

## LED 作为量子效率仪中单色光的可行性研究

朱小峰, 池梓榕, 胡鹏飞, 欧琳, 王静, 王广才\*

南开大学光电子薄膜器件与技术研究所, 薄膜光电子技术教育部工程研究中心, 天津市电子薄膜器件与技术重点实验室, 新型光伏发电技术国际科技合作基地, 天津市中欧太阳能光伏发电技术联合研究中心, 天津 300350

**摘要** 随着 LED 技术的不断进步, 已发展出多种波长的大功率 LED, 不用昂贵的单色仪, 而采用各种波长的 LED 作为单色光来制造量子效率仪; 也不需要旋转滤色片轮切换滤色片来避免光栅单色仪中高级次光谱的影响。LED 作为单色光, 可实现无机械运动、测量速度快、故障率低的优点。多只 LED 焊接在 PCB 上形成离散型光源, 无法采用常规的椭球面反射镜、透镜或凹面反射镜进行汇聚。采用高反射率反射镜片制备成锥形光导管, 将离散型光源发出的光汇聚为一个小光斑, 可以很好地解决离散型光源汇聚难的问题, 同时实现了高的光利用率。通过测量 LED 的波峰值、半峰宽和稳定性, 并与传统的卤素灯和氙灯为光源的传统量子效率仪进行比较, 发现单色光的波峰值与量子效率的测量准确性是正相关的, 波峰值越高, 测量的准确性越高; 半峰宽在 5.1~9.5 nm 范围内, 半峰宽对测量的准确性没有影响。采用 LED、卤素灯和氙灯量子效率仪分别测试同一块太阳能电池的量子效率, 计算相同波段的积分电流, 与世界先进的氙灯量子效率仪相比, 相对偏差为 0.34%, 与卤素灯量子效率仪的相当, 说明半峰宽在 5.1~55.7 nm 范围内, 测量准确性与半峰宽无明显的相关性; LED 的不稳定度为 0.4%, 介于氙灯和卤素灯之间。从这几个方面来看, LED 是可以作为单色光用于量子效率的测试。

**关键词** 量子效率; LED 光谱; LED 稳定性; 太阳能电池

**中图分类号:** TQ573+.69 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)11-3340-06

### 引言

太阳能为一种可再生的清洁能源, 太阳能电池可将太阳能直接转换为电能, 代替传统发电方式, 用于社会、经济、生活等方面<sup>[1-2]</sup>。量子效率 (quantum efficiency, QE) 是表征太阳能电池吸收不同波长的光子后产生电子-空穴对的能力<sup>[3]</sup>, 是改进电池的工艺和结构、提高太阳能电池转换效率的一种测试手段<sup>[4]</sup>, 是太阳能电池的重要特性参数之一。

为了拓展太阳能电池吸收太阳光谱的范围, 开发出了叠层太阳能电池, 利用不同的子电池来分别吸收不同波段太阳光的能量, 进一步提高太阳能电池的转换效率。叠层太阳能电池中的子电池是串联在一起的, 以子电池中最小电流为叠层电池的限制电流。为了提高叠层电池的转换效率, 需要调节各个子电池的电流并达到电流匹配, 用量子效率仪分别测量叠层电池中每个子电池的电流, 从而指导叠层电池的工艺和结构的

改进, 是叠层太阳能电池研究中不可或缺的探测手段<sup>[5-6]</sup>。

国内外一些机构先后开展了太阳能电池量子效率仪的研究, 其中国内的研究单位有中国科学院长春光学精密机械研究所、云南师范大学; 国外的有美国太平洋西北国家实验室 (Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)、德国 Fraunhofer 太阳能系统研究所 (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems) 和美国 PV Measurements 公司等。PV 公司开发和销售的型号为 QEX10 的量子效率仪, 采用氙灯作为光源, 光路全部采用反射镜构成, 消除了色差的影响, 提高了光的利用率, 其结构紧凑, 测量速度较快, 氙灯在短波段辐照强度较强, 同时仪器的波长重复精度较高, 是传统量子效率仪中性能较好的一款产品。

量子效率仪的工作原理, 是用不同波长的单色光依次照射到已知量子效率的参考太阳能电池上, 产生对应波长的电流, 得到一组波长和电流的数据, 保持单色光的波峰值、半峰宽不变, 再测量样品太阳能电池的电流和波长数据, 二者相

收稿日期: 2019-01-22, 修订日期: 2019-05-12

基金项目: 南开大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(63191204), 光学信息技术和科学教育部重点实验室项目(2017KFKT010)和国家高技术研究发展计划项目(2013AA050302)资助

作者简介: 朱小峰, 女, 1993年生, 南开大学光电子薄膜器件与技术研究所硕士研究生 e-mail: 18844138749@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: wgc2008@nankai.edu.cn

比即可得到样品太阳能电池的量子效率。

传统的量子效率仪采用光谱连续的氙灯或卤素灯作为光源,通过单色仪转化为单色光,经过斩波器后变为一个脉冲单色光,照射在太阳能电池上,采用锁相放大器测量电池的电流信号。单色仪通过机械结构旋转光栅来改变出射光的波长,为去除光栅单色仪中的高级次光谱,需要同时旋转滤色片轮来切换相应的滤色片,这样一来,速度较慢,容易出现机械故障。采用多种波长的 LED 作为单色光,利用高反射率光导管汇聚 LED 光,可以实现高的光利用率,制备出测量速度快、结构紧凑、造价低廉的 LED 量子效率仪。

LED 具有供电电压低,使用安全,寿命长等优点。随着 LED 技术的发展,波长种类越来越多,波长可以覆盖从紫光到近红外的范围,同时 LED 的功率、辐照强度、发光效率等都得到了大幅度的提高,为 LED 的各种应用打下了良好的基础<sup>[7]</sup>。

美国能源部可再生实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)于 2008 年开发出一套 LED 量子效率仪<sup>[8]</sup>。德国于利希研究中心 IEK-5 研究院<sup>[9]</sup>、美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)<sup>[10]</sup>等也对 LED 量子效率仪进行了研究。

## 1 实验部分

### 1.1 LED 光谱特性

将 39 种不同波长的 LED 焊接在一个 PCB 上,通过计算机和 PLC 控制一个直流可调稳压电源,分别为每一种 LED 提供对应的额定电压。LED 在同一平面的不同位置,形成一个离散型光源。离散型光源在应用中遇到的一个难点是,如何将离散型光源的光汇聚到同一个工作平面上,得到一个比较小的光斑。采用 3M 高反射率反射镜片制备一个锥形光导管,可以将 LED 阵列产生的离散光汇聚为一个面积约为 9 mm<sup>2</sup> 的光斑,如图 1 所示,很好地解决了这个问题,同时 3M 高反射率反射镜片在可见光波段具有 99% 的平均反射率,因此可以实现高的光利用率。

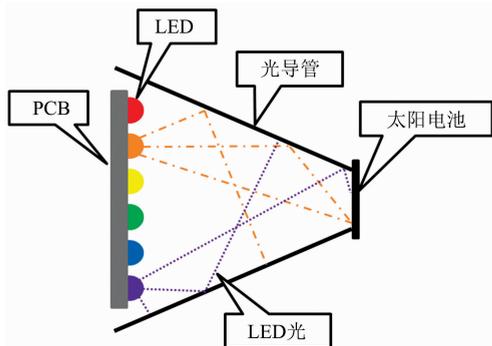


图 1 LED 光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path of LEDs

采用北京爱万提斯科技有限公司型号为 AvaSpec-ULS2048L-EVO 的光谱仪测量这 39 种 LED 的发射光谱,如

图 2 所示,光谱仪的测量范围为 300~1 100 nm,波长采样间隔为 0.6 nm,分辨率为 2.4 nm,信噪比为 300:1。

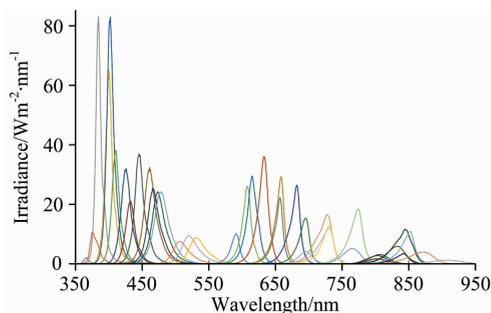


图 2 39 种 LED 光谱

Fig. 2 Spectrum of 39 kinds of LEDs

从图 2 中可以看出,39 种 LED 的波长范围为 368~905 nm,不同波长的 LED 发出的光的辐照强度各不相同。与通过单色仪产生的单色光相比,半峰宽较宽,单色性较差,各 LED 的光谱之间有一定的重叠,以峰值为中心,两侧光谱不对称。

需要说明的是,这个型号的光谱仪测量的光谱与实际值有一定的偏差,在 980 nm 波长之后,随着波长的增加,偏差逐渐增大。在晴朗无云,太阳角合适的情况下,采用光谱仪测量 AM1.5D 太阳光谱,并与已知的 AM1.5D 光谱数据进行比较,可以将光谱仪测量得到的数据进行校准。另外,光谱仪测量值的波长间隔与 AM1.5D 光谱数据波长间隔不一致,需要对光谱仪测量值进行抽样算数平均处理,将光谱仪测量值转换为 AM1.5D 中对应波长的值,文中所述光谱仪数据均经过上述方法处理。

### 1.2 氙灯和卤素灯单色光的光谱特性

传统的量子效率仪中,单色仪产生的光也不是单一波长的光,具有一定的半峰宽,在峰值中心位置附近含有一些其他波长的光,与激光相比,其单色性较差。美国 PV 公司的 QEX10 采用氙灯作为光源,美国颐光科技有限公司的型号为 QTest 1000 ADJ(简称为“QTest”)的量子效率仪采用卤素灯作为光源。图 3(a)和(b)分别为 QEX10 的氙灯和 QTest 的卤素灯,通过单色仪后产生的单色光光谱图,波段范围为 310~1 100 nm,波长间隔为 10 nm。在 300 nm 处单色光辐照强度均比较弱,光谱仪未能采集到此处的光谱数据。

从图 3(a)可以看出,氙灯在 829~1 000 nm 波段范围内存在特征峰,这些特征峰比较高,若单色仪光栅定位不准确,则 QE 测量时,会在特征峰波段产生较大的偏差。从图 3(b)可以看出,卤素灯没有特征峰,在整个波长范围内,光谱曲线相对比较平滑,光栅定位不准确对 QE 测量的影响没有氙灯那么大。从图 3(a)和(b)中的局部放大图可以看出,在 300~350 nm 波段范围内,卤素灯单色光的辐照强度要比氙灯的弱,其原因是,一方面卤素灯在短波波段的辐照强度较弱,另外一方面,与 QEX10 相比,QTest 采用透镜来汇聚单色光,卤素灯发出的光需要经过 7 个透镜才能照射到太阳能电池上,其中每个透镜至少反射 8% 的光,导致照射到太阳能电池上的单色光辐照强度较弱。

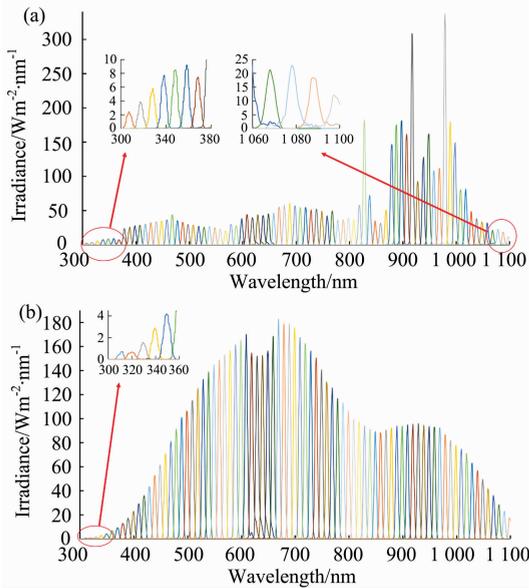


图 3 (a) 氙灯单色光光谱; (b) 卤素灯单色光光谱

Fig. 3 (a) Spectrum of monochromatic light of xenon lamp;  
(b) Spectrum of monochromatic light of halogen lamp

### 1.3 各种单色光的波峰值和半峰宽

从图 2 和图 3 可以看出, LED、氙灯和卤素灯光源产生的单色光的峰值差别比较大, 将这三种光源产生的单色光的波峰值绘图进行比较, 如图 4 所示。目前买到的 LED 峰值波长在 368~905 nm 范围内, 所以波长坐标的范围定为 360~910 nm。

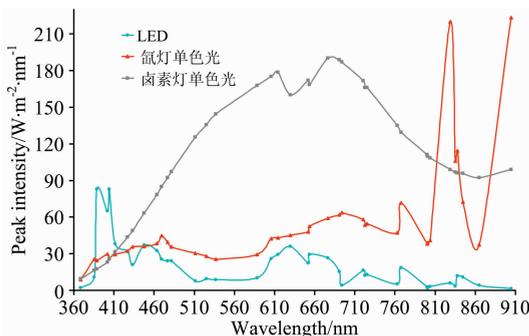


图 4 LED、氙灯、卤素灯单色光波峰值

Fig. 4 Peak intensity of monochromatic light of LEDs, xenon lamp and halogen lamp

从图 4 可以看出, 在 389~411 nm 波段, LED 光的波峰值比氙灯和卤素灯产生的单色光的要高, 这样可以较好地弥补传统光源在此波段辐照强度不足的劣势, 在其余波段, LED 波峰值均低于氙灯和卤素灯的波峰值。在 368~400 nm 波段, 氙灯的波峰值比卤素灯高, 829~905 nm 波段, 氙灯特征峰处的波峰值比卤素灯的要高, 其余波段, 氙灯的波峰值均比卤素灯的低。

从图 2 和图 3 可以看出, 不同波长的 LED 的半峰宽相差比较大, 氙灯和卤素灯光源产生的单色光的半峰宽差别不大, 将这三种光源产生的单色光的半峰宽绘图进行比较, 如

图 5 所示。

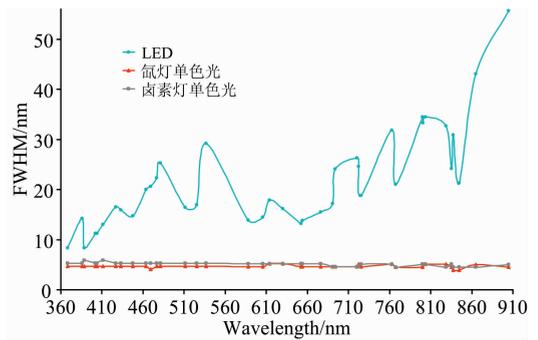


图 5 LED、氙灯、卤素灯单色光半峰宽

Fig. 5 FWHM of monochromatic light of LEDs, xenon lamp and halogen lamp

从图 5 可以看出, QEX10 在 368~905 nm 波段范围内产生的单色光的半峰宽约为 5 nm 左右, 在整个波段, 半峰宽变化不大。QTest 在入射和出射狭缝宽度均为 1500  $\mu\text{m}$  的情况下, 在 368~905 nm 波段范围内产生的单色光的半峰宽约为 5.1 nm 左右, 在整个波段, 半峰宽变化不大。LED 的半峰宽值相对较大, 并且在 368~905 nm 波段内, 半峰宽也各不相同, 在 8.3~55.7 nm 范围内变化, 与文献[9]中所采用的 LED 的半峰宽范围相近。

## 2 结果与讨论

### 2.1 半峰宽和波峰值对测试的影响

从图 5 中可以看出, 部分 LED 的半峰宽远大于单色仪产生的单色光的半峰宽, 并且 LED 的半峰宽是由 LED 本身的材料特性决定的, 无法像单色仪那样通过改变入射和出射狭缝的宽度来改变单色光的半峰宽。若想改变照射到电池上的 LED 光的半峰宽, 可以在每一只 LED 上加一个对应的窄带带通滤色片来实现, 这会增加系统的复杂性。在现有条件下, LED 半峰宽比较大, 为研究单色光半峰宽对量子效率测试的影响, 下面通过改变传统量子效率仪的入射狭缝和出射狭缝的宽度来改变单色光的半峰宽, 并在不同半峰宽情况下测量同一块太阳电池的量子效率, 考察半峰宽对量子效率测试的影响。

单色仪产生的单色光的半峰宽与其入射狭缝及出射狭缝有关, 入射狭缝及出射狭缝宽则得到的单色光的半峰宽就大。QEX10 单色仪的入射狭缝和出射狭缝宽度需要手动调节, 其结构紧凑, 调节不方便。QTest 的入射狭缝与出射狭缝宽度可以通过软件进行调节, 调节范围为 50~3000  $\mu\text{m}$ , 所以采用 QTest 来改变半峰宽。设置入射狭缝与出射狭缝为相同宽度, 在不同狭缝宽度的条件下, 得到不同半峰宽, 并对同一块单晶硅太阳电池进行 QE 测试, 测试结果如图 6 所示, 图中后缀数字表示狭缝宽度值, 单位是  $\mu\text{m}$ 。

如图 6 中 QTest-500 和 QTest-1000 曲线所示, 当狭缝宽度小于等于 1000  $\mu\text{m}$  时, 因狭缝宽度小, QTest 单色仪产生的单色光的半峰宽小, 波峰值低, 照射到电池上的入射光

的辐照强度低,产生的电流弱,已接近锁相放大器的测量下限,测量得到的 QE 曲线在整个波段范围内不平滑,呈现出一种波浪起伏的状态,测量是不准确的。同理,因卤素灯在 300~400 nm 波段的辐照强度比较低,产生的单色光波峰值低,QTest 在此波段测量得到的量子效率是不准确的。当狭缝宽度大于 1 500 μm 时,狭缝越大,半峰宽越大,波峰值越高,电池的电流就越大,测量得到的 QE 曲线就相对比较平滑。狭缝宽度大于等于 1 500 μm 时,虽然半峰宽和波峰值各不同,但是各条曲线在 400~1 100 nm 波段范围内有着较好的重合度。由此可以看出,狭缝宽度小于 1 500 μm 时, QE 曲线是不平滑的,测量是不准确的;狭缝宽度大于等于 1 500 μm 时,半峰宽大,波峰值也大,信号强度大,测量准确。

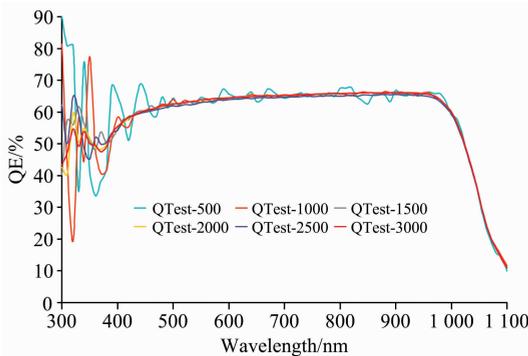


图 6 QTest 不同狭缝宽度的 QE 曲线

Fig. 6 QE Curves of QTest with different slit width

为了更准确地考察单色光半峰宽对量子效率测试的影响,将图 6 中 300~400 nm 波段范围内因单色光比较弱,波峰值比较低造成的测量不准确的量子效率数据去除掉,仅考虑 400~1 100 nm 波段范围内,计算不同狭缝宽度对应不同半峰宽情况下 QE 曲线的积分电流,并列于表 1。

表 1 狭缝宽、半峰宽和 QE 曲线积分电流

Table 1 Slit Width, FWHM and QE curve integrated current

狭缝宽/μm	半峰宽/nm	积分电流/(mA·cm <sup>-2</sup> )
500	2.5	24.52
1 000	3.8	24.48
1 500	5.1	24.49
2 000	6.6	24.49
2 500	8.0	24.25
3 000	9.5	24.50

从表 1 中可以看出,狭缝宽度从 500 到 3 000 μm,每改变 500 μm 测量一次光谱和量子效率,半峰宽从 2.5 nm 改变到 9.5 nm,量子效率积分电流在 24.25~24.52 mA·cm<sup>-2</sup> 范围内变化。

利用式(1)计算积分电流的相对偏差

$$\xi = \left| \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中 ξ 为积分电流相对偏差, J<sub>min</sub> 和 J<sub>max</sub> 分别表示积分电流的最小和最大值。计算得到的积分电流的相对偏差为

1.1%,由此可以看出,波长在 400~1 100 nm 波段范围内,半峰宽在 2.5~9.5 nm 范围内,积分电流的偏差很小,即半峰宽在 2.5~9.5 nm 范围内,对 QE 测量的影响很小。

因设备硬件因素限制,无法调节得到更大的狭缝宽度,也无法得到更宽的半峰宽。为了探究 LED 单色光半峰宽对量子效率测试的影响,采用 39 种 LED 制备了一套 LED 量子效率仪,并利用 QEX10 和 QTest,测量同一块单晶硅太阳能电池,得到的量子效率曲线如图 7 所示,其中 QTest 是狭缝宽度为 3 000 μm 时的曲线。LED 量子效率仪的测试结果在图 7 中显示为黑色圆点的散点图,测试结果的准确性与文献[9]相近。

LED 的波长间隔非等间隔,且没有规律,计算积分电流时,需要将 LED 量子效率数据进行拟合,获得 10 的整数倍波长的量子效率值。LED 测量值拟合后的曲线在图 7 中为红色曲线。

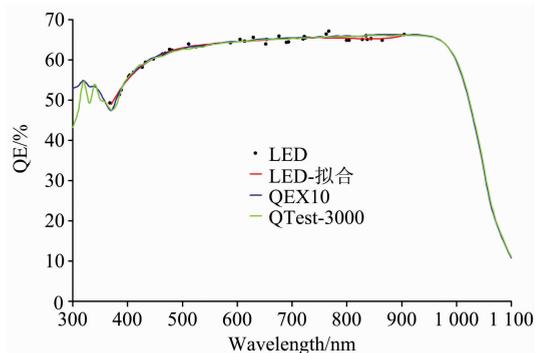


图 7 三种量子效率仪 QE 曲线

Fig. 7 QE curves of 3 kinds of QE instruments

图 7 中 LED 量子效率拟合曲线与 QEX10 和 QTest 相比,在 370~380 nm 波段,LED 要稍高些;在 380~770 nm 波段,一致性较好;在 770~900 nm 波段范围内,要稍低一些;在 368 nm 处,LED 的偏差最大,为 1.82%。这些偏差产生的原因,与 I-V 放大器的稳定性和数据采集卡的测量精度低有关,并且每种波长的 LED 仅采用了 1 只,与 LED 的波峰值比较低有关。另外,测量时采用的是直流信号而非调制信号,没有采用锁相放大器,无法进行相敏检波,没有采用暗室,外界光源对测量会产生干扰。

为了进一步考察单色光半峰宽对量子效率测试的影响,将三种量子效率仪测试得到的各个 QE 数据分别计算积分电流,其中 QTest 改变狭缝宽度,测量得到 6 条 QE 曲线。积分电流计算的波长范围为 370~900 nm,得到的值列于表 2,其中,偏差绝对值为其他 QE 的积分电流与 QEX10 的积分电流相减的绝对值,积分电流的相对偏差同样采用式(1)进行计算,其中 J<sub>max</sub> 表示 QEX10 的积分电流, J<sub>min</sub> 表示其他 QE 的积分电流。

从表 2 的数据中可以看出,LED 的绝对偏差值为 0.07,相对偏差为 0.34%;QTest 的 6 条 QE 曲线的绝对偏差值的平均值为 0.08,相对偏差平均值为 0.41%。结果表明,LED 的偏差小于 QTest,测量结果比 QTest 更准确。

表 2 三种量子效率仪 QE 曲线积分电流  
Table 2 3 kinds of QE curve integrated current

量子效率测试仪	积分电流 (mA·cm <sup>-2</sup> )	偏差 绝对值	相对 偏差/%
QEX10	20.41	—	—
QTest-500	20.39	0.02	0.10
QTest-1000	20.31	0.10	0.49
QTest-1500	20.37	0.04	0.20
QTest-2000	20.36	0.05	0.24
QTest-2500	20.17	0.24	1.18
QTest-3000	20.36	0.05	0.24
LED 量子效率仪	20.34	0.07	0.34

另外, QTest 在 500 μm 狭缝宽度时的相对偏差最小, 为 0.10%, 但是从图 6 中可以看出, 其曲线的平滑性最差, 因积分电流反映的是宏观趋势, 不能表征细节, 需要同时结合 QE 曲线才能全面说明问题。

通过改变 QTest 的半峰宽, 并比较三种量子效率仪测量得到的 QE 曲线以及积分电流的相对偏差, 可以看出半峰宽对 QE 测量结果的影响很小。从半峰宽来看, LED 可以作为量子效率仪中的单色光。

## 2.2 稳定性分析

根据 QE 测试原理, 需要保持单色光的强度在不同时间段是相同的, 这样才能保证 QE 测量的准确性。选择峰值波长为 605 nm 的 LED, 氙灯和卤素灯在 620 nm 的单色光, 分别照射到同一块太阳能电池上, 利用 LabVIEW 软件编写了自动测试程序, 控制 I-V 放大器和数据采集卡每隔 200 s 采集一次太阳能电池的电流值, 利用电流值来监测单色光的光强随时间的变化关系, 结果如图 8 所示。

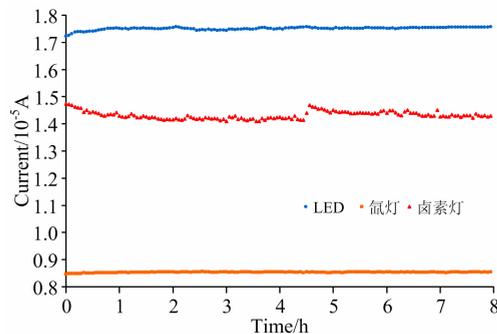


图 8 LED、氙灯和卤素灯的稳定性

Fig. 8 Stability of LED, xenon lamp and halogen lamp

从图 8 中可以看出, LED 在 0.5 h 之内, 光强呈现上升趋势, 0.5 h 之后趋于平稳; 卤素灯在 1 h 之内, 光强逐渐下降并趋于稳定, 在 4.5 h 左右, 光强突然增大, 之后又逐步下降趋于稳定, 可能与外部供电变化产生的波动有关; 氙灯在 8 h 内基本稳定。图 8 中 LED 的电流要比 QEX10 和 QTest 的大, 是因为 LED 的半峰宽比较大, 虽然波峰值比较小, 但是积分后的面积大, 所示 LED 的电流大。

为了更准确地表述光源的稳定性, 采用式(2)计算光源的不稳定度, 并将结果列于表 3。

$$\eta = \left| \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中  $\eta$  为不稳定度,  $I_{\max}$  为最大电流值,  $I_{\min}$  为最小电流值。

表 3 LED、氙灯、卤素灯不稳定度

Table 3 Instability of LED, xenon lamp and halogen lamp

光源	不稳定度/%
LED	1.0
氙灯	0.6
卤素灯	2.3

从图 8 和表 3 可以看出, 氙灯稳定性较好, 不稳定度为 0.6%; 卤素灯稳定性较差, 不稳定度为 2.3%; LED 稳定性居中, 不稳定度为 1.0%。LED 工作 0.5 h 后, 不稳定度降到 0.4%; 氙灯工作两个小时, 不稳定度降低到 0.2%, 氙灯的稳定性最佳。三种光源均采用 I-V 放大器和数据采集卡进行光强测量, 测量 LED 光源稳定性时, 在初始的 0.5 h 之内, LED 光强逐渐变大, 是 I-V 放大器不稳定造成的, 与 LED 本身无关。0.5 h 之后, I-V 放大器工作状态趋于稳定, 测量得到的 LED 光强也随之稳定, 0.4% 的不稳定度代表了实际的 LED 的稳定性, 此结果与氙灯的不稳定度比较接近。从稳定性上来看, LED 作为量子效率仪中的单色光是可行的。

## 3 结论

采用光导管结构, 将离散的 LED 光汇聚为一个面积较小的光斑, 解决了离散型光源汇聚难的问题, 为 LED 应用于量子效率测试打下了一个良好的基础。

与单色仪的单色光相比, LED 的半峰宽较大, 实验表明, 在 5.1~9.5 nm 的半峰宽范围内, 量子效率测量结果与半峰宽无关。波峰值越大则 QE 测量越准确。通过三种量子效率仪测量同一块太阳能电池进行比较, 在 8.3~55.7 nm 半峰宽范围内, LED 量子效率仪的积分电流与 QEX10 的相对偏差为 0.34%, 进一步证明半峰宽的影响是较小的。同时, LED 的不稳定度为 0.4%, 具有较好的稳定性。上述结果表明, LED 是可以作为量子效率仪中的单色光的。

本文所用的功率为 1 W 的单只 LED 的波峰值比较低, 另外, 太阳能电池在某些波段的量子效率比较低, 这样均会导致电流信号比较弱, 若不采用锁相放大器, QE 测量容易受到环境光和干扰信号的影响。在后续的改进和设计中, 可以利用 LED 为离散型光源的特点, 通过增加 LED 的个数或功率的方法来增大波峰值, 提高信号强度, 将整个波段的电流信号强度控制在  $\mu\text{A}$  级, 可显著降低环境光和干扰信号对 QE 测量的影响, 也可以降低 I-V 放大器的放大倍数, 提高测量的准确性。同时, 可采用 STM32 控制调光芯片的方法控制 LED 的切换, 进一步提高测量速度。

## References

- [ 1 ] ZHONG Fa-li, TENG Dao-xiang(种法力, 滕道祥). GUI TAIYANGNENG DIANCHI GUANGFU CAILIAO(硅太阳能电池光伏材料). Beijing: Chemical Industry Press(北京: 化学工业出版社), 2015.
- [ 2 ] XIAO Xu-dong, YANG Chun-lei(肖旭东, 杨春雷). NAMI KEXUE YU JISHU; BAOMO TAIYANGNENG DIANCHI(纳米科学与技术: 薄膜太阳能电池). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2014.
- [ 3 ] Field H. Methods and Instruments for the Characterization of Solar Cells: From Fundamentals to Applications. John Wiley & Sons, Ltd., 2017.
- [ 4 ] ZHU Peng-jian, JIANG Da-wei, LI Shou-wei, et al(朱朋建, 姜大伟, 李守卫, 等). Electronic Measurement Technology(电子测量技术), 2012, 35(1): 8.
- [ 5 ] XING Tao, CHEN Zhen-guang, WANG Xue-meng, et al(邢涛, 陈镇光, 王学孟, 等). Renewable Energy Resources(可再生能源), 2014, 32(8): 1081.
- [ 6 ] WANG Ting-ting, LI Song-li, XU Lei, et al(王婷婷, 李松丽, 许蕾, 等). China Measurement & Test(中国测试), 2013, (S2): 11.
- [ 7 ] WANG Qi(王琪). Microprocessors(微处理机), 2015(3): 82.
- [ 8 ] Young D L, Egaas B, Pinegar S, et al. Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 2008: 1612.
- [ 9 ] Reetz W, Erdweg D, Hilgers W, et al. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2011: 113.
- [ 10 ] Hamadani B H, Roller J, Dougherty B, et al. Photovoltaic Specialists Conference. IEEE, 2013: 73.

## Feasibility Study on LED as Monochromatic Light Source in Quantum Efficiency Instrument

ZHU Xiao-feng, CHI Zi-rong, HU Peng-fei, OU Lin, WANG Jing, WANG Guang-cai\*

Institute of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology, Nankai University; Engineering Research Center of Thin Film Photoelectronic Technology, Ministry of Education; Key Laboratory of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology of Tianjin; International Cooperation Base for New PV Technology, China-Europe Joint Research Center for Solar PV Technology of Tianjin, Tianjin 300350, China

**Abstract** With the continuous development of light emitting diode (LED) technology, high-power LEDs with various wavelengths have been developed, therefore we can design a LED-based QE instrument using LED with various wavelengths as monochromatic light source instead of expensive monochrometers. Compared with the traditional QE instrument, there is no filter required in the LED-based QE instrument, so it is not necessary to rotate the filter wheel for a grating monochromator to avoid the influence of high-order spectrum. Without mechanical movements, which reduces the failure rate and speeds up the measurement. Several LEDs are welded on a printed circuit board (PCB) as the discrete light source. However, it is impossible to converge light as the traditional QE instrument using ellipsoidal mirror, lens or concave mirror. Therefore, the discrete light from the LED board is collected and homogenized into a small spot by a light pipe formed with highly reflective reflectors, which can solve the difficulty in converging discrete light sources and the high utilization ratio of light is achieved. By measuring the peak intensity, full width at half maxima (FWHM) and stability of LED, and further comparing it with the traditional QE instrument using halogen lamp and xenon lamp as light source, it is found that the measurement accuracy of QE is positively correlated with the peak intensity of monochromatic light. The higher the peak intensity is, the higher the measurement accuracy is. Furthermore, it is also observed that the measurement accuracy has no obvious correlation with FWHM in the range of 2.5~9.5 nm. The QE of the same solar cell is measured by LED-based, halogen lamp-based and xenon lamp-based QE instrument, respectively. The integrated current is further calculated based on QE in the same wave range, and compared with that obtained from the advanced xenon lamp-based QE instrument, it is found that the relative error of the LED-based QE instrument is only 0.34%, which is equivalent to the accuracy of the halogen lamp-based QE instrument. Based on integrated current conditions, the measurement accuracy has no obvious correlation with the FWHM of LED varies from 8.3~55.7 nm. Moreover, the instability of LED is 0.4%, which is between xenon lamp and halogen lamp. Based on these three aspects, it can be concluded that LED can be used as the monochromatic light source for QE measurement.

**Keywords** Quantum efficiency; Spectrum of LED; Stability of LED; Solar cell

\* Corresponding author

(Received Jan. 22, 2019; accepted May 12, 2019)