

文章编号 1004-924X(2014)06-1517-07

## 晶体硅光伏电池的标准测试

周健<sup>1\*</sup>, 卞洁玉<sup>1,2</sup>, 李红飞<sup>1,2</sup>, 刘毓成<sup>1</sup>,

乔颖硕<sup>1,2</sup>, 易亚沙<sup>1,3,4</sup>, 刘世勇<sup>5</sup>, 刘正新<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050; 2. 中国科学院大学, 北京 100039;  
3. 密歇根大学, 迪尔伯恩 密歇根 美国 48128-2406; 4. 麻省理工学院, 坎布里奇 马萨诸塞 美国 02139;  
5. 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 为了建立太阳电池的标准测试规范流程, 对影响太阳电池标准测试不确定度的各类因素进行了评价和筛选。基于太阳光模拟器、分光光度仪、IV测试仪、标准太阳电池等二级太阳电池标准测试设备与器件, 开展了多项标准测试技术的研究。对电池测量过程中太阳电池模拟光源的空间不均匀性、时间不稳定性、仪器测量重复性、扫描方向导致的不确定度、电池反射率和透射率、面积测量不确定度、量子效率等各类影响因素进行了测量, 给出了高效晶体硅太阳电池测量不确定度的测量流程, 最终导出在现有实验室测量条件下的扩展测量不确定度为 $\pm 3.94\%$ 。基于对常规太阳电池测试数据的比较, 对常规电池测量方法进行了改进, 将测量不确定度降低了 $0.19\%$ 。最后, 提出了双面电池的精确测试流程和方法, 为其它双面光电池的标准测量提供了借鉴。

**关键词:** 硅太阳电池; 测试标准; 太阳光模拟器; 测量不确定度

**中图分类号:** TM914.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1517

## Standard measurement of crystal silicon solar cells

ZHOU Jian<sup>1\*</sup>, BIAN Jie-yu<sup>1,2</sup>, LI Hong-fei<sup>1,2</sup>, LIU Yu-cheng<sup>1</sup>,

QIAO Ying-shuo<sup>1,2</sup>, YI Ya-sha<sup>1,3,4</sup>, LIU Shi-yong<sup>5</sup>, LIU Zheng-xin<sup>1</sup>

(1. *Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*;

3. *University of Michigan, Dearborn, MI 48128-2406, U. S. A*;

4. *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, U. S. A*;

5. *Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: zjian@mail.sim.ac.cn*

**Abstract:** To build a standard test specification for solar cells, various kinds of affect factors on the final uncertainty of solar cell standard tests were evaluated and selected. Based on the secondary solar cell standard test equipment and devices, such as sun simulator, spectral sensitivity, IV tester and standard solar cells, several kinds of testing technologies were researched. Some effect factors in measuring processing were discussed, including the spatial uncertainty of solar cell simulator, tempo-

**收稿日期:** 2013-10-13; **修订日期:** 2013-11-18.

**基金项目:** 中国科学院重要方向项目 (No. KGCX2-YW-399+1); 中国科学院院地合作资助项目 (No. YDJDBNJ-2012-027); 上海市自然科学基金资助项目 (No. 13ZR1447400); 中国科学院国际合作重点项目 (No. DWHZ20120930); 上海市科委国际合作重点资助项目 (No. 12160706700)

ral stability, measuring repeatability, the uncertainty from sweep directions, the reflection and transparency of cell, the uncertainty for area and External Quantum Efficiency (EQE). Then, the measuring procedure of a high efficiency crystalline silicon solar cell was proposed and the extension test uncertainty of 3.94% was derived under the conditions of existing laboratory measurement. Based on a comparison to conventional solar cell test data, the conventional cell testing method was improved, and the uncertainty of measurement was reduced by 0.19%. Finally, a standard testing procedure for a double-side cell was proposed, which provides a reference for other related cell measurements.

**Key words:** silicon solar cell; measurement standard; solar light simulator; measuring uncertainty

## 1 引言

太阳能电池的标准测试是以标准太阳光为基准,模拟太阳光源(Solar Simulator)作为测量基准(Standard Test Condition)进行的精确测试。地球表面上使用的太阳能电池通常用(AM1.5, 1000 W/m<sup>2</sup>, 25 °C)来测量。太阳能电池标准测量是一个国家发展光伏产业战略的起点。多年来,发达国家纷纷建立了太阳能电池标准测试机构,为光伏企业和科研机构提供标准测试服务,并参与制定 IEC 国际标准,为本国的产业发展赢得先机。目前,只有美国可再生能源实验室(NREL)、德国联邦物理技术研究所(PTB)和日本产业技术综合研究所(AIST)具有一级太阳能电池标准测试职能。另外,德国 Fraunhofer ISE,美国 UL,日本 JET 等机构具有二级标准测试职能。近年来,印度,韩国,新加坡,台湾通过国际合作,已建立或正在建立太阳能电池标准测试平台<sup>[1-5]</sup>。

虽然我国是世界最大的太阳能电池制造和出口国,但是至今未有一家与国际接轨的太阳能电池标准测试机构,光伏企业和研究机构必须通过国外机构进行标准器件的标定和标准测试,不仅花费大量的时间和经费,而且由于缺少基础数据积累,在国际标准制定中很难反映中国的话语权,致使太阳能电池标准测试技术进展缓慢。因此,有必要开展相关的平台建设和技术研究。

中科院上海微系统所新能源技术中心具有高效率太阳能电池的研究开发基础,是我国唯一与国际三大标准测试机构之一的日本 AIST 正式建立国际合作关系,开展太阳能电池标准测试技术合作研究的国立研究机构。目前已从日本引进了人才,购置了二级太阳能电池标准测试设备,组建了研究团队,具有了从事标准测试的技术基础和环境

条件,目的是建设符合 IEC 国际标准(17025)要求的二级标准测试平台。

目前我国开展的标准测量研究主要针对对太阳模拟器设备研制,由于制造光路的设计和制造技术有待提高,样机的光谱空间不均匀性普遍高于±2.5%,明显高于美国、日本等发达国家的设备技术指标,难以满足我国太阳能电池标准测试研发要求<sup>[6]</sup>。常规的测量容易忽略各类因素导致的不确定度,造成较大的设备测量扩展不确定度<sup>[7-9]</sup>,因此,有必要对影响太阳能电池标准测试不确定度的各类因素进行评价,筛选,形成规范测试流程。本文基于太阳光模拟器、分光光度计、IV 测试仪、标准太阳能电池等二级太阳能电池标准测试设备与器件,开展多项标准测试技术研究。对电池测量过程中太阳能电池模拟光源的空间不均匀性、时间不稳定性、测量仪器测量重复性、扫描方向导致的不确定度、电池反射率和透射率影响、面积测量不确定度、量子效率等各类影响因素进行比较研究,最终给出现有测量条件下的测量不确定度,为 HIT 电池的精确测试提供了有效测量方法,也为双面收光电池的标准化测量提供了借鉴。

## 2 实验部分

被测样品为 125 mm×125 mm 单晶硅太阳能电池,测试前先将电池在模拟光源下老化 30 min。用于校正的标准电池为 AIST AK-200,面积为 4 cm<sup>2</sup>, I<sub>sc</sub> = 130.31 mA, 25 °C (± 1 °C),扩展不确定度(Extended Relative Uncertainty, ERU)为 0.90%,编号为 JISC8904-2,校准时间为 October 12, 2011。采用标准电池对光源进行校准,标准电池放置在光斑中心位置,校准至 I<sub>sc</sub> = 130.31 mA, 25 °C。

测量所用太阳模拟器为日本山下公司生产的

Yamashita-AA 型设备,分光光谱仪采用日本分光计器(Bunkoukeiki Co. Ltd.)公司的 Model CEP-25ML\_CAS 型设备。

### 3 测量结果与讨论

#### 3.1 模拟太阳光平面不均匀度测试

标准电池面积为  $4 \text{ cm}^2$ ,选择光斑内均匀分

布的 9 个位置,将标准电池置于光斑内范围内不同位置上,分别测量 IV 和电学参数。不确定度的计算公式为:

$$U = \pm \left| \frac{(\text{Max} - \text{Min})}{(\text{Max} + \text{Min})} \right|, \quad (1)$$

其中:Max 表示测量值的最大值,Min 为测量值的最小值。模拟太阳光光强平面内分布不均匀度测试结果如表 1 所示。

表 1 模拟太阳光光强平面分布不均匀度测试数据表

Tab. 1 Uncerativity of irradiance uniformity of solar simulator

Parameter	$J_{sc}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$I_{sc}/\text{A}$	$V_{oc}/\text{V}$	FF/%	$E_{ff}/\%$	$R_s/\Omega$	$I_{rr}/\text{sun}$
Max.	0.032 65	0.130 62	0.607 06	79.637 73	15.746 22	0.336 82	0.999 94
Min.	0.031 63	0.126 52	0.605 85	79.217 9	15.186 59	0.328 19	0.999 87
Ave.	0.032 22	0.128 89	0.606 58	79.388 1	15.516 80	0.332 22	0.999 90
Uncertainty(±)	1.59%	1.59%	0.10%	0.26%	1.81%	1.30%	0.00%

表 2 模拟太阳光光强波长分布测试数据表

Tab. 2 Solar spectral irradiance distribution of solar simulator

Wavelength /nm	Total/ $(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	Wavelength /nm	Energy distribution			Spectral agreement	
			JIS C8912	YSS-160AA	YSS-160AA	IEC-Max	IEC-Min
400~500	141.872	400~500	18.4	19.5	1.06	1.25	0.75
500~600	141.718	500~600	19.9	19.5	0.98	1.25	0.75
600~700	126.775	600~700	18.4	17.4	0.95	1.25	0.75
700~800	107.327	700~800	14.9	14.7	0.99	1.25	0.75
800~900	98.837	800~900	12.5	13.6	1.09	1.25	0.75
900~1 000	63.585	900~1 000	15.9	15.4	0.97	1.25	0.75
1 000~1 100	48.509	Total	100.0	100.0			
400~1 100	728.623						

进一步研究将标准电池掩膜孔缩小至  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ,详细测量光源照射面积内部光强分布。常规测量选择在光强分布最为均匀的范围内进行,从而提高测量精度。由表 1 可见,影响电池效率测量精度的主要因素为电池短路电流(1.59%),而测量过程中光强  $I_{rr}$  波动性测量不确定性是次要因素。

#### 3.2 模拟太阳光光强波长分布

表 2 所示为基于 YSS-160AA 型模拟太阳模拟器测量的光强波长分布测试数据表,可以发现光谱合致度(Mismatch)达到 9%,远小于

IEC60904-3 标准规定的 25%的要求,可以判定该模拟器光谱合致度等级为 A 级。

#### 3.3 定常光时间不稳定性测试(Temporal stability)

模拟光源预热(Warm Up,30 min)后测量 48 min,为了保证每次由于光照导致的电池温度上升一致,并保证测量时的电池温度一致,每 6 min 测量一次,合计测量 8 次。标准电池面积为  $4 \text{ cm}^2$ 。

由表 3 可见,影响电池效率测量精度的主要因素为电池短路电流(0.17%),而光强波动性(0.02%)测量不确定性是次要因素。

表 3 模拟太阳光时间不稳定度测试数据表

Tab. 3 Uncertainty of irradiance temporal instability of solar simulator

Parameter	$J_{sc}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$I_{sc}/\text{A}$	$V_{oc}/\text{V}$	FF/%	$E_{ff}/\%$	$R_s/\Omega$	$I_{rr}/\text{sun}$
Max.	0.032 66	0.130 66	0.607 87	79.536 64	15.731 28	0.330 58	1.000 18
Min.	0.032 55	0.130 21	0.606 31	79.013 54	15.666 07	0.328 9	0.999 87
Ave.	0.032 6	0.130 42	0.607 08	79.308 48	15.698 18	0.329 59	0.999 94
Uncertainty(±)	0.17%	0.17%	0.13%	0.33%	0.21%	0.25%	0.02%

### 3.4 重复性(Repeatability)测量

测量 5 次,被测量电池面积为  $16 \text{ cm}^2 \cdot J_{sc}$  的测量平均值为  $0.042\ 394\ 138 \text{ A/cm}^2$ , 单次测量标准差  $S$  为  $1.843\ 83 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。由表 4 可见,短路电流的测量不确定度为  $0.06\%$ 。表明不同次测量结果差异小,仪器测量重复性好。

### 3.5 测试方向导致的不确定度

#### 3.5.1 正向测量( $I_{sc} \rightarrow V_{oc}$ )

测试方向(Sweeping Direction): Single dec. ( $-0.1 \sim 0.73 \text{ V}$ ), 样片号: TH1, 面积:  $125 \times 125 - 7.95 = 148.30 \text{ cm}^2$ , 测试台水温  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ , 积分时间(Integ. Time)  $500 \mu\text{s}$ , 测量 9 次结果如表 5 所示:

表 4 太阳电池测试重复性数据表

Tab. 4 Repeatability of measurement of solar cell parameter

Parameter	$J_{sc}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$I_{sc}/\text{A}$	$V_{oc}/\text{V}$	FF/%	$E_{ff}/\%$
Max.	0.042 42	0.678 8	0.705 5	62.306 7	11.923 1
Min.	0.042 38	0.678 0	0.704 6	61.983 1	11.853 6
Ave.	0.042 39	0.678 3	0.705 2	62.116 9	11.884 8
Repeatability(±)	0.06%	0.06%	0.07%	0.26%	0.29%

表 5 太阳电池正向测量不确定度数据表

Tab. 5 Uncertainty of measurement of solar parameter along  $I_{sc} \rightarrow V_{oc}$  direction

Parameter	$J_{sc}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$I_{sc}/\text{A}$	$V_{oc}/\text{V}$	FF/%	$E_{ff}/\%$	$R_s/\Omega$	$I_{rr}/\text{sun}$
Max.	0.036 31	5.384 69	0.644 75	79.572 85	18.531 1	0.009 31	1.000 03
Min.	0.036 25	5.375 93	0.640 5	79.094 13	18.430 8	0.007 05	0.999 8
Ave.	0.036 28	5.381 19	0.642 63	79.257 72	18.481 79	0.008 31	0.999 87
Uncertainty(±)	0.08%	0.08%	0.33%	0.30%	0.27%	13.81%	0.01%

#### 3.5.2 反向测量( $V_{oc} \rightarrow I_{sc}$ )

Direction: Single inc. ( $0.73 \sim 0.1 \text{ V}$ ) 样片号: TH1, 面积:  $125 \times 125 - 7.95 = 148.30 \text{ cm}^2$ , 测试台水温  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ , 积分时间为  $500 \mu\text{s}$ , 测量 9 次,

结果如表 6 所示。比较发现正向测量电池效率为  $18.482\%$ , 反向测量电池效率为  $18.425\%$ , 说明对于 HIT 电池, IV 测量扫描方向对测量结果具有较为明显的影响。有必要增加测量扫描时间。

表 6 太阳电池反向测量不确定度数据表

Tab. 6 Uncertainty of measurement of solar parameter along  $V_{oc} \rightarrow I_{sc}$  direction

Parameter	$J_{sc}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$I_{sc}/\text{A}$	$V_{oc}/\text{V}$	FF/%	$E_{ff}/\%$	$R_s/\Omega$	$I_{rr}/\text{Sun}$
Max.	0.036 3	5.383 57	0.638 95	79.626 21	18.455 65	0.006 88	1.000 05
Min.	0.036 23	5.373 6	0.638 33	79.405 2	18.392 71	0.006 84	0.999 84
Ave.	0.0362 7	5.379 39	0.638 64	79.537 43	18.425 41	0.006 86	0.999 88
Uncertainty(±)	0.10%	0.09%	0.05%	0.14%	0.17%	0.29%	0.01%

### 3.6 太阳电池透射率和反射率测量

如图 1,测量 5 组晶体硅电池透射率  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ ,  $T_1$  和  $T_2$  同点测量,  $T_4$  和  $T_5$  同点重复测量,  $T_1$ 、 $T_3$ 、 $T_5$  为不同点,通过在 910~2 000 nm 波长内计算不确定度平均值,获得  $T_1$  和  $T_2$  的同点重复测量不确定度为  $\pm 0.408\%$ ,  $T_4$  和  $T_5$  的同点测量不确定度为  $\pm 0.211\%$ 。然而不同点测量不确定度为  $\pm 5.722\%$ ,这主要是由于电池表面栅线影响了光的透过率。因此在测试双面电池透射率时,可以采用多点测量多次的方法,然后采用数学平均来获得电池透射率。

通常单面收光电池由于背面有背银反射层,只需要考虑单面的反射,透射率几乎为 0,无需要考虑测量时背面测量台反射率影响。而双面收光的电池则需要考虑背面测试台反射率的影响。

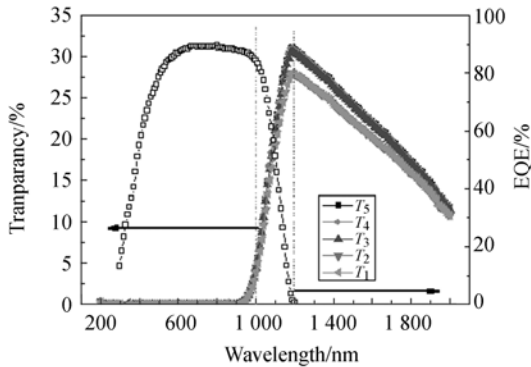


图 1 透射率和外量子效率随波长变化关系

Fig. 1 Transparency and external quantum efficiency vs. wavelength

### 3.7 太阳电池量子效率测量

#### 3.7.1 双面太阳电池光谱响应测量

太阳能电池量子效率,即太阳能电池光电转换效率 (Incident-Photon-to-electron Conversion Efficiency, IPCE)。外量子效率 (External Quantum Efficiency, EQE) 为太阳能电池的电荷载流子数目与外部入射到太阳能电池表面的一定能量的光子数目之比。内量子效率 (Internal Quantum Efficiency, IQE) 为太阳能电池的电荷载流子数目与外部入射到太阳能电池表面没有被太阳能电池反射回去的,没有透射过太阳能电池的一定能量的光子数目之比。

太阳电池分光测试仪,用于测量电池光谱响应  $SR = I/E = \text{光电流}/\text{辐射光强}$ 。  $EQE = N_e/N_p = \text{产生电子数}/\text{辐射光子数}$ 。则:

$$IPCE = \eta = \frac{1}{\lambda} \frac{240}{\lambda} SR(\lambda) \cdot 100. \quad (2)$$

测量双面收光太阳电池,可以得出电池光谱响应和外量子效率之间的关系,如式(2)所示、图 2 所示。测量光谱响应 5 次,得到测量不确定度为 0.2%。

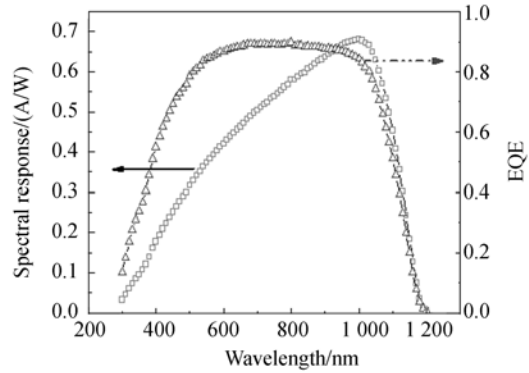


图 2 光谱响应和外量子效率随波长变化关系

Fig. 2 Spectral response and external quantum efficiency vs. wavelength

#### 3.7.2 双面电池的短路电流的准确测量

$$\frac{I_{SC\text{rear-measured}}}{I_{SC\text{front-measured}}} = \frac{\int_{300\text{ nm}}^{1300\text{ nm}} E_{\text{Am}1.5} \times SR_{\text{rear}} \times T \times d\lambda}{\int_{300\text{ nm}}^{1300\text{ nm}} E_{\text{Am}1.5} \times SR_{\text{front}} \times d\lambda}, \quad (3)$$

式中:  $E_{\text{Am}1.5}$  为 AM1.5 条件下的太阳光谱(光强,单位为  $\text{Photon}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ),  $SR_{\text{rear}}$  为从电池背面测量得到的光谱响应相对值,  $SR_{\text{front}}$  为从电池正面测量得到的光谱响应相对值。

$I_{SC\text{front-measured-black}} = 606 \text{ mA}$ ,为从电池正面测量的电池短路电流(测试台为全黑,背反射为 0 时),  $I_{SC\text{front-measured-white}} = 607.15 \text{ mA}$ ,为从电池正面测量的电池短路电流(测试台为全金,背反射为 99% 时):

$$I_{SC\text{rear-measured}} = 606 \times \frac{2.94 \times 10^{19}}{1.55 \times 10^{21}} = 1.15 \text{ mA}. \quad (4)$$

由于背面反射导致的  $I_{sc}$  增加为  $1.15/606 = 0.19\%$ ,常规双面电池在实际光照条件下,应该根据实际的光照条件来考虑,如果背面也受到太阳照射,将会发出最多光(全波段,  $T = 100\%$ );根据式(2),背面对  $I_{sc}$  贡献  $I_{sc2} = 574 \text{ mA}$ ,正面光对  $I_{sc1}$  贡献  $I_{sc} = I_{sc1} + I_{sc2} = 1180 \text{ mA}$ 。如果背面部

分反射,则根据实际透射率和测试台反射率来计算。

双面电池的短路电流测量与计算流程如图 3 所示:

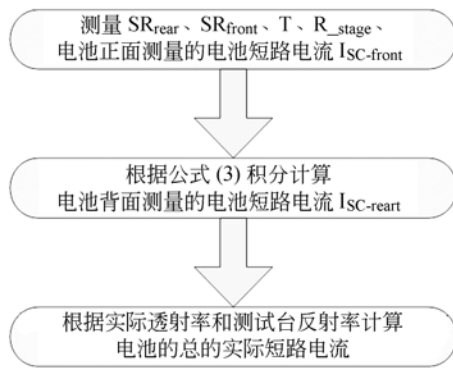


图 3 双面电池的短路电流测量与计算流程

Fig. 3  $I_{sc}$  calculating procedure of  $I_{sc}$  for double-side solar cell

### 3.8 面积测量不确定度

采用日本三丰公司(Mitsutoyo)生产的面积测试仪对电池面积进行测量。经过 5 次测量得出测量结果分别为:243.33,243.329,243.290,243.284,243.285  $\text{cm}^2$ 。如表 7 所示,通过计算,面积测量不确定度为 0.01%。

表 7 太阳能电池面积测量不确定度数据表

Tab. 7 Uncertainty of cell area measurement

Parameter	area/ $\text{cm}^2$
1	243.33
2	243.329
3	243.290
4	243.284
5	243.285
max.	243.330
min.	243.284
ave.	243.303
Uncertainty( $\pm$ )	0.01%

### 参考文献:

[1] EMERY K. Uncertainty analysis of certified photovoltaic measurements at the national renewable energy laboratory [R]. *Technical Report NREL/TP*, 2009.

### 3.9 不确定度计算与分析

不确定度确定的流程:

(1)测量不确定度源  $u_1, u_2, \dots, u_n$

(2)分析主要的不确定度源。

(3)复合不确定度  $U_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}$

(4)扩展不确定度  $U_e = 2 \times U_c$ 。

例如:关于晶体硅太阳电池不确定度测量结果为:

$u_0 = \pm 0.90\%$ ;  $u_1 = \pm 1.59\%$ ;  $u_2 = \pm 0.17\%$ ;  $u_4 = \pm 0.08\%$ ;  $u_5 = \pm 0.41\%$ ;  $u_6 = \pm 0.20\%$ ;  $u_7 = \pm 0.01\%$ 。

$U_c = \pm 1.87\%$

$U_e = 2 \times U_c = \pm 3.94\%$

由上面的分析可知,光谱的不均匀性带来的不确定度是导致扩展不确定度的最主要因素,其次是二级标准电池本身的不确定度。因此下一步的工作将关注如何提高光谱均匀性和提高标准电池的校准级别,课题组拟采用一级校正电池进行标准测试。另外,在双面电池的测试中由于需要考虑到透射光的影响,透射光的不确定度也是需要考

## 4 结 论

本文对太阳电池模拟光源的空间不均匀性、时间不稳定性、测量仪器测量重复性、扫描方向导致的不确定度、电池反射率和透射率影响、面积测量不确定度、量子效率进行了测量,给出了高效晶体硅太阳电池测量不确定度测量流程,最终给出现有实验室测量条件下的扩展测量不确定度为  $\pm 3.94\%$ 。基于对常规太阳电池测试数据比较,对常规电池测量进行了校正,将测量不确定度降低 0.19%。提出的双面电池的精确测试流程和方法,可为其它双面收光电池的标准化测量提供借鉴。

[2] HOHL-EBINGER J, SIEFER G, WARTA W. Non-linearity of solar cells in spectral response measurements, in 22th european photovoltaic solar energy conference and exhibition [C]. 2007.

[3] METZDORF J. Calibration of solar cells. 1: The differential spectral responsivity method [J]. *Ap-*

- plied Optics*, 1987, 26(9):1701-1708.
- [4] HOHL-EBINGER J, GROTE D, HUND B, *et al.*. Contacting bare solar cells for STC measurements. in 23rd EUPVSEC[C]. *Valencia Spain*. 2008.
- [5] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, *et al.*. Solar cell efficiency tables(v 36) Progress in Photovoltaics: Research and Applications [C]. 2010, 18(5):346-352.
- [6] 王志明, 龚振邦, 魏光谱, 等. 用于太阳电池测试的太阳模拟技术[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1542-1546.  
WANG ZH M, GONG ZH B, WEI G P, *et al.*. Solar simulator Technology on Solar cell Measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1542-1546. (in Chinese)
- [7] 王志明, 龚振邦, 魏光谱. 薄膜与小组件太阳电池特性参数测试系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3):64-73.  
WANG ZH M, GONG ZH B, WEI G P. Investigation on thin film and small module parameter measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):64-73. (in Chinese)
- [8] 蔡建文, 李萍萍, 徐传明, 等. 太阳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 C 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)
- [9] 马军山, 侯琳琳, 付东翔, 等. 双荧光标记生物芯片激光共聚焦检测系统[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6):727-734.  
MA J SH, HOU L L, FU D X, *et al.*. Two-laser scanning confocal system for microarray analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6):727-734. (in Chinese)

#### 作者简介:



周 健(1970—),男,江苏大丰人,博士,研究员,1997年于中科院合肥等离子体所获得硕士学位,2000年于中科院上海冶金所获博士学位,主要从事半导体材料与器件设计与工艺,多层薄膜热、电、光设计技术,薄膜和晶硅太阳电池技术和太阳电池标准测试方面的研究。Email: zjian@mail. sim. ac. cn.



卞洁玉(1989—),女,江苏盐城人,博士研究生,主要从事太阳电池标准测试技术方面的研究。Email: jybian@mail. sim. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)