

文章编号: 1004-924X(2016)03-0491-11

封装标准太阳能电池性能及其与国际标准 一致性的评价

卞洁玉^{1,2}, 猪狩真一³, 周泓³, 周健¹, 小久保顺一³, 刘毓成¹, 刘正新^{1*}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 新能源技术中心, 上海 201800;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 日本产业技术综合研究所 太阳光发电研究中心, 日本 筑波 305-8568)

摘要: 基于国际电工委员会(IEC)国际标准分析了引起标准太阳能电池量值传递误差的因素及其与国际标准的一致性。随机选取我国市场上销售的6种封装标准太阳能电池, 测量了它们的温度特性、光谱响应特性和表面反射特性。结果表明: 电池的封装结构影响它们的冷却效果及温度的正确测量, 从而导致温度和短路电流的不稳定性, 其变异系数最高可达0.12%和0.04%。另外, 有、无偏置光条件下的光谱响应特性均反映其光电流的光照强度线性特性, 这里定义用光谱拟合度来衡量各封装太阳能电池的光谱响应特性。采用改变入射角测量短路电流的方法分析了表面光反射对短路电流的影响, 利用余弦函数拟合确定了由表面反射光所引起的短路电流的误差可达0.21%。本文的研究成果对光伏行业正确制造、选择和使用标准太阳能电池具有指导作用。

关键词: 太阳能电池; 太阳能电池测试标准; 标准太阳能电池; 温度稳定性; 光谱响应; 线性度; 表面光反射

中图分类号: TM914.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0491

Characteristics of various packaged reference photovoltaic devices and their conformities to international photovoltaic standards

BIAN Jie-yu^{1,2}, IGARI Sanekazu³, ZHOU Hong³, ZHOU Jian¹, KOKUBO Junichi³,
LIU Yu-cheng¹, LIU Zheng-xin^{1*}

(1. *Research Center for New Energy Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Research Center for Photovoltaics, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba 305-8568, Japan)*

* *Corresponding author, E-mail: z.x.liu@mail.sim.ac.cn*

Abstract: This paper focuses on analysis of the origins of measuring transfer errors of standard solar cells and the uncertainty to international photovoltaic standards from the International Electrotechnical Commission (IEC). Six kinds of commercial packaged PV devices were chosen randomly, and their properties including temperature responsibility, spectral response and surface reflection effect were measured

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2016-01-05.

基金项目: 科技部国际合作重点项目(No. 2015DFA60570); 中国科学院国际合作重点项目(No. GJHZ1240); 中国科学院购置专项资助项目; 上海市科委国际合作重点项目(No. 12160706700); 上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重大项目(No. ZJ2015-ZD-001); 上海市重大技术装备研制专项资助项目

and evaluated based on the IEC standards, The results demonstrate that the structure of packaged PV device affects its cooling effect and temperature measurement accuracy, so that to leads to the instability of temperature and short-circuit current (I_{sc}). The variation coefficients are 0.12% for the temperature and 0.04% for the I_{sc} . Moreover, the spectral responses with and without white bias lights all reflect the linearity feature of incident light intensity for the I_{sc} , in which the spectral responses were quantified by defining a spectral mismatch factor. The influence of surface reflection on I_{sc} was analyzed by measuring I_{sc} at different incident angles, and the ΔI_{sc} caused by the surface reflection was deduced to be up to 0.21% by fitting with a cosine function. The results provide the important guidance for the manufacture, selection and application of the packaged PV devices in photovoltaic industry.

Key words: solar cell; measurement standard of solar cell; standard solar cell; temperature stability; spectral response; linearity; surface reflection

1 引言

太阳能电池是一种将太阳光能直接转换成电能的能量转换器件,其主要技术参数包括光谱响应、短路电流、开路电压及光电转换效率等。其中,光电转换效率定义为太阳能电池产生的电功率与入射太阳光的总功率的比率,是衡量太阳能电池性能的关键参数。然而,由于太阳能电池是光谱选择性器件,不同材料和结构的太阳能电池具有不同的光谱响应,其转换效率随太阳光谱分布的变化而变化。在总辐照度相同而光谱辐照强度分布不同的条件下,太阳能电池的转换效率有很大的差别。不仅全世界各个地区的太阳光辐照强度不同,而且同一个地区的太阳辐照强度还随季节和气象条件的变化而不断变化。这一变化不仅体现在总辐照度上,还体现在不同光波长的辐照度上,即太阳光的光谱分布也在时刻变化,这给太阳能电池的性能测量带来了极大的困难。

为了确定太阳能电池的测量基准,国际电工委员会(IEC)和国标(GB)制定了太阳能电池测量的相关标准,规定了标准太阳光谱和太阳能电池测量方法^[1-4]。标准太阳光谱以大气层外的太阳光为基准,根据空气质量和大气指数确定太阳光的辐照强度,并定义了以下3种基准太阳光谱:(1)AM0,没有空气吸收的大气层外、太阳光垂直入射条件下的辐照光谱,其年平均全波长积分辐射强度为 136.6 mW/cm^2 ^[5]。该标准主要适用于宇宙空间用太阳能电池的测量;(2)AM1.0,透过大气的吸收和散射、垂直入射到地球表面的太阳辐照光谱;(3)AM1.5,透过大气的吸收和散射、以入射角 41.8° 入射到地球表面的太阳辐射光谱。AM1.5条件下太阳光经过大气层的距离是AM1.0的1.5倍。地面用太阳能电池的测量

和校准通常采用AM1.5G全局辐射标准太阳辐射光谱。聚光太阳能电池的测量和校准通常采用AM1.5D直接辐射标准太阳辐射光谱。把AM1.5G地面光谱标准辐射光谱进行积分,得到其辐照强度为 100 mW/cm^2 。

目前,国内外已有很多针对太阳能电池参数精确测量的研究^[6-10]。为了准确测量和比对太阳能电池,IEC规定采用标准太阳能电池作为量值溯源和传递的载体^[11]。美国、德国、意大利、日本等国家建立了标准测量实验室^[12],以研究和完善太阳能电池的标准测量,通过不同标准之间的对比,维护IEC标准的准确性和一致性,实现对IEC国际标准的溯源和传递,从而为研发机构和太阳能电池制造企业提供太阳能电池的标准测量服务。

IEC标准中的60904-2对标准太阳能电池的构造和特性,包括光谱响应、机械构造、光学特性、尺寸和电路等进行了明确的规定^[13]。作为标准太阳能电池器件,必须满足以下两个基本要求:(1)光伏特性稳定;(2)基于IEC60904-10对输出线性度测量的规定,电池的输出曲线因子在使用范围内是辐照强度的线性函数。考虑到实际应用中的诸多因素,标准太阳能电池的面积通常比较小,为 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$,并且固定在金属盒体内,其技术性能指标包括测量的可重复性、温度可控制性和稳定性、光谱响应特性及表面受光范围(视野,不小于 160°)等。

标准太阳能电池虽然面积很小,但是其制作难度很高。国外已经有成熟的制造经验以及稳定的产品供应,比较常用的有美国KLA TENCOR产VLSI STANDARD系列、日本Konica Minolta产AK系列,日本石川产业等多家公司的标准太阳能电池(World Photovoltaic Scale, WPVS)。我国光伏产业界使用标

准太阳电池进行溯源和传递的历史很短, 还没有形成针对标准太阳电池的国标或者行业的技术规范, 大多数光伏制造企业直接将生产线的电池片送到国外的标准测量机构进行量值标定, 然后直接用于生产线上的校准。由于电池片没有封装, 容易破损甚至改变, 而且经过校准的电池片的使用寿命有限, 容易引起测量误差, 从而给产品的质量带来一定的影响。最近, 有些单位开始提供标准太阳电池, 但是, 对标准太阳电池的性能并没有详细的说明。

本文根据IEC国际标准对WPVS标准太阳电池的相关技术规定, 基于本实验室与日本产业技术综合研究所(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, AIST)太阳光发电研究中心(Research Center for Photovoltaics, RCPVT)标准测试课题组之间的国际合作重点项目的相关研究, 系统地测量和分析了我国目前存在的标准太阳电池, 并与国外常用的标准太阳电池进行了比较, 有助于行业内的管理人员以及专业技术人员进一步地认识和理解标准太阳电池的技术标准, 进而推动了国内对标准太阳电池的使用。

2 实验

本文从我国从事太阳电池测试的机构和相关企业随机采购5种太阳电池, 从国外采购1种封装太阳电池进行测量和分析, 并且与日本AIST常用的WPVS进行比较, 该电池经过多年的使用已经老化, 且性能稳定。将这些电池分别编号为A、B、C、D、E、F和Ref-AIST, 各封装太阳电池的外观



图1 本文所用封装太阳电池的外形照片

Fig. 1 Photos of packaged PV devices used in article

如图1所示, 电池材料和结构等详细信息如表1所示。由于这些电池还不确定是否达到国际标准, 所以不能确定是否可以作为标准太阳电池使用, 本文用“封装太阳电池”来表示。根据IEC对标准太阳电池的基本技术规定, 测试上述封装太阳电池的冷却效果、短路电流(I_{sc})的稳定性、光谱响应特性以及电池表面光反射对短路电流的影响。

冷却效果测量利用封装太阳电池自带的水冷结构或者外接金属水冷块, 连接循环水冷器进行冷却, 通过内部热电偶测量封装太阳电池的温度。短路电流和温度的时间稳定性通过Yamashita Denso生产的高稳定性模拟太阳光源(YSS-S200AA)测得, 该设备可以达到IEC 60904-9里所规定的AAA等级标准, 短时间稳定性能达到 $\pm 0.16\%$, 长时间稳定性能达到 $\pm 0.26\%$ 。光谱响应特性采用从日本分光计器公司定制的专用设备CEP-2004N测得。封装太阳电池表面反射光对 I_{sc} 产生的影响采用Cell

表1 各种封装太阳电池的结构信息

Tab. 1 Details of structure information of various packaged PV devices

电池	A	B	C	D	E	F
类型	单晶	单晶	单晶	模拟	单晶	多晶
型号	AK-200	-	-	-	-	-
填充物	无	无	无	无	无	无
尺寸/(mm×mm×mm)	90×120×20	70×70×28	70×70×14	90×70×20	90×70×20	90×70×20
窗口材料	glass	glass	glass	optical filter	glass	glass
窗口表面	texture	flat	flat	flat	flat	flat
固定孔尺寸/(mm×mm)	62×62	62×62	62×62	长: 80高: 可调	长: 80 高: 可调	长: 80 高: 可调
水冷装置	无	无	无	有	有	有

System生产的可变角度测试台PVC-2000进行测量,其角度变化精度可达 $\pm 0.1^\circ$ 。测试台带有电子冷却系统,以中心轴为基准,测量面的角度可以在 $\pm 20^\circ$ 的范围内调节。测量时,将电池固定在测量工具的测量面上,采用手动方式改变电池的倾斜角,也就是模拟太阳光源的入射角,测量在每一个角度下的 I_{sc} 值。然后,采用余弦函数进行拟合,推算表面反射所引起的多重反射光是否对 I_{sc} 产生影响。

3 结果与讨论

3.1 封装太阳电池的结构分析

图1所示的各封装太阳电池均是将面积为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 的晶体硅太阳电池片封装在带有玻璃窗口的金属盒体内,设置电缆或者信号接口与测试器相连接。其中,电池D作为模拟非晶硅薄膜太阳电池测量用的标准电池,用滤光片作为窗口材料。电池A的窗口材料是具有减反射功能的压花玻璃,其它电池的窗口材料是不带压花的平板玻璃。

表1总结了各封装太阳电池的基本结构信息,其主要问题如下:

(1)封装电池的几何尺寸不同。不同厂家生产的电池的平面尺寸、高度和运用方式均有所不同。虽然电池的四角都设有固定用的螺丝孔,但是每一个电池的固定孔尺寸均有差异,而且封装电池的厚度都不相同。尺寸和固定方式的差异给太阳电池的标准测试过程带来不便,需要准备相应的测试台固定封装电池,并且调节高度,这些环节容易引起重复误差。

(2)电池的高度基准线不确定。有的电池设置有高度基准线,而有的电池却没有按照IEC标准的基本要求设置基准线,需要自己确定电池片的高度基准,这样在应用上可能产生系统误差。

(3)电池的冷却结构不同。电池A、B和C本身不具备冷却功能,必须在电池背部外加水冷块或者电子冷却装置控制温度;而来自同一厂家的电池D、E和F本身内置水冷结构和接口,可以直接连接循环冷却水控制温度。

(4)信号线规格不同。所有封装太阳电池都带有测量温度的传感器,均采用 $100\ \Omega$ Pt热敏电阻(RTD)。电池的输出信号由IV信号接头和温度信号接头两部分组成。电池A、B和C的IV线缆和温度测试线缆均通过电池的同一个端口引出。其中,A和

C用线缆直接引出,在电缆线的另一端设有标准接头;而电池B在箱体上设有标准接头,外接一个电缆线,电缆线的另一端设有标准插头。电池D、E和F的IV信号和温度信号线缆由不同的端口引出,在箱体上设有标准接头,并外接电缆线。电缆线的另一端为裸露状态,未接任何标准插头或者接头。

综上所述,各封装太阳电池的尺寸、冷却机构及信号接头完全不统一,这会增加测试过程中的复杂程度和误差,在使用这些封装太阳电池时需要考虑这些因素的影响,并根据实验测试设备事先做好准备。

3.2 温度及短路电流的稳定性

IEC60904-2要求标准太阳电池提供准确测量电池温度的手段,温度测量不确定度小于 $\pm 2^\circ\text{C}$,用于温度测量的温度传感器的不确定度小于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。由于标准太阳电池中的电池器件固定在金属盒体内,而电池的冷却是通过外部水冷块或者电子冷却装置来实现,主要依靠传导达到冷却的效果。然而,IEC标准并没有对温度传感器的设置场所进行明确的规定,不同的标准太阳电池的冷却效果以及冷却的响应时间可能各不相同,电池的真实温度与外部冷却器之间的温度差也可能有差异,因此,了解标准太阳电池的冷却特性有助于实际测量中温度的设定和调节。为了实现这个目的,这里对外部水冷器设定统一的升温和降温曲线,测量不同标准太阳电池的实际温度响应。

图2为6种封装太阳电池的温度变化曲线。水冷器的起始温度为 25°C ,连续加热到 30°C 、 40°C ,然后再冷却到 30°C 和 25°C ,在每一个温度处的停留时间为 5 min ,设定的升温和冷却速率为 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 。从图中可以看出,所有电池的实际温度与设定的循环水温度之间都有较大的差异,温度差异随着设定温度的升高而增加。在设定温度为 25°C 时温度差异小于 2°C ;在 30°C 时约为 $2\sim 3^\circ\text{C}$;而在 40°C 时,则达到 3°C 以上。在相同的设定温度下,每一个封装太阳电池的的稳定温度以及达到稳定温度的响应曲线也不相同,在每一个设定温度达到温度平衡均需要大约 5 min 的等待时间。其中,D和F电池的温度响应曲线与设定温度曲线的形状最接近。在升温阶段的每一个温度点达到平衡温度的响应时间也非常快(图中方框所示区域),这可能由两种原因引起:(1)测量温度热电偶的设

置点距离循环水冷却块的距离非常近, 热电偶的测量温度更加接近冷却水的温度; (2) 电池整体结构的厚度很薄, 电池距离水冷块的距离很近。前者会使热电偶的测量温度偏离电池的实际温度; 而后者会导致电池的温度容易受冷却水及外部循环水系统的影响而产生波动。尤其D、E、F 3种电池, 虽然都是由同一厂家生产, 但是电池E的温度响应特性以及在同一设定温度条件下达到的平衡温度与D和F均有较大差异。因此, 在使用WPVS时必须清楚了解其温度特性, 使电池的实际稳定温度达到IEC标准的基本要求。

图3为在AM1.5G, 100 mW/cm²稳态模拟光源的照射条件下, 各个封装太阳能电池的温度及短路电流 I_{sc} 随时间的变化。为了使电池的温度达到IEC标准规定温度(25±2) °C的中心值, 循环冷却水的设定温度为23.9 °C。参考图2的温度响应特性, 在开始冷却5 min后记录电池的温度和短路电流输出。

从图中可以看出, 虽然循环冷却水的设定温度相同, 每一个电池达到的温度并不相同。在等待5

min的稳定时间后, 测量电池的温度和电流的标准偏差, 结果如表2所示。从国外进口的电池A(AK-200)的温度稳定性最好, I_{sc} 测量值也稳定, 温度和 I_{sc} 的标准偏差分别为0.011 °C和0.034 mA。电池B的温度测量中具有较大的噪声, 温度标准偏差为

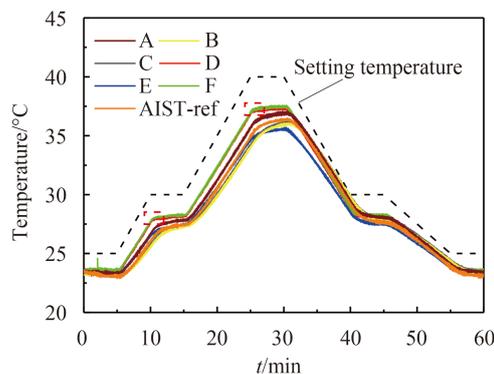


图2 各种电池在相同的加热和冷却条件下的温度响应曲线
Fig. 2 Temperature response curves for different photovoltaic devices under identical heating and cooling temperature settings

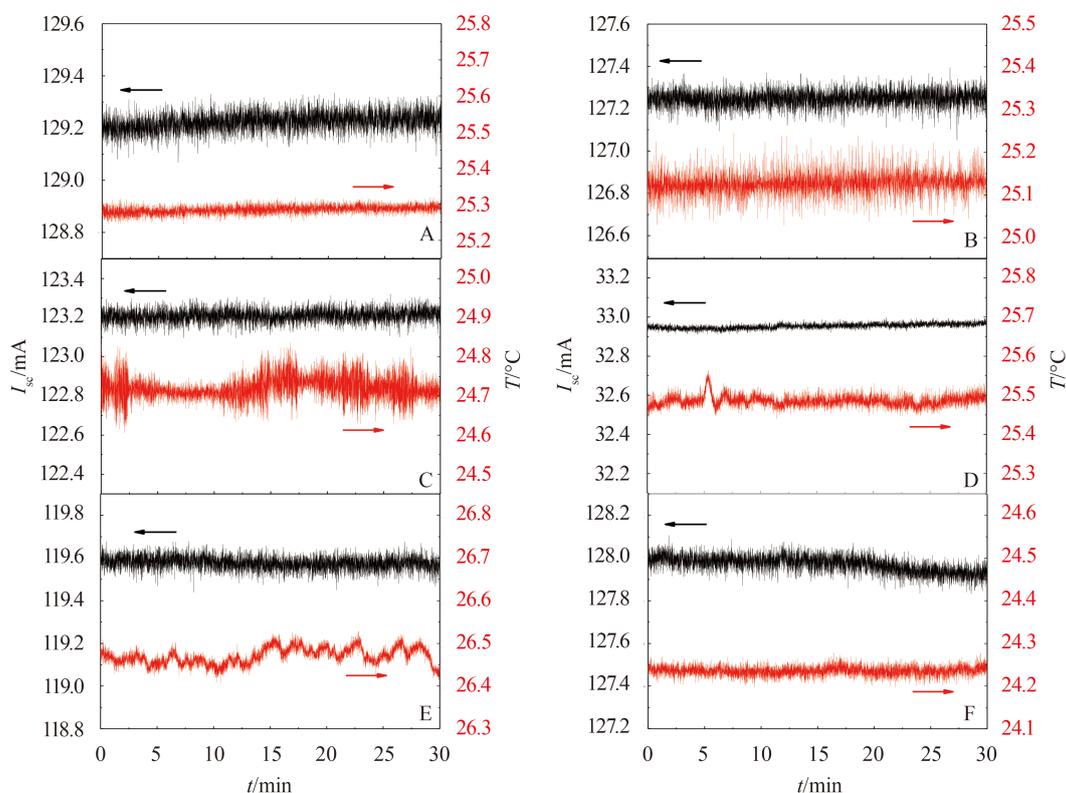


图3 在AM1.5G, 100 mW/cm²稳态模拟光源的照射下, 封装太阳能电池的温度及短路电流 I_{sc} 随时间的变化(循环冷却水的设定温度为23.9 °C)

Fig. 3 Temperature and I_{sc} instability of packaged PV devices under constant illumination of AM1.5G, 100 mW/cm², as setting temperature of cooling water is 23.9 °C.

0.024 °C, I_{sc} 的标准偏差增加到0.036 mA。温度噪声可能由温度传感器与被测体的接触或者热电偶的引出线接触不良所致。C、D、E电池的温度测量中出现明显的波动,这种较为尖锐的波动可能是由于热电偶与被测体之间接触不牢所引起的。虽然D电池的电流偏差值较小,但是,由于该电池模拟多结薄膜硅太阳电池的顶层结,电流 I_{sc} 的绝对值较小,因此 I_{sc} 的偏差率很高,达到0.039%。相反,电池F的温度偏差虽然很小,但是电流的偏差却很大,说明该电池中被测温度与电池 I_{sc} 的关联性较

小。D和E电池也存在与F电池相同的趋势,这3种电池由同一厂家生产制作,温度与电流的关联性较小,结合图2中温度响应曲线的差异,本文推测热电偶的设置场所距离水冷块比较近,测量的温度更加接近冷却水的温度,而不是电池的真实温度。从以上结果可以看出,封装太阳电池中冷却机构的设计、热电偶的场所设置及固定都会对输出电流产生一定的影响,从而导致电流的不确定度增加。

表2 各种封装太阳电池在AM1.5G,100 mW/cm²光照条件下温度和 I_{sc} 的平均值及标准偏差值

Tab. 2 Average and standard values of deviation (STDDEVP) of T and I_{sc} at STC

No.	A	B	C	D	E	F	Ref-AIST	Ref-AIST
Type	c-Si	c-Si	c-Si	模拟	c-Si	P-Si	c-Si	模拟
Average $T/^\circ\text{C}$	25.285	25.126	24.720	25.486	26.470	24.236	25.330	25.099
STDEVPAT/ $^\circ\text{C}$	0.011	0.024	0.030	0.014	0.019	0.011	0.011	0.012
$\Delta T/T(\%)$	0.044	0.096	0.121	0.055	0.072	0.045	0.043	0.048
Average I_{sc}/mA	129.224	127.248	123.211	32.954	119.577	127.972	123.209	40.359
STDEVP I_{sc}/mA	0.034	0.036	0.032	0.013	0.030	0.038	0.034	0.015
$\Delta I_{sc}/I_{sc}(\%)$	0.026	0.028	0.026	0.039	0.025	0.030	0.028	0.037

3.3 光谱响应特性

IEC60904-4标准对利用标准测量器件或者标准太阳电池进行量值传递和测量时,由于标准器件或者标准太阳电池与下一级标准太阳电池或者被测体之间的光谱响应不拟合而在 I_{sc} 上产生差异的校准方法进行了具体的规定。由于光谱响应测量时单色光的强度非常弱,一般在 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 量级,在太阳电池中产生的光生载流子浓度非常低,载流子的产生、输运、复合机理与AM1.5G, 100 mW/cm²标准光照条件下有很大的差异,所以,IEC60904-8对光伏器件的光谱响应测量进行了具体规定^[14],IEC60904-10对太阳电池的线性度测量进行了规定^[15]。因此,这里测量各种封装太阳电池在有、无白偏置光照射条件下光谱响应曲线的差异,分析封装太阳电池的 I_{sc} 是否具有基本的线性特性,并且引入物理量对封装太阳电池光谱响应特性所引起的误差进行定量分析。图4为各种封装太阳电池在有、无白偏置光照射条件下的光谱响应曲线。如上所述,白偏置光与AM1.5G标准的光谱拟合度、均匀性、稳定性均达到IEC对太阳电池测量用模拟光源规定的A级标准。从图中可以看出,从国外进口

的电池A(AK-200)以及C、D的光谱响应曲线在有、无白偏置光条件下的一致性较好,由此可以推断这些电池对不同的光照可能具有良好的线性特性。F电池在可见光和红外部分的光谱响应稍有差异,B和E则表现出较大的差异,用这些电池对 I_{sc} 的校正可能带来较大的误差,不适合作为标准太阳电池进行量值传递。考虑到标准太阳电池在量值传递时一般采用 I_{sc} 值校准模拟太阳光源的强度,或者在标准光照条件下校准被测器件的电流值,如果使用这种封装太阳电池进行量值校准和传递,必须在有白偏置光的条件下测量其光谱响应。另外,电池E在无白偏置光条件下、450 nm处的光谱响应曲线有明显的突起,如图4(e)所示。在其他光谱响应测试设备上测试时,结果显示并无此突起,并且在有、无白偏置光条件下光谱响应曲线的一致性较好。此现象的产生可能来源于封装电池本身特性或者测试设备的输入电阻的影响,所以在不同设备上得到的结果不同。

图5为图4中所有封装太阳电池在有白偏置光条件下光谱响应曲线的比较结果。晶体硅系列封装太阳电池的光谱响应曲线形状基本相同(图5(a)),

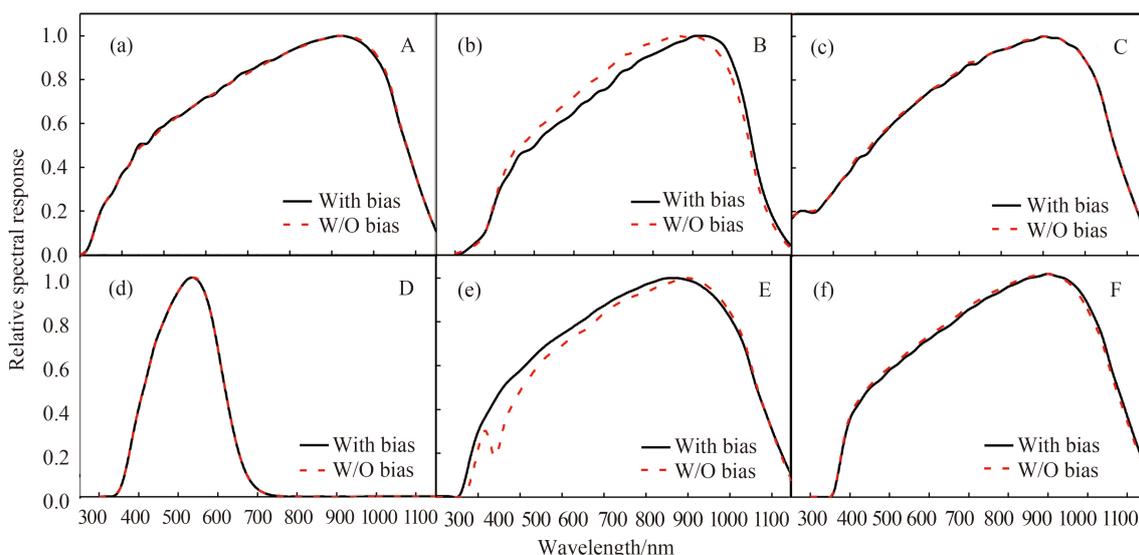


图4 各种封装太阳电池在无、有白偏置光条件下的光谱响应曲线

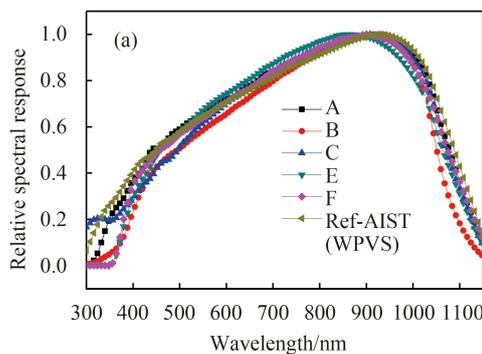
Fig. 4 Relative spectral responses of packaged PV cells with and without (W/O) white bias light illumination.

在短波处光谱响应较低, 在1 000 nm左右光谱响应达到最大值, 但是, 在不同波长范围的光谱响应均呈现明显的差别, 尤其在短波部分的差异特别明显。而图5(b)所示的模拟非晶硅薄膜太阳电池的封装太阳电池的光谱响应范围较窄, 集中在300~700 nm的可见光范围内, 并且在550 nm处达到最大, 但是, 两种模拟封装电池的光谱范围差异较大, 需要根据被测电池的光谱响应适当选取标准太阳电池。

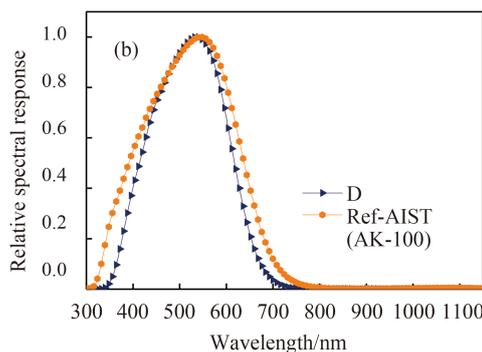
由于上述封装太阳电池在有无偏置光照射条件下的光谱响应曲线在不同波长范围的表现不同, 难以凭观察进行判断。因此, 为了对封装太阳电池在有无偏置光条件下光谱响应的差异进行定量分析, 这里引用国际标准IEC60904-7中光谱不匹配度(Spectral Mismatch, SM)的概念进行定量分析。在利用标准太阳电池对下一级标准太阳电池或者被测器件进行校准时, 由于两者的光谱不匹配所引起的SM为:

$$M = \frac{\int E_{\text{meas}}(\lambda) S_{\text{sample}}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{meas}}(\lambda) S_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda} \times \frac{\int E_{\text{ref}}(\lambda) S_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{ref}}(\lambda) S_{\text{sample}}(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中: $E_{\text{meas}}(\lambda)$ 为模拟太阳光源的光谱照度分布, $E_{\text{ref}}(\lambda)$ 为AM1.5G标准的光谱照度分布, $S_{\text{sample}}(\lambda)$ 为被测样品的光谱响应, $S_{\text{ref}}(\lambda)$ 为标准太阳电池的光谱响应。



(a) 所有晶硅封装太阳电池
(a) Crystalline silicon packaged PV devices



(b) 模拟非晶硅薄膜太阳电池的封装太阳电池
(b) Filtered packaged PV devices for amorphous silicon thin film PV cells

图5 在有偏置光条件下的光谱响应曲线;

Fig. 5 Comparison of relative spectral responses of packaged PV devices with bias light illumination

从式(1)可以看出, 标准太阳电池和被测样品的光谱响应越接近, 模拟太阳光源的光谱分布与AM1.5G标准太阳光谱越接近, SM就越接近1, 即

表 3 各种封装太阳能电池光谱响应曲线的不匹配度

Tab. 3 SM values of various packaged PV devices

电池	A	B	C	D	E	F	Ref-AIST
SM	0.999 5	1.057	1.008 5	0.999 6	0.925 4	1.011 1	0.997 5
1-M %	0.05	5.70	0.85	0.04	7.46	1.11	0.25

100%。在比较同一电池在同一辐照度下有无偏置光的效果差异时,同样使用SM来表达,即有:

$$M = \frac{\int E_{\text{ref}}(\lambda) S_{\text{wobias}}(\lambda) d\lambda}{\int E_{\text{ref}}(\lambda) S_{\text{bias}}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

式中: $E_{\text{ref}}(\lambda)$ 为 AM1.5G 标准光谱照度分布, $S_{\text{wobias}}(\lambda)$ 为被测电池无偏置光下的光谱响应, $S_{\text{bias}}(\lambda)$ 为被测电池偏置光下的光谱响应。

由式(2)可知,电池在有、无偏置光条件下的光谱响应越接近,SM的值也就越接近1。各种封装太阳能电池在标准太阳光谱条件下,有、无偏置光的光谱响应SM值的计算结果如表3所示。封装电池B和E的SM值的偏差较大,分别为5.70%和7.46%;电池F次之,为1.11%;其它电池的SM值与1的误差均在1%以内,说明这些电池在有、无偏置光条件下的光谱响应差异较小。值得注意的是,|1-M|可以作为定量判断封装太阳能电池光谱响应特性的物理参量,该值越大, I_{sc} 的线性越差,作为标准太阳电池的合理性越小,一般不建议作为标准太阳电池进行量值传递。

3.4 表面光反射

如图6所示,模拟太阳光源中除光源以外,一般还包括由抛物线形聚光反射镜、均光微透镜、滤光片、输出透镜等多种光学元器件组成的光学系统。如果被测样品表面存在光反射,可能在模拟光源的光学系统之间形成多重反射,使实际的辐照分布和光强度偏离初始状态,增加电池的电流输出,产生测量误差。另一方面,标准太阳电池进行量值传递和测量时一般在模拟太阳光源的条件上使用,而每一种模拟太阳光源的光学系统和发散角不完全相同,因此,标准太阳电池的表面反射会对量值传递产生误差和不确定度^[16-18]。为此,本文研究了各种封装太阳能电池表面反射对 I_{sc} 的影响。采用一个带有电子制冷的可变角度测量台,将电池固定在测量台上,通过电子冷却系统使电池的温度恒定在25℃,以垂直封装太阳能电池表面为零点,在一个方向上改变测试台角度,也

就是模拟光源对电池的入射角度,变化角度为-20~+20°,与此角度垂直的方向保持不变。

图7为各个封装电池的 I_{sc} 随着入射角度变化的关系。从图中可以看出, I_{sc} 随着入射角的增加而减小,形成一种近似对称的曲线分布,有些电池在零度入射角附近有微小的突起。根据兰伯特余弦定理,在一均匀准直的入射光下,物体表面受到的光强与入射光与表面垂线夹角的余弦成正比。因此在标准太阳电池中, I_{sc} 随着角度的变化应该以垂直入射(零度入射角)为中心对称,符合余弦函数的分布规律^[19]。 I_{sc} 分布的不对称性是由于封装时电池表面与盒体的基准平面不平行,存在一定的角度造成的。而零度入射角附近的突起部分则是由于表面反射所引起的短路电流的增加所致。这一增量是由封装太阳能电池构造所引起的系统误差,定义为“表面反射误差”。为了分析 I_{sc} 的对称性以及表面反射在 I_{sc} 上所引起的误差,采用式(3)的cosine函数对 I_{sc} 测量值进行拟合,即有:

$$I_{\text{sc}i} = I_0 \cos(\theta_i), i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

式中: I_0 为 $I_{\text{sc}i}$ 随角度变化分量的振幅, θ_i 为入射角。当电池的表面与入射光垂直时(即 $\theta_0=0$),不受多重反射影响的短路电流值为 $I_{\text{sc}0} = I_0 \cos(\theta_0) = I_0$ 。这里对图7中每一个电池的测量值,除去零度入射角部分的凸起,以零度为中心用cosine函数在-5°至+5°的小角度范围进行拟合,得到圆滑的cosine曲线,即电池表面与入射光垂直时不受多重反射影响的短路电流值为振幅(I_0),用式(3)的函数得到理想的cosine分布曲线,如图7中的实线所示。把图中的实测数值与拟合的cosine曲线进行比较不难发现,所有电池的 I_{sc} 分布与理想的Cosine分布都不完全吻合,说明电池的入射特性与理想分布之间存在一定的差异。而电池C、D和F的实测曲线相对于

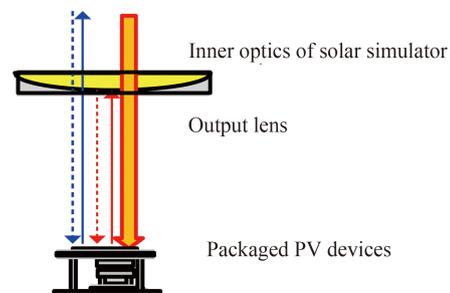


图 6 在模拟光源系统和被测样品之间形成的多重反射原理示意图

Fig. 6 Principle of multiple reflections between optics of solar simulator and surface of packaged PV devices

零点呈现不同程度的非对称现象, 说明电池片在盒体内的安装与基准不平行, 存在一定的角度。

在零度入射角附近 I_{sc} 实测值凸起部分的最大值与对应入射角处拟合cosine曲线之间的差异为表面反射所引起的增益, 即表面反射误差(见图7中的插图)。表4为各个封装太阳电池由于表面反射所引起的 I_{sc} 误差, 可以看出电池A表面反射所引起的 I_{sc} 误差最小, 电池B和D的 I_{sc} 误差相对较大, 电池D的 I_{sc} 达到0.205%。由于D电池是采用晶体硅太阳电池结合滤光片模拟单结非晶硅薄膜太阳电池的光谱

响应特性, 其较强的表面反射可能是由于滤光片所引起的。

由于电池表面反射导致的多重反射随着模拟太阳光源的光学系统结构和被测试样品的光学特性的不同而变化, 图7和表4中的计算结果是基于本课题组的高稳态模拟太阳光源得到的, 该模拟太阳光源的输出透镜的焦距 $f=355\text{ mm}$, 发散角小于 5° 。如果模拟太阳光源的输出透镜焦距变短, 发散角变大, 由于表面反射所引起的 I_{sc} 误差会更大。因此在设计标准太阳电池时, 要充分考虑其光学结

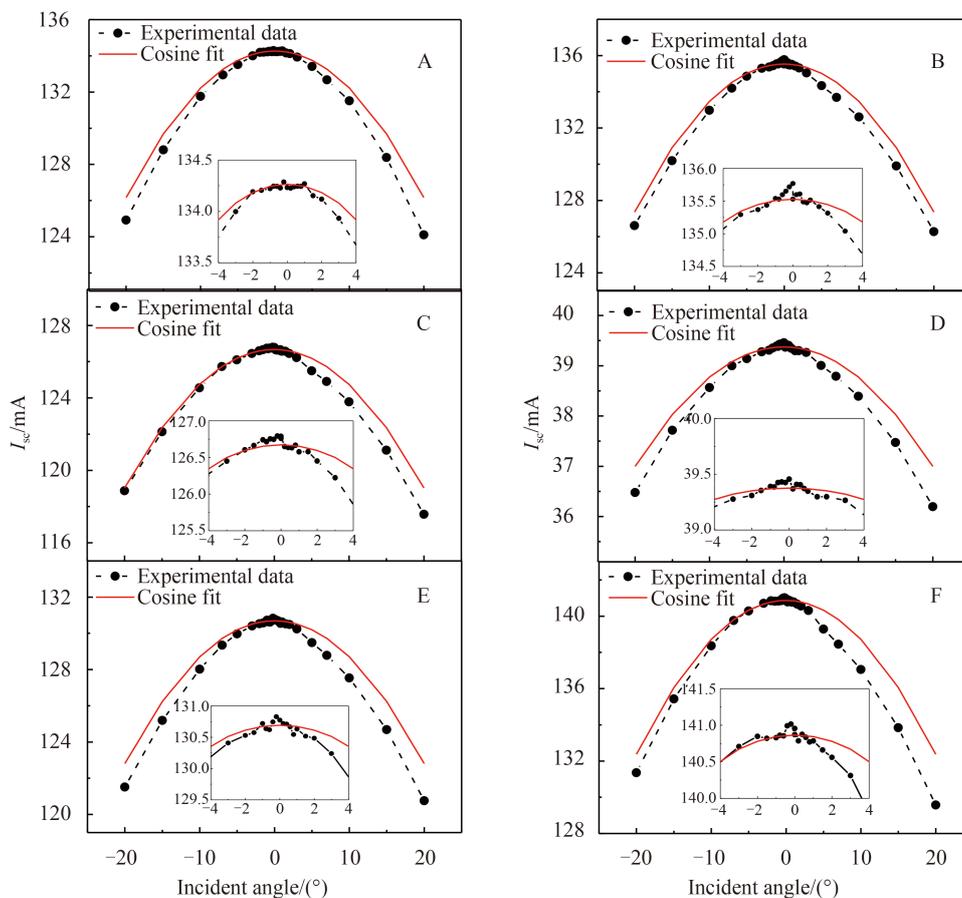


图 7 封装太阳电池短路电流与入射角度的关系曲线(插图为各电池在 0° 附近($-4^\circ\sim 4^\circ$)实测值与拟合值的对比)

Fig. 7 Dependence of I_{sc} of packaged PV devices on incident angle (Inserts highlight conformity between measured and fitted data at small incident angles from -4° to 4°)

表 4 封装太阳电池表面反射所引起的短路电流的变化及误差。

Tab. 4 The change of I_{sc} value due to multiple reflection effect

Cell No.	A	B	C	D	E	F
Measured I_{sc}/mA	134.232	135.769	126.789	39.456	130.775	140.956
Fitted I_{sc}/mA	134.265	135.529	126.674	39.375	130.693	140.866
Deviation/%	0.025	0.177	0.091	0.205	0.063	0.064

构, 选用合适的材料, 使电池表面对光的反射降到最小; 并且在制作安装时, 要使电池的表面与盒体的基准面平行, 避免由于电池倾斜所引起的误差。

4 结论

本文基于IEC国际标准对标准太阳电池结构以及测量中的基本规定, 研究了我国不同厂家生产

的封装太阳能电池的温度和电流稳定性、光谱响应特性以及表面反射对 I_{sc} 的影响。结果表明：封装太阳能电池的结构以及热电偶的设置位置直接影响温度测量的真实性和准确性，各种电池的温度响应特性也不相同，最终影响封装太阳能电池短路电流的稳定性。温度和短路电流的不稳定性的变异系数最高可达0.12%和0.039%。在有、无白偏置光照条件下的光谱响应反映其光照特性的线性特性，同一类型的晶体硅太阳能电池显示了不同的光谱响应特性。引入SM和 $|1-M|$ 作为判断光谱响应特性的物理参量，定量分析了封装太阳能电池在有、无白偏置光条件下的光谱响应差异。在封装太阳能电池的 I_{sc} 随入射光照射角度变化的曲线中，实测值与cosine拟合曲线的差异反映出封装太阳能电池与金属盒基准面的平行性以及表面反射特性。电池片与基准面的不平行造成 I_{sc} 不同程度的非轴对称分布。在入射光垂直入射时，实测曲线与拟合曲线的差值为表面反射所引起的 I_{sc} 误差。封装太阳能电池

表面的光反射直接影响 I_{sc} 的测量值，其最大相对误差可达0.21%。

本文介绍的测量和分析方法不限于对标准太阳能电池的校准和量值传递，对太阳能电池器件和组件的测量也具有参考价值。例如，电池片和组件表面的反射会对模拟太阳光源的光照分布和强度产生影响，在设备制造和测量中应该尽量避免。另外，视野角及对脉冲模拟光源的特性对封装太阳能电池的性能亦有影响，这需要进一步的研究。

5 致谢

本文是在日本振兴协会(Japan Science and Technology Agency, JST)组织的“日本·亚洲青少年科学交流项目(Japan-Asia Youth Exchange Program in Science)”下，与日本产业技术综合研究所太阳能发电研究中心共同研究的成果，在此对他们提供的帮助表示感谢。

参考文献：

- [1] IEC 60904-1: Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics [S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [2] IEC 60904-3: Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data [S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2008.
- [3] GB/T 6495.1: 光伏器件 第一部分：光伏电流 – 电压特性的测量[S]. 北京：国家技术监督局，1996.
- GB/T 6495.1: Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 1996. (in Chinese)
- [4] GB/T 6495.3: 光伏器件 第三部分：地面用光伏器件的测量原理及标准光谱辐照度数据[S]. 北京：国家技术监督局，1996.
- GB/T 6495.3: Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 1996. (in Chinese)
- [5] ISO 21348: Space environment (natural and artificial) — Process for determining solar irradiances [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2007.
- [6] EMERY K A . Solar simulators and $I-V$ measurement methods[J]. *Solar Cells*, 1986, 18(3-4): 251-260.
- [7] GREULICH J, GLATTHAAR M, REIN S. Fill factor analysis of solar cells' current-voltage curves[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2010, 18(7): 551-515.
- [8] 王志明, 龚振邦, 魏光谱, 等. 用于太阳能电池测试的太阳模拟技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1542-1547.
- WANG ZH M, GONG ZH B, WEI G P, *et al.*. Solar simulation technique for solar cell measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1542-1547. (in Chinese)
- [9] 周春兰, 王文静, 李海玲, 等. 用电学参数表征晶体硅太阳能电池特性[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1163-1170.
- ZHOU CH L, WANG W J, LI H L, *et al.*. Characterization of crystalline silicon solar cells by electrical parameters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1163-1170. (in Chinese)
- [10] 蔡建文, 李萍萍, 徐传明, 等. 太阳能电池测试系统及其参数匹配优化研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 517-521.
- CAI J W, LI P P, XU CH M, *et al.*. Study on solar cell testing system and its parameter matching optimization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 517-521. (in Chinese)

- [11] IEC 60904-4: Photovoltaic devices – Part 4: Reference solar devices – Procedures for establishing calibration traceability [S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [12] OSTERWALD C R, ANEVSKY S, BUCHER K, *et al.*. The world photovoltaic scale: an international reference cell calibration program[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1999, 7(4): 287-297.
- [13] IEC 60904-2: Photovoltaic devices – Part 2: requirement for reference solar devices [S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015.
- [14] IEC 60904-8: Photovoltaic devices – Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device [S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014.
- [15] IEC 60904-10: Photovoltaic devices – Methods of linearity measurement [S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [16] AHN S, IGARI S. Establishment of a primary reference solar cell calibration technique in Korea: methods, results and comparison with WPVS qualified laboratories[J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 139-147.
- [17] SHIMOKAWA R, MIYAKE Y, NAKANISHI Y. Possible errors due to deviation from the cosine response in the reference cell calibration under global irradiance[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1986, 25(2): L102-L104.
- [18] SHIMOKAWA R, NAGAMINE F, HAYASHI Y. Photon collection enhancement by white rear cover reflection and the design of reference cells for module performance measurement[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1986, 25(3): L165-L167.
- [19] BALENZATEGUI J L, CHENLO F. Measurement and analysis of angular response of bare and encapsulated silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, 86(1): 53-83.

作者简介:



卞洁玉 (1989-), 女, 江苏盐城人, 博士研究生, 2011年于南京理工大学获得学士学位, 主要从事标准太阳能电池校准及标准测试方面的研究。
Email: jybian@mail.sim.ac.cn

导师简介:



刘正新 (1967-), 男, 湖北随州人, 博士, 研究员, 1989年于长春理工大学获得学士学位, 2000年于日本国立丰桥技术科学大学获得博士学位, 主要从事晶体硅异质结和CIGS薄膜太阳能电池, 标准太阳能电池校准及标准测试, 太阳能电池组件可靠性方面的研究。
Email: z.x.liu@mail.sim.ac.cn