

# 偏光光谱特性对太阳电池光谱响应的影响

时强<sup>1,2,3</sup>, 卞洁玉<sup>1</sup>, 刘正新<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210

**摘要** 选取单晶硅、多晶硅和模拟非晶硅封装太阳电池为研究对象,研究了偏置光的辐照度和光谱分布等偏光光谱特性对太阳电池光谱响应的影响。太阳电池的光谱响应与偏置光有关,随着偏置光辐照度增大,长波段范围内的光谱响应增大,太阳电池短路电流呈线性增大。偏置光的光谱分布对太阳电池的光谱响应也有影响,光谱失配度越大,光谱响应的差异越大。为了提高太阳电池光谱响应测量的准确性,偏置光的辐照度和光谱分布应该尽量接近 IEC 标准。

**关键词** 探测器; 太阳电池; 光谱响应; 滤光片; 偏置光; 标准测试

**中图分类号** TM914.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.100401

## Effects of Bias Spectral Characteristics on Spectral Response of Solar Cells

Shi Qiang<sup>1,2,3</sup>, Bian Jieyu<sup>1</sup>, Liu Zhengxin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Center for New Energy Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China

**Abstract** Using monocrystalline silicon, multicrystalline silicon and simulated amorphous silicon solar cells as research objects, we study the influences of bias spectral characteristics such as irradiance and spectral distribution on the spectral response (SR) of solar cells. The SR of solar cells is related to the bias light. The SR at long wavelength region increases and the short-circuit current of solar cell increases linearly with the increase of irradiance of bias light. The spectral distribution of bias light also has influence on the SR of solar cell. Large spectral mismatch degree induces large difference in SR measurement. Therefore, the irradiance and spectral distribution of bias light should be as close as possible to the IEC standard in order to improve the accuracy of SR measurement of solar cells.

**Key words** detectors; solar cell; spectral response; filter; bias light; standard measurement

**OCIS codes** 040.5350; 350.6050; 120.4800

## 1 引言

太阳电池的光谱响应是评价太阳电池转换效率的重要指标,对太阳电池性能的分析 and 研究具有重要意义<sup>[1-3]</sup>,在太阳电池的标准测量以及校准溯源方面具有重要作用,采用太阳光模拟器法对标准太阳电池进行

**收稿日期:** 2017-03-28; **收到修改稿日期:** 2017-04-27

**基金项目:** 国家国际科技合作专项(2015DFA60570)、上海张江国家自主创新示范区专项发展资金(ZJ2015-ZD-001)

**作者简介:** 时强(1991—),男,硕士研究生,主要从事太阳电池标准测试与校准方面的研究。

E-mail: shiqiang@mail.sim.ac.cn

**导师简介:** 刘正新(1967—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事太阳电池材料和器件方面的研究。

E-mail: z.x.liu@mail.sim.ac.cn(通信联系人)

校准或对太阳能电池进行标准测量时,标准太阳能电池的选择、太阳光模拟器辐照度的调节、光谱失配度的计算以及太阳能电池的电流-电压曲线在标准测试条件下的修正等都需要测量太阳能电池的光谱响应<sup>[4-7]</sup>,而测量太阳能电池光谱响应的微分光谱响应法则是目前测量不确定度最小的标准太阳能电池校准方法<sup>[8]</sup>。

国内外已对太阳能电池光谱响应的测试原理及测试方法进行了很多研究,并形成了一系列的测试标准。国际上通用的太阳能电池测试标准是国际电工委员会制定的 IEC 系列标准,其中 IEC 60904-8 规定了太阳能电池光谱响应测试的方法。太阳能电池光谱响应测试是将一系列不同波长的单色光照射到太阳能电池上,测量相应单色光波长下产生的短路电流( $i_{sc}$ )和对应的入射单色光功率,两者的比值即为太阳能电池的光谱响应值。按照 IEC 60904-8 的规定,在标准条件下测试太阳能电池的光谱响应时,通常需要在与 AM1.5G 标准太阳光谱相似的白偏光照射下进行<sup>[9]</sup>。

太阳能电池光谱响应的准确测试受多个因素的影响,如外界环境温度、单色光的带宽、辐照度不均匀性,以及用于标定单色光辐照度的参考器件的线性度及校准不确定度等<sup>[10-12]</sup>。这些因素对光谱响应测试结果准确性的影响不同,基于光谱响应测试结果进行的光谱失配度修正和短路电流计算结果的准确性也会不同,从而对太阳能电池的校准和标准测试的不确定度产生的影响不同。本文通过改变偏置光的辐照度和光谱分布,研究了偏光光谱特性对光谱响应的影响,为太阳能电池光谱响应的准确测试及太阳能电池校准不确定度的评估提供借鉴。

## 2 实 验

太阳能电池光谱响应测试仪器选择 CEP-25ML 型设备(日本分光计器公司),该设备能产生尺寸为 25 mm×25 mm 的单色光斑,并能实现在 300~1800 nm 波长下的单色光恒定能量测量。该设备的偏置光源由一个稳态氙灯光源构成,在光谱拟合度、面均匀性及时间稳定性方面符合 IEC 60904-9 中规定的 AAA 级标准<sup>[13]</sup>,该光源的光谱分布与模拟光源 B 的光谱分布接近。测试时,通过控制挡板的快门来控制偏置光的施加。

为了提高测试精度,降低太阳能电池光谱响应测试的不确定度,加之设备照射光斑面积的限制,实验中选择常见的单晶硅、多晶硅和模拟非晶硅封装太阳能电池作为被测样品,这 3 种封装太阳能电池的有效面积均为 400 mm<sup>2</sup>(20 mm×20 mm)。其中,模拟非晶硅太阳能电池是在晶硅电池表面的覆盖玻璃上镀一层带通膜,使电池的光谱响应接近非晶硅薄膜太阳能电池的光谱响应。用于校准太阳模拟光源及光谱失配度计算的标准太阳能电池为 AIST AK-200 标准太阳能电池,其短路电流和光谱响应曲线都经过美国国家能源部可再生能源实验室(NREL)的校准。

测试各电池在有无偏置光条件下的光谱响应,并进行比较。通过在光路中插入中性滤光片实现偏置光辐照度的改变,中性滤光片能在光谱范围内等幅度、均匀地降低各波长的透过率,而不改变偏置光的光谱分布。实验选择透过率  $T$  分别为 10%、50%、80%、100%(分别对应辐照度 100,500,800,1000 W·m<sup>-2</sup>) 的 4 种中性滤光片,测试太阳能电池在不同偏置光辐照度下的光谱响应曲线。

在研究偏置光光谱分布的影响时,选择两种类型的滤光片,即长通滤光片和短通滤光片。长通滤光片在短波长的截止波长分别为 435,560,720 nm,而短通滤光片在长波长的截止波长分别为 930,810,710 nm。测试光谱响应曲线时,通过增添或更换滤光片来改变偏置光光谱。

## 3 结果与分析

### 3.1 有无偏置光对光谱响应的影响

为研究偏置光辐照度为零的特殊情况,测量 3 种太阳能电池在无偏置光照射及辐照度  $E$  为 1000 W·m<sup>-2</sup> 的偏置光照射下的光谱响应。偏置光光谱分布及 3 种太阳能电池在有无偏置光照射下的相对光谱响应曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,3 种太阳能电池在有无偏置光照射下的光谱响应曲线各不相同。模拟非晶硅太阳能电池的响应范围比传统晶硅太阳能电池的响应范围窄,但其在有无偏置光照射下的光谱响应曲线的重复度最好,如图 1(b)所示。单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池的响应曲线相似,与无偏置光照射相比,有偏置光照射的光谱响应曲线都发生了明显的改变。加入偏置光照射后,单晶硅太阳能电池的光谱响应曲线明显向红

外方向漂移,且漂移较大,如图 1(c)所示,而多晶硅太阳能电池在红外波段的响应明显增强,如图 1(d)所示。

由此可见,偏置光对不同电池的影响效果不同,这可能是由电池的结构和材料引起的。通常,在太阳能电池材料的内部及界面处会存在缺陷,而太阳能电池光谱响应测试时所用的单色光的辐照度很低,一般只有微瓦量级,远低于太阳能电池正常工作时的辐照强度,材料内部的缺陷会对太阳能电池载流子的产生、输运和复合产生影响;加入偏置光照射后,光生载流子浓度大幅提高,载流子的输运及复合机理会发生改变<sup>[4]</sup>。因此,为了获得准确的光谱响应曲线,需要在有偏置光照射的条件下进行测量。

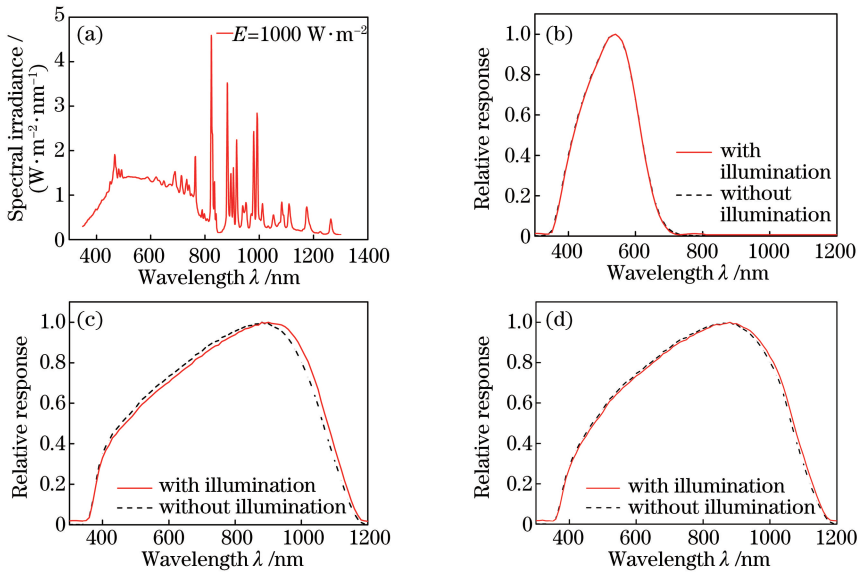


图 1 (a) 偏置光光谱及(b)模拟非晶硅太阳能电池、(c)单晶硅太阳能电池、(d)多晶硅太阳能电池在有偏置光照射下的相对光谱响应曲线

Fig. 1 (a) Spectrum of bias light and relative spectral response curves of (b) simulated amorphous silicon solar cell, (c) monocrystalline silicon solar cell and (d) multicrystalline silicon solar cell with/without bias light illumination

为了定量分析有无偏置光照射下太阳能电池光谱响应测试结果的差异对光谱失配度和短路电流的影响,引入国际标准 IEC 60904-7 中的光谱失配因子( $\sigma_{MM}$ )进行分析,其定义<sup>[14]</sup>为

$$\sigma_{MM} = \frac{\int E_{ref}(\lambda) S_{ref}(\lambda) d\lambda \int E_{meas}(\lambda) S_{sample}(\lambda) d\lambda}{\int E_{meas}(\lambda) S_{ref}(\lambda) d\lambda \int E_{ref}(\lambda) S_{sample}(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $E_{ref}(\lambda)$  为 AM1.5G 标准太阳光谱的光谱辐照度分布,  $E_{meas}(\lambda)$  为模拟太阳光源的光谱辐照度分布,  $S_{ref}(\lambda)$  为标准太阳能电池的光谱响应,  $S_{sample}(\lambda)$  为被测太阳能电池的光谱响应。

由(1)式可知,当模拟太阳光源的光谱辐照度分布与 IEC 标准规定的 AM1.5G 标准太阳光谱一致时,或被测太阳能电池的光谱响应与标准太阳能电池的光谱响应一致时,光谱失配因子  $\sigma_{MM} = 1$ , 不存在失配差异。但实际上,模拟太阳光源的光谱与 AM1.5G 标准太阳光谱以及被测电池与标准电池之间都会存在差异。因此,在太阳能电池校准和测量时必须考虑光谱失配因子的影响。

如前所述,3 种太阳能电池在有偏置光照射下的光谱响应表现不同,因此计算的光谱失配因子可能也不同,选择 2 个具有不同光谱分布的稳态模拟光源 A、B 进行比较。模拟光源 A 由氙灯和金属卤素灯双光源构成,其光谱更接近 AM1.5G 标准太阳光谱;模拟光源 B 由氙灯单光源构成;它们的光谱分布都符合 IEC60904-9 标准规定的 AAA 级标准。表 1 为 3 种太阳能电池在有偏置光照射条件下光谱失配因子的计算结果,有偏置光照射时的辐照度为  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从表 1 可以看出,有无偏置光照射对光谱失配因子的计算结果有一定影响,模拟光源的光谱拟合度越高,计算结果的差异越小。对于单光源的模拟光源 B,无偏置光照射时得到的光谱失配因子导致太阳能电池校准的不确定度大于 0.1%。因此,为保证测试结果的准确性,光谱响应测试需要在有偏置光照射的条件下进行。

表 1 有无偏置光照射时 3 种太阳电池的光谱失配因子  $\sigma_{MM}$ Table 1 Spectral mismatch factor  $\sigma_{MM}$  of three kinds of solar cells with/without bias light illumination

Simulated light	Simulated amorphous silicon solar cell			Monocrystalline silicon solar cell			Multicrystalline silicon solar cell		
	Without illumination	With illumination	Deviation /%	Without illumination	With illumination	Deviation /%	Without illumination	With illumination	Deviation /%
A	1.05785	1.05783	0.00	1.00152	1.00120	0.03	1.00165	1.00077	0.09
B	0.96892	0.96874	0.02	0.99993	1.00153	-0.16	0.99967	1.00275	-0.31

### 3.2 偏置光辐照度对光谱响应的影响

通过在偏置光路中添加中性滤光片,在不改变偏置光光谱分布的前提下,等幅度改变偏置光各波长下的辐照度。添加不同中性滤光片后的偏置光光谱以及 3 种太阳电池在不同偏置光辐照度下的光谱响应曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着偏置光辐照度增加,模拟非晶硅太阳电池光谱响应曲线没有明显变化,而单晶硅和多晶硅太阳电池在 900~1100 nm 红外波段的光谱响应逐渐增大。根据国际标准 IEC 60904-10 对太阳电池线性特性测试的规定<sup>[15]</sup>,可以用不同偏置光辐照度下的光谱响应曲线计算太阳电池的短路电流,进而利用该短路电流研究偏置光辐照度与太阳电池短路电流的线性关系。太阳电池短路电流的计算公式为

$$i_{sc} = \int S(\lambda)E(\lambda)d\lambda, \quad (2)$$

式中  $S(\lambda)$  为太阳电池的光谱响应,  $E(\lambda)$  为 AM1.5G 标准太阳光谱的光谱辐照度分布。

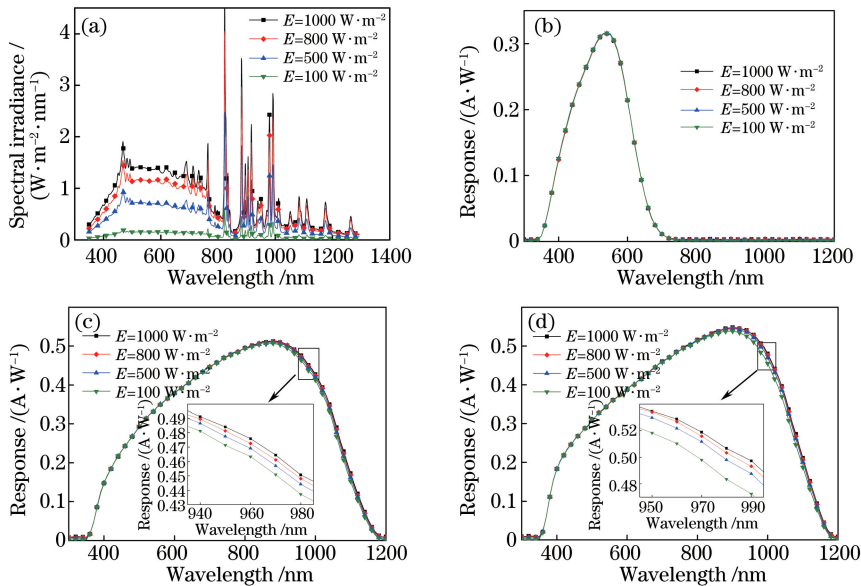


图 2 不同辐照度下(a)偏置光的光谱及(b)模拟非晶硅太阳电池、(c)单晶硅太阳电池、(d)多晶硅太阳电池的光谱响应曲线

Fig. 2 (a) Spectra of bias light and spectral response curves of (b) simulated amorphous silicon solar cell, (c) monocrystalline silicon solar cell and (d) multicrystalline silicon solar cell at different bias light irradiances

表 2 为利用(2)式计算得到的 3 种太阳电池在不同偏置光辐照度下的短路电流。从表 2 可以看出,随着偏置光辐照度的增加,太阳电池的短路电流均逐渐增大。分别对 3 种太阳电池的短路电流与偏置光辐照度的关系进行最小二乘法拟合,得到:

$$\begin{cases} i_{sc, sim} = 0.1315I_R + 36.1067 \\ i_{sc, mono} = 1.1948I_R + 116.0681, \\ i_{sc, multi} = 1.7148I_R + 122.8311 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $i_{sc, sim}$ 、 $i_{sc, mono}$  和  $i_{sc, multi}$  分别为模拟非晶硅太阳电池、单晶硅太阳电池和多晶硅太阳电池的短路电流,  $I_R$  为偏置光的辐照度。

当偏置光辐照度从  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  增加到  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  时,模拟非晶硅太阳电池、单晶硅太阳电池和多晶硅太阳电池短路电流的最大增幅分别为 0.35%、0.92% 和 1.25%,这些数值的大小与不同偏置光辐照度下光谱



响应曲线间差异的大小相对应。太阳能电池短路电流随偏置光辐照度的增大而增大,表现出了非线性特性。因此在太阳能电池校准和测试时,需要考虑太阳能电池的非线性特性对测量不确定度的影响。

表 2 不同辐照度下 3 种太阳能电池的短路电流  $i_{sc}$

Table 2 Short-circuit current  $i_{sc}$  of three kinds of solar cells at different bias light irradiances

Irradiance / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$i_{sc} / \text{mA}$		
	Simulated amorphous silicon solar cell	Monocrystalline silicon solar cell	Multicrystalline silicon solar cell
100	36.104	116.229	122.975
500	36.153	116.765	123.912
800	36.175	117.108	124.304
1000	36.232	117.299	124.513

在长波长范围内,随着偏置光辐照度增加,光谱响应增强。长波长光子的穿透深度较深,产生的载流子扩散到 PN 结的路径变长,使得其被复合的概率增大,随着偏置光辐照度增加,光生载流子浓度增加,载流子的复合概率降低,从而导致长波长的光谱响应增加<sup>[16-17]</sup>。

### 3.3 光谱分布对光谱响应的影响

图 3 是在偏置光路上加入不同类型带通型滤光片后的偏置光光谱分布,其中图 3(a)是加入不同截止波长的长通型滤光片后的光谱分布,图 3(b)是加入不同的短通型滤光片后的光谱分布,各偏置光光谱的总辐照度通过在各波长下对辐照度进行积分得到。3 种太阳能电池在不同偏置光下的光谱响应曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出:加入长通型滤光片(LP435、LP560 和 LP720)改变偏置光在短波长的光谱分布后,3 种太阳能电池的光谱响应均没有明显变化;加入短通型滤光片(SP930、SP810 和 SP710)改变偏置光在长波长的光谱分布后,模拟非晶硅太阳能电池的光谱响应曲线没有明显变化,但单晶硅和多晶硅太阳能电池在长波长区域内的光谱响应随着波长增大而增强。滤光片不仅改变了偏置光的光谱分布,还改变了偏置光的辐照度。因此,暂不能确定图 4 所示的差异是由偏置光辐照度的变化引起的,还是由偏置光光谱分布的变化引起的,还需进一步研究。

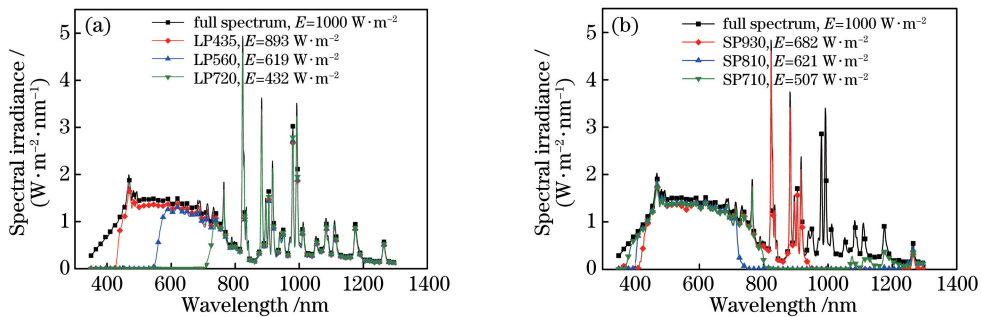


图 3 在偏置光路上加入(a)长通型滤光片和(b)短通型滤光片后偏置光的光谱

Fig. 3 Spectra of bias light after adding (a) long-pass filters and (b) short-pass filters in bias optical path

如 3.2 节所述,3 种太阳能电池短路电流与偏置光辐照度之间存在良好的线性关系,因此可以根据太阳能电池短路电流的偏差进一步分析太阳能电池光谱响应的差异。根据各个电池的光谱响应曲线,由(2)式计算出实际的短路电流  $i_{meas}$ ,然后分别测量加入滤光片后偏置光的辐照度,利用(3)式反推出太阳能电池在相应辐照度下的理论短路电流  $i_{cal}$ 。光谱响应曲线差异较明显的多晶硅太阳能电池的短路电流如表 3 所示。

表 3 不同带通型滤光片条件下多晶硅太阳能电池的短路电流

Table 3 Short-circuit currents of multicrystalline silicon solar cell under the condition of different band-pass filters

Filter	$i_{meas} / \text{mA}$	$i_{cal} / \text{mA}$	Deviation / %
Without (full spectrum)	124.513	124.546	0.03
SP930	123.952	124.001	0.04
SP810	123.470	123.896	0.34
SP710	123.040	123.701	0.53
LP435	124.534	124.362	-0.14
LP560	124.634	123.893	-0.54
LP720	124.792	123.572	-0.98

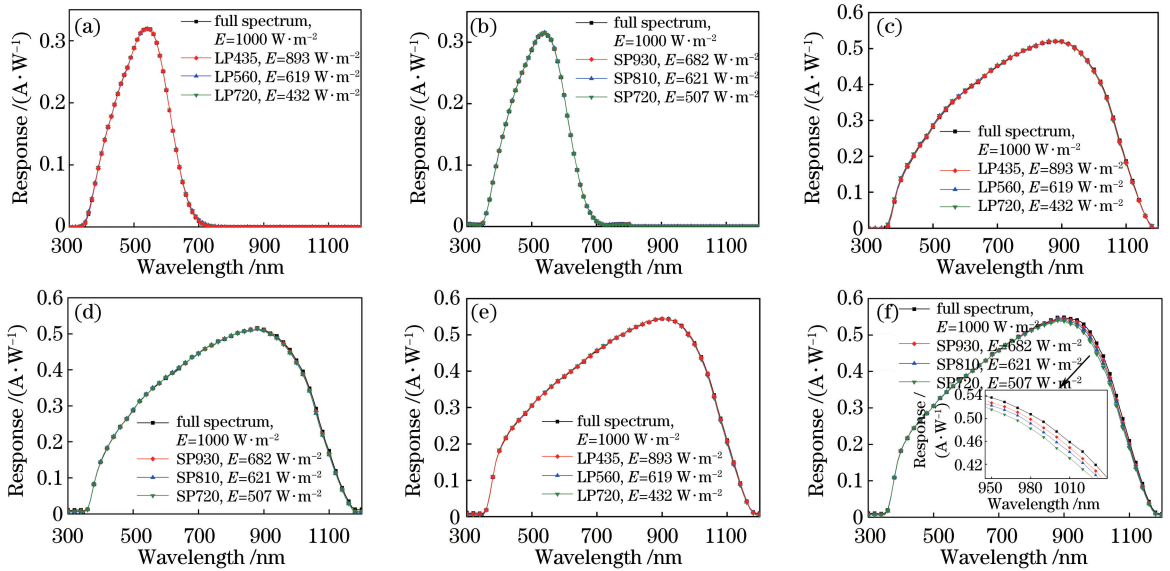


图4 3种太阳能电池在不同辐照度下的光谱响应曲线。(a)(b)模拟非晶硅太阳能电池；(c)(d)单晶硅太阳能电池；(e)(f)多晶硅太阳能电池

Fig. 4 Spectral response curves of three kinds of solar cells at different bias light irradiances. (a)(b) simulated amorphous silicon solar cell; (c)(d) monocrystalline silicon solar cell; (e)(f) multicrystalline silicon solar cell

根据表3的结果可知,通过滤光片过滤掉的光谱成分越多,偏置光谱与AM1.5G标准太阳光谱的偏差越大,光谱响应曲线的差异越大,计算得到的短路电流的偏差就越大。由于滤光片SP930和LP435过滤掉的光谱范围较小,因此短路电流的差异也最小。在同样的条件下,模拟非晶硅太阳能电池和单晶硅太阳能电池的短路电流与多晶硅太阳能电池的规律相似,在此不再重复叙述。值得注意的是,本实验过滤波长范围最小的带通型滤光片对偏置光光谱的过滤程度比IEC标准偏置光光谱的失配度大,而实际测量中使用的具有连续宽光谱分布的偏置光源一般至少达到了IEC标准规定的C级,光谱失配度小于本实验中加入滤光片后的失配度。因此,实际测量中偏置光的光谱分布对光谱响应测试的影响较小,偏置光谱失配度在IEC标准范围内时,对光谱响应的影响较小。

## 4 结 论

研究了偏置光辐照度及光谱分布对太阳能电池光谱响应测试的影响。结果表明,由于太阳能电池材料内部存在缺陷和复合中心,没有偏置光照射下测量的太阳能电池的光谱响应与有偏置光照射下测量的光谱响应有较大差异,利用该光谱响应曲线计算光谱失配度,进而进行太阳能电池校准时会带来不可忽略的不确定度。因此,太阳能电池的光谱响应要在偏置光照射条件下进行测量。随着偏置光辐照度增加,太阳能电池在长波长范围内的光谱响应值增大,短路电流值随着偏置光辐照度的增大呈线性增加。当偏置光辐照度从 $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 增加到 $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,模拟非晶硅太阳能电池、单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池短路电流的最大偏差分别为0.35%、0.92%和1.24%。偏置光的光谱分布对太阳能电池光谱响应的测量结果也会产生影响,其与AM1.5G标准太阳光谱的失配度越大,太阳能电池的光谱响应值与真实值之间的差异越大,但实际测量设备中偏置光源的光谱分布与IEC标准光谱的拟合度达到C级以上,对太阳能电池光谱响应的影响较小。

## 参 考 文 献

- [1] Sharma A K, Agarwal S K, Singh S N. Determination of front surface recombination velocity of silicon solar cells using the short-wavelength spectral response[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2007, 91(15/16): 1515-1520.
- [2] Fu Rui, Chen Nuofu, Liu Hu, *et al.* Design and analysis of Fresnel lens with uniformity irradiance for multi-junction solar cells[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1222004.

- 付蕊, 陈诺夫, 刘虎, 等. 用于多结太阳能电池的均匀聚光菲涅耳透镜的设计与分析[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1222004.
- [3] Huang Qianlu, Zhou Haifeng, Qian Yiwei, *et al.* Design and study of double parallel junctions solar cells[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121601.  
黄倩露, 周海锋, 钱一伟, 等. 并联双结太阳能电池的设计与研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121601.
- [4] Bian Jieyu, Igari S, Zhou Hong, *et al.* Characteristics of various packaged reference photovoltaic devices and their conformities to international photovoltaic standards[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(3): 491-501.  
卞洁玉, 猪狩真一, 周泓, 等. 封装标准太阳能电池性能及其与国际标准一致性的评价[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 491-501.
- [5] Nishikawa Y, Imai K, Miyao K, *et al.* Irradiance adjustment system developed for various types of solar cells and illumination conditions[J]. Energy Science & Engineering, 2015, 3(5): 456-467.
- [6] Seaman C H. Calibration of solar cells by the reference cell method—the spectral mismatch problem[J]. Solar Energy, 1982, 29(4): 291-298.
- [7] Yang Hu, Cui Yongqiang, Xu Lin. The transform of  $I_{sc}$  of solar cell from non-standard test condition to the standard test condition[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2003, 24(5): 663-667.  
杨虎, 崔容强, 徐林. 非标条件下太阳能电池短路电流向标准条件下的转化[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 663-667.
- [8] Winter S, Fey T, Kröger I, *et al.* Design, realization and uncertainty analysis of a laser-based primary calibration facility for solar cells at PTB[J]. Measurement, 2014, 51: 457-463.
- [9] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices-part 8: measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device: IEC 60904-8[S/OL]. [2017-03-25]. [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec60904-8%7Bed3.0%7Ddb.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec60904-8%7Bed3.0%7Ddb.pdf).
- [10] Boivin L P. Study of bandwidth effects in monochromator-based spectral responsivity measurements[J]. Applied Optics, 2002, 41(10): 1929-1935.
- [11] Schonecker A, Bucher K. Influence of non-uniform illumination on spectral response and efficiency measurements of large area solar cells[C]. The Conference Record of the Twenty-Second IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1991: 243897.
- [12] Meyer E L, Malape M A, Simon M. Influence of temperature on photovoltaic cells spectral response[C]. 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2012: 13045721.
- [13] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices-part 9: solar simulator performance requirements: IEC 60904-9[S/OL]. [2017-03-25]. <http://www.normadoc.com/english/iec-60904-9-2007-10.html>.
- [14] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices-part 7: computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices: IEC 60904-7[S/OL]. [2017-03-25]. <https://www.beuth.de/en/standard/iec-60904-7/7035281>.
- [15] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic devices-part 10: methods of linearity measurement: IEC 60904-10[S/OL]. [2017-03-25]. <http://www.normadoc.com/en/norme-150991-iec-60904-10-2009-12.html>.
- [16] Jiang Jianhui, Wu Kongping, Lu Kailin, *et al.* Effect of intermediate-band on the ZnO/ZnTe photovoltaic solar cell[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0916003.  
蒋建慧, 吴孔平, 鲁开林, 等. 中间带对 ZnO/ZnTe 光伏太阳能电池性能的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0916003.
- [17] Metzendorf J, Möller W, Wittchen T, *et al.* Principle and application of differential spectroradiometry[J]. Metrologia, 1991, 28(3): 247-250.