

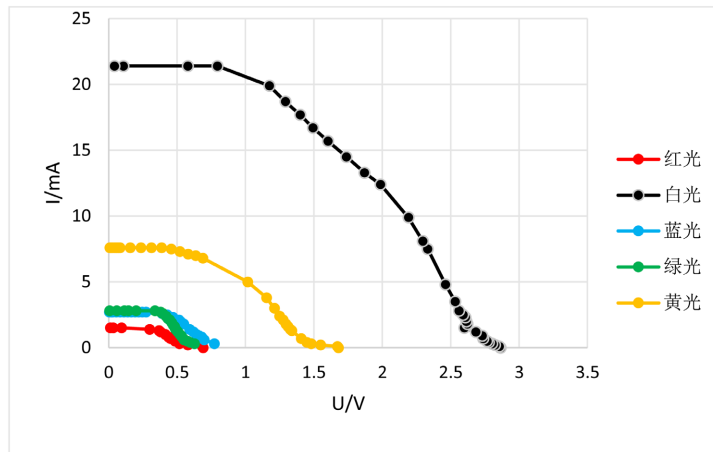
此获得的实验数据也更具参考性。

**Table 1.** Performance parameters of solar cell modules under standard test conditions

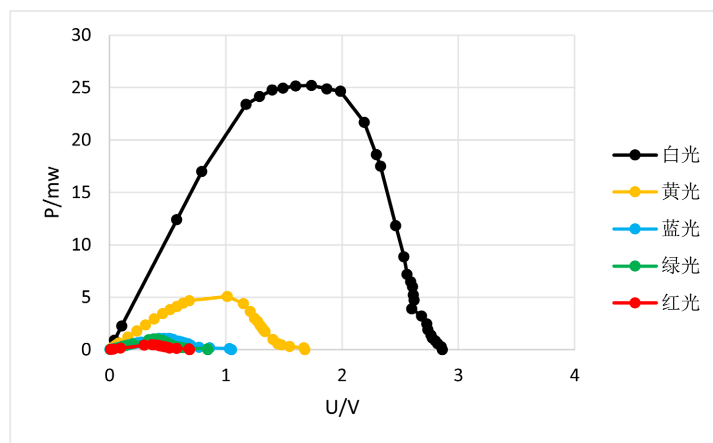
**表 1.** 标准测试条件下测试用的太阳能电池组件的性能参数

$V_{oc}/V$	$I_{sc}/mA$	$I_{max}/mA$	$V_{max}/V$	$FF/\%$	$\eta/\%$
3.638	114	97	2.261	53.09	6.12

太阳能电池板在 LED 投影仪的不同颜色光源照射下, 电池的 I-V 和 P-V 曲线分别如图 3 和图 4 所示, 结合表 2, 可以发现, 普遍存在开路电压和短路电流偏低的情况。在投影仪的蓝光、绿光、黄光、红光照射下, 组件的效率逐渐减少, 它们分别为 4.71%、3.56%、2.95%、1.67%, 蓝光的效率最高, 红光最低。在白光照射下, 组件的效率为 4.27%, 这些数据均小于太阳光测试获得的结果。其中短路电流较小的原因, 我们可以视为是由不同颜色投影光照射在太阳能电池板上的辐照强度不同引起的, 这个情况可以通过提高辐照强度、加大功率等方法改进, 同时也并不影响效率和填充因子的测量。而开压较低的问题, 我们可以结合之前提到的光谱分析加以解释。



**Figure 3.** I-V change curve of battery module under light irradiation of different colors of projector  
**图 3.** 在投影仪不同颜色的光照射下电池组件的 I-V 变化曲线



**Figure 4.** P-V change curve of battery module under light irradiation of different colors of projector  
**图 4.** 在投影仪不同颜色的光照射下电池组件的 P-V 变化曲线

**Table 2.** Performance parameters of battery module under light irradiation of different colors of projector  
**表 2.** 在投影仪不同颜色的光照射下电池组件的性能参数

	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/mA$	$I_{max}/mA$	$V_{max}/V$	$FF/\%$	光强/ $mW \cdot cm^{-2}$	$\eta/\%$
太阳	3.638	114	97.4	2.261	53.09	100.00	6.12
白光	2.863	21.4	14.5	1.737	41.11	49.60	4.27
蓝光	1.051	2.7	2.3	0.470	38.09	1.93	4.71
绿光	0.845	2.8	2.6	0.395	43.41	2.42	3.56
黄光	1.680	7.6	5.0	1.015	39.75	14.48	2.95
红光	0.690	1.5	1.3	0.368	46.22	2.41	1.67

太阳光的光谱范围是从 350 nm 到 1000 nm，同时整体平缓，峰值集中在绿色波段。而 LED 投影仪白色照明的光谱范围为 380 nm 到 740 nm，存在多处峰值。从图 2 中我们不难看出投影光的光谱相对太阳光不够连续，同时存在多处辐照欠饱和的情况，其中以红色波段和紫外波段尤为明显。采用 LED 白光照射测量得到的电池效率比采用标准太阳光的，还有一个主要原因是 LED 白光光强只有太阳光的 50%。而太阳能电池性能对光照颜色的差异是由太阳能电池的响应光谱与光源光照光谱的匹配程度决定的，太阳能电池的效率从 4.71% (蓝色照明)变化到 1.67% (红色照明)，主要是由于将太阳能电池上照明的光子能量从高光子能量改变为低光子能量[4]，蓝色照明产生高能量的光生载流子，而红色照明产生低能量的光生载流子，因此，太阳能电池的能量转换效率( $\eta$ )由照明颜色决定。现在由于使用的是 LED 这种相对匹配性差的光源，导致电池响应灵敏度低，效果较差，最终我们获得数据也与标准数据存在较大差异。

最终，我们发现虽然白光辐照强度是所有光中最接近太阳光的，但其填充因子测量的精度不如红光与绿光，效率的测量精度不如蓝光。其原因大多在于，蓝光和红光的辐照强度随波长变化的相对较为平缓，所以即使和太阳光辐照有很大差距，也依然可以获得较高精度的测量结果，这也和我们之前对光谱的分析相符合。

针对前文提到的情况，太阳能电池测量数据主要存在开压过低和短路电流小的情况，这些误差主要是输入功率低和投影光与太阳光光谱各波段不匹配引起的。因此我们可以通过提高投影仪 LED 输入功率和叠加不同波长的光，来帮助我们拟合出符合太阳光谱的复合光源。或者增设滤波器，通过对光的波长选择，将我们投影的光增益均衡，最终也是为了拟合出近似太阳光谱的光源设备。

针对前文提到短路电流小的情况，我们将投影仪的亮度提高，增强光的辐照强度，并测量对应的 I-V 曲线和输入功率，获得如表 3 的数据。我们可以明显发现，短路电流得到明显提高，更加接近阳光标准值，同时效率也更加接近实验室标准参数的 6.116%，误差从原来的 23.0%优化到了 6.13%。同时部分颜色的填充因子也得到一定程度的改善。

**Table 3.** Performance parameters of battery module under light irradiation of different colors of projector  
**表 3.** 在投影仪不同颜色的光照射下电池组件的性能参数

	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/mA$	$I_{max}/mA$	$V_{max}/V$	$FF/\%$	光强/ $mW \cdot cm^{-2}$	$\eta/\%$
白光	3.138	23.6	15.4	2.176	45.250	96.54	5.561
蓝光	1.309	3.3	2.8	0.665	43.105	2.78	5.741
绿光	1.113	3.0	2.7	0.49	39.623	3.65	3.664
黄光	1.924	7.8	5.9	1.049	41.241	23.62	3.354
红光	0.966	1.5	1.4	0.426	41.160	3.97	1.753

为解决开压过低的情况,我们根据之前获得的光谱分析(见图 2),可以尝试通过增加设备,从而做到不同颜色的光对着同一太阳能电池,做到矢量叠加不同波长的光,例如蓝光加红光、白光加红光等等,这些有利于红色波段的光照辐射饱和,又有助于使得整个曲线相对平缓。或者利用光滤波器,对不同的光进行波长选择,可以帮助我们剔除起伏较大的峰值波段,选择我们所需要的波长进行组合,最终获得我们想要的光谱曲线。可行的方案如利用折射率不同的两层  $1/4$  波长介质膜,通过在两层介质中不同的偏移率,获得多次反射和透射的光的叠加,从而发生干涉,只要调整光波导的长度,便可消去或增强我们想要的波段,选出所需要的波长,使之符合太阳光谱的平缓曲线。

## 5. 结论与应用前景

我们最终成功研制了一种以 LED 投影仪为光源的低成本太阳能电池测试仪,并成功地进行了测试,获得了不同颜色光的太阳能电池参数。在白光下,开压和短路电流最接近实际值,分别为 3.138 V 和 23.6 mA。在蓝光下,效率最佳为 5.741%,与实验室标准值的误差仅为 6%,考虑到实验额外成本几乎为 0,我们认为已经是一个非常可行的学生实验方案。而与之相反的效果最差的红光效率仅为 1.753%,可以为我们后续叠加单色光的讨论提供进一步数据支持。此外,还讨论了测量数据与标准数据的差异,并分析其中原因,发现光源光谱的连续性和饱和性,以及和太阳光谱的匹配性对太阳能测试仪精确度有较大影响,并为后续测试仪的进一步改进提出了方案。总而言之,采用的使用 LED 投影仪作为光源,通过简单的电路连接对太阳能电池的性能进行测试,兼具成本低、易操作、精确度较高、低温安全等优点,该方法可广泛应于学生实验。

## 参考文献

- [1] 陈竑, 韩江源. 多功能太阳电池电性能测试系统[J]. 太阳能学报, 1984(1): 108-112.
- [2] 张洪欣, 王志明, 李磊. 一种智能太阳电池测试仪的研究[J]. 机械与电子, 2006(9): 3.
- [3] Martinez-Manuel, L., Wang, W.J. and Pena-Cruz, M.I. (2021) Optimization of the Radiative Flux Uniformity of a Modular Solar Simulator to Improve Solar Technology Qualification Testing. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **47**, 101372. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101372>
- [4] Agbo, S.N., Merdzhanova, T., Rau, U. and Astakhov, O. (2017) Illumination Intensity and Spectrum-Dependent Performance of Thin-Film Silicon Single and Multijunction Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **159**, 427-434. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.039>