

DOI:10.16136/j.joel.2022.03.0358

标准测试条件下人造太阳光源的谱失配及影响

高升¹, 李禹阔¹, 陆晓东^{1*}, 蔡键柠², 伦淑娴^{2*}

(1. 辽宁省微电子工艺控制重点实验室, 辽宁 锦州 121000; 2. 辽宁省光伏发电控制与集成工程技术研究中心, 辽宁 锦州 121000)

摘要:标准测试条件下,人造太阳光源的光谱形式、辐照强度、光谱失配因子等是影响太阳电池器件测试结果准确性的重要因素。本文以标准太阳光谱 AM1.5 为参考,从光谱失配角度,计算和分析了 4 种常用人造太阳光源(Arc lamp 灯、Q-Flash 灯、Q-Flash W 灯和 ELH 灯)与标准太阳光谱 AM1.5 之间的光谱失配因子的变化和这四种人造太阳光源辐照下晶硅电池的输出参数的变化。计算结果表明:Arc lamp 型人造太阳光源的光谱失配因子为 0.979,晶硅电池输出参数最接近标准太阳光谱 AM1.5 辐照下的输出参数;因光谱失配影响,4 种不同人造太阳光源辐照下晶硅电池的输出参数较标准太阳光谱 AM1.5 辐照下的输出参数会发生明显变化。

关键词:人造太阳光源;失配因子;辐照强度;输出参数

中图分类号: TN307 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)03-0248-08

Spectral mismatch and its effect on artificial solar light source under standard test conditions

GAO Sheng¹, LI Yukuo¹, LU Xiaodong^{1*}, CAI Jianing², LUN Shuxian^{2*}

(1. Key Laboratory of Microelectronics Process Control of Liaoning Province, Jinzhou, Liaoning 121000, China; 2. Liaoning Province Photovoltaic Power Control and Integration Engineering Technology Research Center, Jinzhou, Liaoning 121000, China)

Abstract: Under the standard test conditions, the spectral form, the irradiance intensity and the spectral mismatch factor of artificial solar light sources are important factors that affect the accuracy of solar cell device test results. This paper takes the standard solar spectrum AM1.5 as a reference, then calculates and analyzes the changes of the spectral mismatch factor between the four commonly used artificial solar light sources (Arc lamp, Q-Flash lamp, Q-Flash W lamp and ELH lamp) and the standard solar spectrum AM1.5 from the perspective of spectral mismatch, and also calculates and analyzes the changes in the output parameters of the crystalline silicon cell under the irradiation of these four artificial solar light sources. Calculation results show that the spectral mismatch factor of Arc lamp artificial solar light source is 0.979, and the output parameters of the crystalline silicon cell are closest to the output parameters under the standard solar spectrum AM1.5 spectral irradiation; due to the influence of spectral mismatch, the output parameters of the crystalline silicon cell under the irradiation of four different artificial solar light sources will change significantly compared with the output parameters under the irradiation of the standard solar spectrum AM1.5 spectrum.

Key words: artificial solarlight source; mismatch factor; irradiation intensity; output parameter

1 引言

随着光伏发电技术应用领域的不断拓展和应用场合的日趋复杂,光伏发电系统的稳定性和可

靠性问题已成为阻碍光伏技术进一步发展的主要障碍之一^[1,2]。太阳电池是光伏发电系统的核心器件,其在光伏发电系统中主要以串、并联构成组件的方式工作,所以组件内太阳电池的参数是否

* E-mail: Lxd2211@sina.com; jzlunzi@163.com

收稿日期: 2021-05-27 修订日期: 2021-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(61773074)资助项目

匹配,将对组件的稳定性和可靠性产生直接的影响,并最终影响整个光伏发电系统的性能。在光伏组件的生产流程中,确保组件内电池参数匹配的主要方法是以标准测试条件(standard test condition, STC)下电池的输出参数为依据,先对太阳能电池性能进行分级,然后使用相同等级的太阳能电池制作组件,所以研究实测条件对STC的偏离程度和对太阳能电池实测结果进行有效的修正一直是光伏发电领域研究的热点问题^[3-5]。

目前,广泛的接受和采纳的电池片测试条件是由国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)制定的STC,其规定^[6]:光源的光谱分布为AM1.5,辐射强度为 1000 W/m^2 ,测试电池片温度分布均匀,且为 25°C 。研究表明^[7]:如果测试环境和控温系统的温度均严格控制在 25°C ,那么测试过程中的电池温度及分布基本符合IEC的STC要求。由于电池测试过程所用的光源为各种人造太阳光源,其光谱性质与太阳光谱AM1.5并不一致,所以在测试温度被准确控制的前提下,电池的输出参数的测试误差主要是由测试光源与AM1.5之间的光谱失配引起^[8]。

在人造光源与AM1.5之间的光谱失配研究中,主要利用失配因子描述2种光谱的失配程度^[8]和修正因光谱失配引起电池或组件输出参数产生的误差^[9]。FIELD等^[10]研究了光谱失配因子与测试光源辐照波长之间的关系。HOHL-EBINGER等^[11]研究了利用光谱失配因子对实测条件下电池输出参数的修正问题。IMAI等^[12]研究了不同辐照水平下,光伏组件的性能退化与光谱失配因子之间的关系。TSUJI等^[13]利用光谱失配因子预测了实测条件下光伏组件的输出参数。目前,光谱失配问题的研究多以太阳光谱AM1.5为参考,探讨如何提高实测条件下人造光源的测试精度和预测实际使用条件下电池或组件输出参数的退化规律。

本文以标准太阳光谱AM1.5为参考,利用晶硅电池的光谱响应曲线,讨论了4种常见人造光源的光谱失配情况,并结合电池输出参数分析,为搭建标准太阳能电池测试系统过程时选择人造光源和提高测试系统精度提供一定参考。

2 电池模型及光谱失配的评估方法

本文所用数值计算方法、计算过程、网格划分方案和数据的处理过程,均与文献^[7,14,15]一致。

2.1 电池模型

晶硅电池结构模型如图1所示,包括上表面

Ag栅极(Grid图中的Cathode)、 SiN_x 减反膜(antireflective coating, ARC)、晶硅有源层(c-Si)、下表面钝化层(BL)和底面Al电极(Electrode图中的Anode)。图1中, H 、 H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 、 H_5 分别表示有源层、Grid层、ARC层、BL层、Electrode层、织构层的厚度。 L_1 、 L_2 和 L_3 分别表示Grid层、Electrode层和周期性织构结构(文中采用金字塔织构结构,织构角度为 θ)的宽度。仿真过程所用的直角坐标系如图1所示,其坐标原点位于结构图的左上角。

计算过程中,选择晶硅电池常用的模型参数,即^[7]: $H_1 = H_4 = 500 \text{ nm}$, $H_2 = 80 \text{ nm}$, $H_3 = 200 \text{ nm}$, $H_5 = 7 \mu\text{m}$ 和 $H = 186 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 150 \text{ nm}$, $L_3 = 10 \mu\text{m}$ 和 $\theta = 54.75^\circ$ 。衬底为P型硅片,掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ($\rho = 0.266 \Omega \cdot \text{cm}$),电子和空穴的寿命均为 1 ms ,电池片的上表面进行磷掺杂,扩散温度 900°C ,扩散时间为 10 min ,扩散气氛中磷的浓度为 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,表面浓度 $N_s \approx 3.8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,Ag和Al电极与硅有源层之间已形成了良好的欧姆接触。

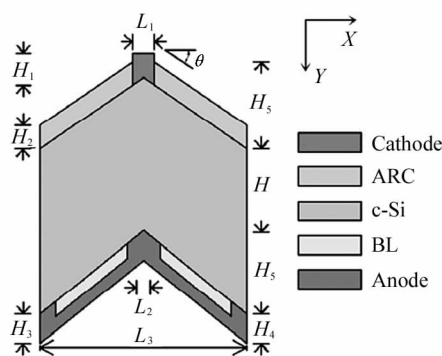


图1 晶硅电池结构模型

Fig. 1 Crystalline silicon cell structure model

2.2 光谱失配的评估方法

选用的4种常见人造光源包括:氙弧灯(Arc lamp)、Q-Flash灯、Q-Flash W灯和ELH灯,其中氙弧灯是一种气体放电灯,具有较高的亮度,光谱接近于太阳光谱AM1.5,是太阳能电池测试时最常使用的光源。Q-Flash灯和Q-Flash W灯是2种闪光灯,可以瞬间输出高能量的光,多用于电池或组件瞬态特性的测试过程。ELH灯是一种广泛地应用于简易太阳能电池测试系统的投影灯。数值计算时,各种人造光源的光谱数据及材料的光学参数均来自专业的数据网站(<http://www.pvlighthouse.com.au/refractive-index-library>)。图2给出了太阳光谱AM1.5

与4种人造光源光谱辐照度的对比结果。显然,从按波长分布的能量密度包络曲线和特征光谱峰值角度看,这些人造光源的光谱与太阳光谱 AM1.5 存在明显的差别。从太阳电池光电转换过程角度看,人造光源的光谱偏离太阳光谱 AM1.5,必然会导致电池输出参数出现漂移,进而影响输出参数的测试精度。

通常采用光谱失配因子(mismatch factor, MM)

描述人造光源和标准太阳光之间光谱失配的程度。 MM 的表达式为^[16]:

$$MM = \frac{\int_a^b E_s(\lambda) S_s(\lambda) d\lambda \int_c^d E_t(\lambda) S_t(\lambda) d\lambda}{\int_a^b E_t(\lambda) S_s(\lambda) d\lambda \int_c^d E_s(\lambda) S_t(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中, E_s 和 E_t 分别为标准太阳光谱(AM1.5)和人造光源光谱, S_s 和 S_t 分别为参考电池和测试电池的光

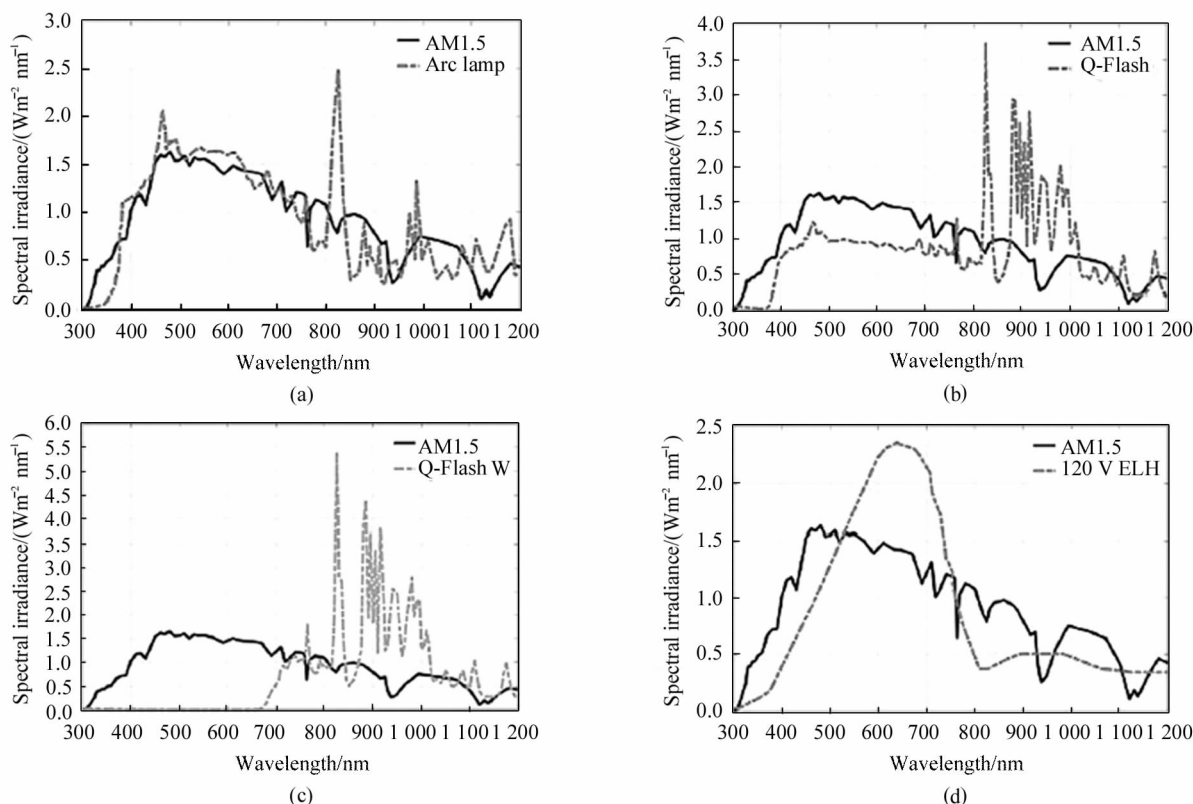


图2 光谱辐照度对比结果:(a) AM1.5 光谱与 Arc lamp 灯的光谱对比;(b) AM1.5 光谱与 Q-Flash 灯的光谱对比;(c) AM1.5 光谱与 Q-Flash W 灯的光谱对比;(d) AM1.5 光谱与 120 V ELH 灯的光谱对比

Fig. 2 Comparison result of spectral irradiance:(a) Comparison of AM1.5 spectrum and Arc lamp spectrum;(b) Comparison of AM1.5 spectrum and Q-Flash lamp spectrum;(c) Comparison of AM1.5 spectrum and Q-Flash W lamp spectrum;(d) Comparison of AM1.5 spectrum and 120 V ELH lamp spectrum

谱响应, a 和 b 分别为参考电池的光谱吸收限, c 和 d 分别为测试电池的光谱吸收限。

在探讨人造光源的光谱失配问题时,本文以标准太阳光辐照下参考电池的输出参数为参考。假设标准太阳辐照下参考电池的光谱响应为 1, 则 $S_s = 1$ ^[16]。考虑到 $J = \int E(\lambda) S(\lambda) d\lambda$ (E 为辐照光谱, S 为光谱响应), 则式(1) 将变形为:

$$MM = \frac{E_{ss} J_{tt}}{E_{tt} J_{st}}, \quad (2)$$

式中, E_{ss} 和 E_{tt} 分别为标准太阳辐射和人造太阳辐射的总辐照能, J_{st} 为标准太阳辐照下测试电池的光电

流密度, J_{tt} 为人造光源辐照下测试电池的光电流密度。

在实际电池测试过程中, $MM > 1$ 、 $MM < 1$ 和 $MM = 1$ 分别代表与太阳光谱 AM1.5 相比, 人造光源的输出光功率过大、过小和匹配良好。

3 结果与讨论

3.1 晶硅电池对光的吸收与反射

当光入射到晶硅太阳能电池后, 因背表面金属反射镜可有效阻止光从晶硅电池底面泄露, 所以从能量守恒角度看, 入射光将最终分解为吸收光和反射

光2部分。吸收的入射光,将在晶硅电池内部产生光生载流子,并形成光电流。图3给出了图1中晶硅太阳能电池对光的吸收与反射情况。注意:式(1)中的光谱响应与器件吸收系数密切相关,但并不完全一致。由图3可以得出:在短波长300 nm—400

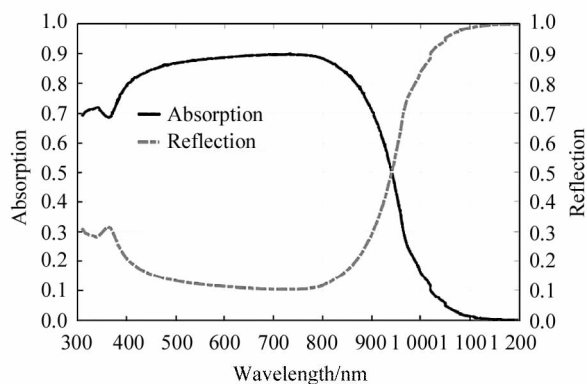


图3 晶硅太阳能电池对光的吸收与反射情况

Fig. 3 Absorption and reflection of light by crystalline silicon solar cells

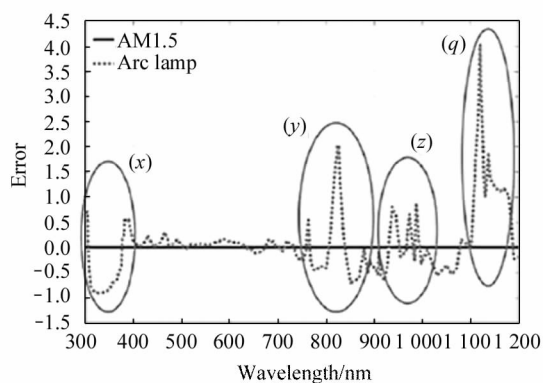
nm 范围内,因晶硅电池材料本身的折射率较大,对入射光的反射也较强,所以此波段晶硅电池的吸收系数相对较小;在 500 nm—800 nm 波长范围内,因晶硅电池材料的折射率随波长增加而降低,且陷光结构的陷光能力逐渐增强,所以此波段晶硅电池的吸收系数可以接近 90%;在 800 nm—1 200 nm 范围内,晶硅材料的吸收系数很小,所以尽管该波段陷光结构的陷光能力最强,但晶硅电池的吸收系数却迅速降低。

3.2 4种人造光源的谱分布特点

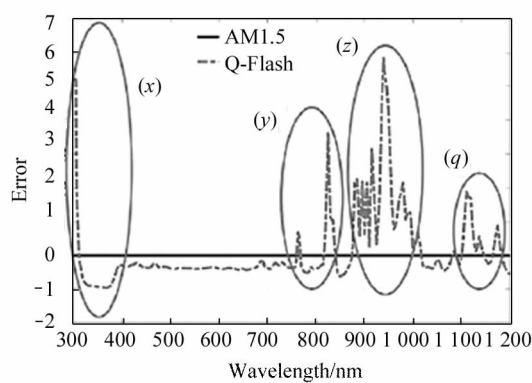
图4给出了图2中4种人造光源光谱相对于太阳光谱 AM1.5 存在的误差,其中误差计算式为:

$$Error(\lambda) = \frac{E_t(\lambda) - E_s(\lambda)}{E_s(\lambda)} \quad (3)$$

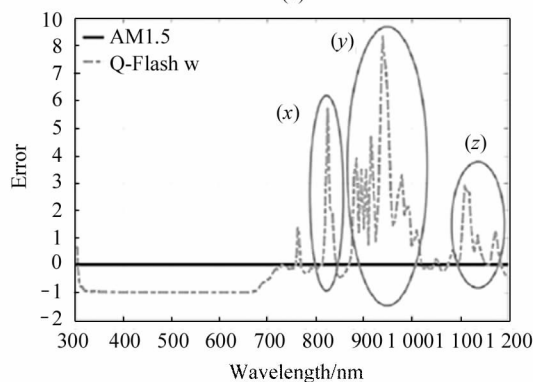
由图4可以得出:在波长(x)、(y)、(z)及(q)范围内, Arc lamp 型人造光源的光谱与太阳光谱 AM1.5 均出现较为明显偏差,但在 400 nm—800 nm 范围内与太阳光谱 AM1.5 匹配度良好;在波长(x)、(y)、(z)及(q)范围内, Q-Flash 型人造光源的光谱与



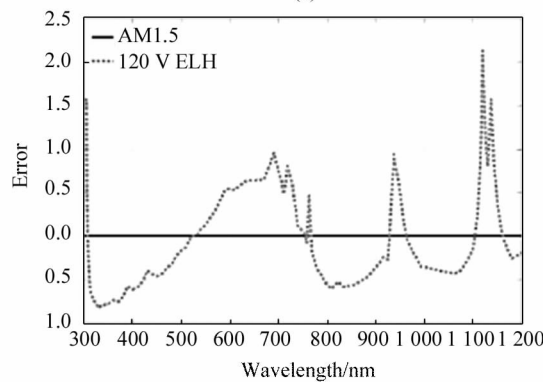
(a)



(b)



(c)



(d)

图4 光谱辐照度误差:(a) AM1.5 光谱与 Arc lamp 光谱的光谱辐照度误差;

(b) AM1.5 光谱与 Q-Flash 灯光谱的光谱辐照度误差;(c) AM1.5 光谱与 Q-Flash W 灯光谱的光谱辐照度误差;

(d) AM1.5 光谱与 120 V ELH 灯光谱的光谱辐照度误差

Fig. 4 Spectral irradiance error:(a) Spectral irradiance error between AM1.5 spectrum and Arc lamp spectrum; (b) The spectral irradiance error between AM1.5 spectrum and Q-Flash lamp spectrum; (c) Spectral irradiance error between AM1.5 spectrum and Q-Flash W lamp spectrum; (d) Spectral irradiance error between AM1.5 spectrum and 120 V ELH lamp spectrum

太阳光谱 AM1.5 出现较为明显的偏差,但在 400 nm—800 nm 及 1000 nm—1100 nm 范围内, Q-Flash 型人造光源的光谱与太阳光谱 AM1.5 匹配度良好;在波长 (x)、(y) 及 (z) 范围内, Q-Flash W 型人造光源的光谱与太阳光谱 AM1.5 出现较为明显的偏差,但 400 nm—800 nm 及 1000 nm—1100 nm 范围内, Q-Flash W 型人造光源的光谱与太阳光谱 AM1.5 匹配度良好;在波长 300 nm—1200 nm 范围内, 120 V ELH 型人造光源的光谱与太阳光谱 AM1.5 均出现较为明显的偏差。总体而言,在较短波长范围内, Arc lamp、Q-Flash 及 Q-Flash W 光谱与标准太阳光谱 AM1.5 之间的误差较小;在较长波长范围内, 4 种人造光源均与太阳光谱 AM1.5 均存在较大的偏差。

3.3 4 种人造光源的失配因子

图5是 AM1.5 与 4 种人造光源辐照晶硅电池后的光电流密度谱。由图5可以得出: 4 种人造光源

辐照下晶硅电池的光电流密度谱具有与 4 种人造光源的能量密度谱(如图 2 所示)大体一致的谱型,但不同峰值波长对应的光电流密度谱的峰值更加平缓;在 $\lambda \leq 800$ nm 的短波范围内,因晶硅电池的吸收系数较大,所以 4 种人造光源辐照下晶硅电池的光电流密度谱更接近四种人造光源的能量密度谱。表 1 给出了 AM1.5 与 4 种人造光源辐照晶硅电池后总光电流密度。由表 1 可见: Arc lamp 型和 120 V ELH 型人造光源辐照晶硅电池后总光电流密度与 AM1.5 辐照晶硅电池后总光电流密度差别较小,而 Q-Flash 型和 Q-Flash W 型人造光源辐照晶硅电池的总光电流密度与 AM1.5 辐照晶硅电池后总光电流密度差别较大。

图 6 是 4 种人造光源失配因子 MM 的谱分布。由图 6 可以看出: 在 $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 900 \text{ nm}$ 范围内, Arc lamp 型、Q-Flash 型、Q-Flash W 型、120 V ELH 型人造光源的 MM 值接近于 1; 在 $300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400$

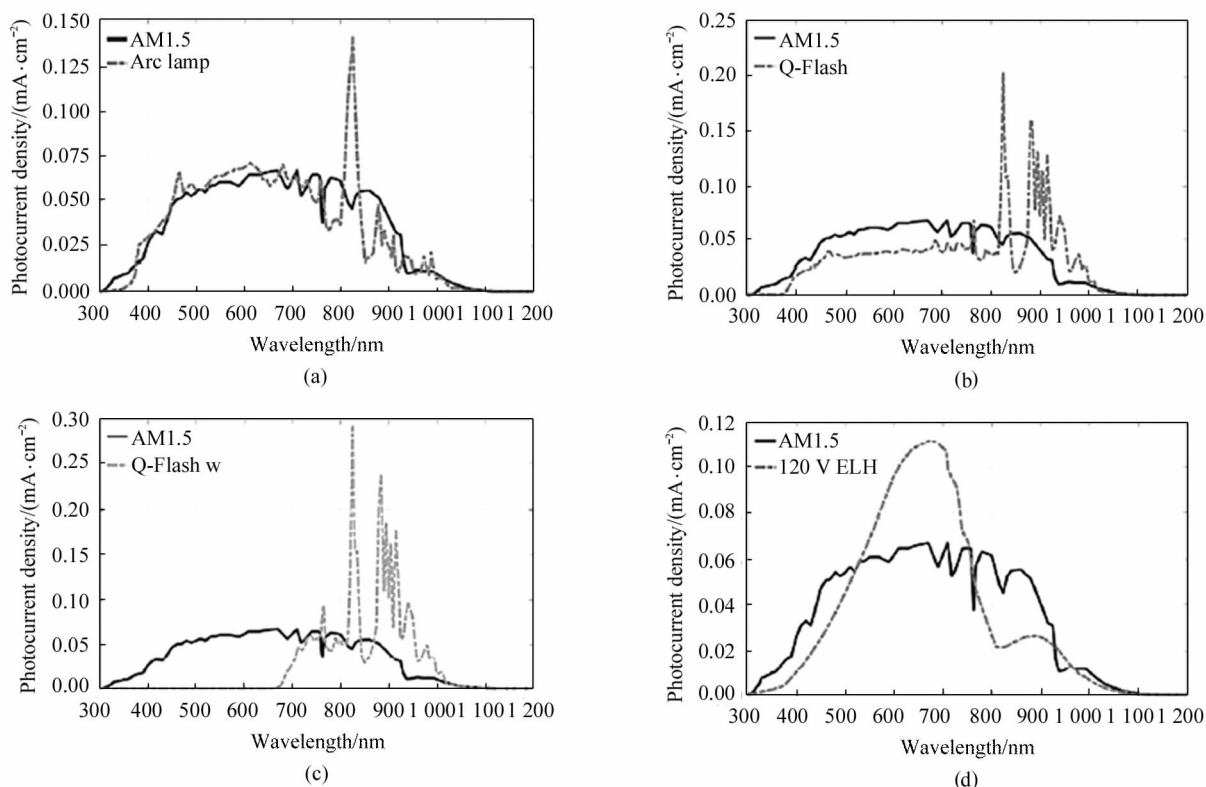


图5 晶硅电池光电流密度谱:(a) AM1.5 与 Arc lamp 下电池光电流密度谱的对比;
(b) AM1.5 与 Q-Flash 灯下电池光电流密度谱的对比;(c) AM1.5 与 Q-Flash W 灯下电池光电流密度谱的对比;
(d) AM1.5 与 120 V ELH 灯下电池光电流密度谱的对比

Fig. 5 Crystalline silicon cell photocurrent density spectrum:

- (a) Comparison of battery photocurrent density spectrum under AM1.5 and Arc Lamp;
- (b) Comparison of battery photocurrent density spectrum under AM1.5 and Q-Flash lamp;
- (c) Comparison of battery photocurrent density spectrum under AM1.5 and Q-Flash W lamp;
- (d) Comparison of battery photocurrent density spectrum under AM1.5 and 120 V ELH lamp

表 1 各光谱下晶硅太阳能电池总光电流密度
Tab.1 Photocurrent density of crystalline silicon solar cells under various spectra

Light source	Total photocurrent density (mA · cm ⁻²)
AM1.5	30.947 5
Arc lamp	30.553 7
Q-Flash	27.965 4
Q-Flash W	23.704 2
120 V ELH	31.528 6

nm 和 $\lambda \geq 900$ nm 的范围内, ArcLamp 型、Q-Flash 型、Q-FlashW 型、120 VELH 型人造光源的 MM 值出现明显偏离 1 的现象。在单位波长范围内, $MM=1$ 、 $MM>1$ 和 $MM<1$ 分别代表人造光源与 AM1.5 之间的光强匹配、强于 AM1.5 的光强和弱于

AM1.5 的光强, 所以从光生载流子产生机制的角度看, $MM>1$ 和 $MM<1$ 两种情况具有相互补偿的效果。从图 6 可以得到: 尽管不同人造光源的 MM 值在 $300\text{ nm} \leq \lambda \leq 400\text{ nm}$ 和 $\lambda \geq 900\text{ nm}$ 的范围内均出现了偏移(相对于 $MM=1$), 但就 $300\text{ nm} \leq \lambda \leq 1\,200\text{ nm}$ 整个晶硅电池的吸收谱范围而言, 4 种人造光源的 MM 值的补偿效果为: $MM_{\text{Q-Flash}} > MM_{\text{Q-Flash W}} > MM_{\text{Arc lamp}} > MM_{120\text{ V ELH}}$ 。利用式(2)可以计算出 4 种人造光源的总失配因子 MM 值, 如表 2 所示。由表 2 可见: 因 $MM>1$ 和 $MM<1$ 两种情况具有相互补偿的效果, 所以 4 种人造光源的总失配因子 MM 值偏离 1 程度的大小关系为: $MM_{120\text{ V ELH}} > MM_{\text{Arc lamp}} > MM_{\text{Q-Flash W}} > MM_{\text{Q-Flash}}$ 。

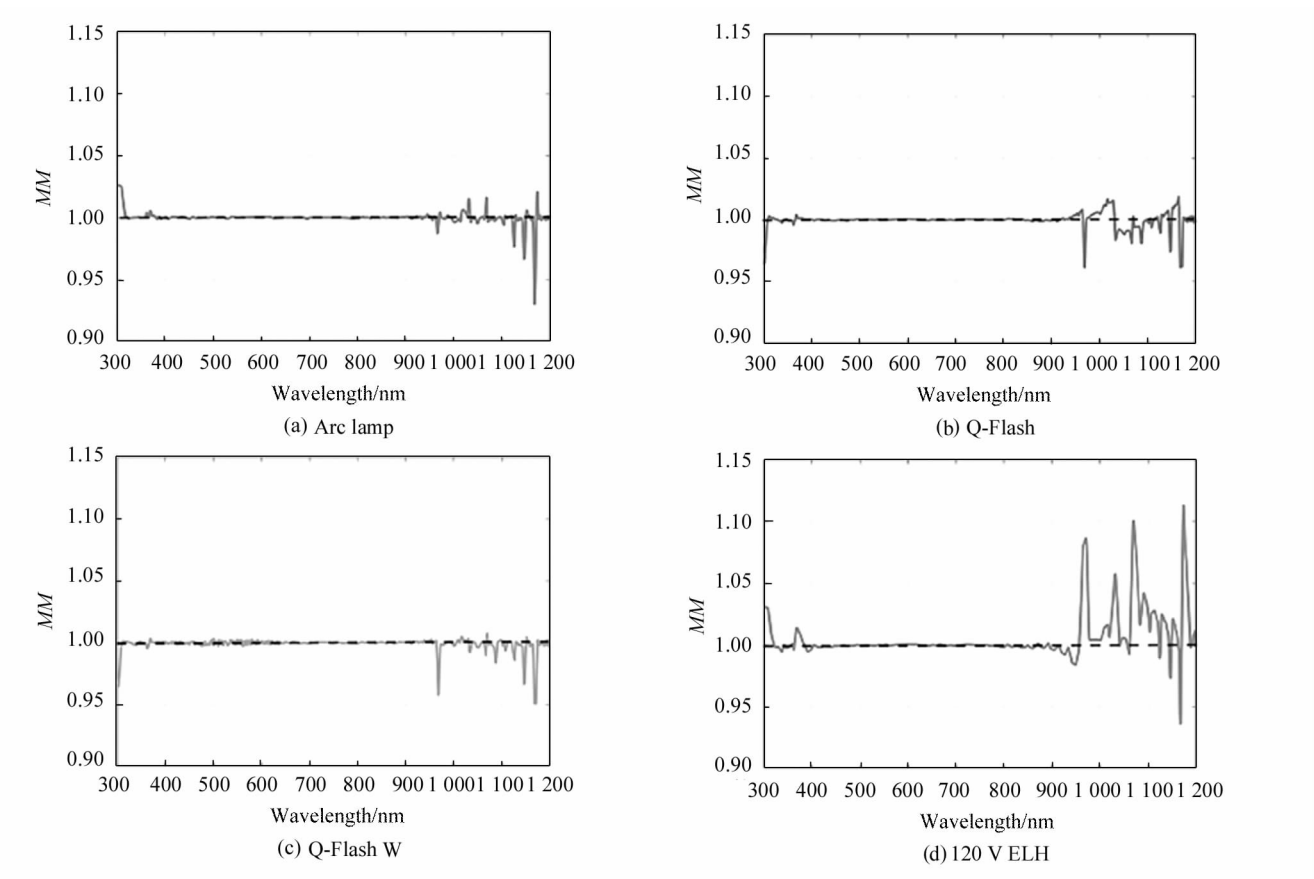


图 6 4 种人造光源失配因子 MM 的谱分布
Fig. 6 Spectral distribution of mismatch factor MM for four artificial light sources

表 2 4 种人造光源的失配因子
Tab.2 Mismatch factors of four artificial light sources

Light source	Total MM
Arc lamp	0.979
Q-Flash	1.002
Q-Flash W	1.005
120 V ELH	1.061

3.4 因光谱失配导致晶硅电池输出参数的变化

太阳电池的输出参数主要包括: 短路电流(I_{sc})、开路电压(V_{oc})、填充因子(FF)、转换效率(η)等, 这里用短路电流密度(J_{sc})代替短路电流对太阳电池的输出参数进行表征。表 3 是太阳光谱 AM1.5 和 4 种人造光源辐照下, 晶硅电池的输出参数。为分析光谱失配对晶硅电池输出参数的影响, 表 4 以太阳

光谱 AM1.5 辐照下晶硅电池的输出参数为参考,4 种人造光源辐照下晶硅电池输出参数的绝对误差和相对误差。由表 4 可以得出:在 4 种人造光源辐照

下,晶硅电池的输出参数均出现不同程度的偏离(即出现相对误差)。

由于入射光场的光谱变化主要影响光生载流子

表 3 各光谱下晶硅电池的输出参数

Tab. 3 Output parameters of crystalline silicon cell under each spectrum

Light source	J_{sc} (mA · cm ⁻²)	V_{oc}/V	$FF/\%$	$\eta/\%$
AM1.5	-20.959 6	0.660 9	83.916 2	20.069 9
Arc lamp	-20.684 4	0.662 7	84.084 6	19.768 8
Q-Flash	-18.900 6	0.661 1	84.006 0	20.054 8
Q-Flash W	-15.908 7	0.655 9	83.924 0	19.811 2
120 V ELH	-21.550 7	0.663 5	84.125 9	21.622 8

产生过程,进而影响电池效率,所以就偏离的严重程度(绝对误差)而言, J_{sc} 值和 η 值的偏离较为严重。此外,因入射光场不同波长的强度发生变化,会导致晶硅电池内光生载流子分布形式出现很大的不同,所以 V_{oc} 值和 FF 值也会出现一定的偏离,但偏离的严重程度却相对较小。对 J_{sc} 值的偏离而言,Q-Flash W 型人造光源的偏离最大,Arc lamp 型人造

光源的偏离最小。对 V_{oc} 值的偏离而言,Q-Flash W 型人造光源的偏离最大,Q-Flash 型人造光源的偏离最小。对 FF 值的偏离而言,120 V ELH 型人造光源的偏离最大,Q-Flash W 型人造光源的偏离最小。对 η 值的偏离而言,120 V ELH 型人造光源的偏离最大,Q-Flash 型人造光源的偏离最小。综合绝对误差数据可以得出,Arc lamp 型人造光源的 4 个输出

表 4 以 AM1.5 辐照下晶硅电池的输出参数为参考,4 种人造光源辐照下晶硅电池输出参数的相对误差和绝对误差

Tab. 4 Taking the output parameters of the crystalline silicon cell under AM1.5 irradiation as a reference, the relative and absolute errors of the output parameters of the crystalline silicon cell under their irradiation of four artificial light sources

Light source	Error	J_{sc}	V_{oc}	FF	η
Arc lamp	Relative error	0.275 2	0.001 8	0.168 4	-0.301 1
	Absolute error/%	-1.31	0.27	0.20	-1.50
Q-Flash	Relative error	2.059 0	0.000 2	0.089 8	-0.015 1
	Absolute error/%	-9.82	0.03	0.10	-0.08
Q-Flash W	Relative error	5.050 9	-0.005 0	0.007 8	-0.258 7
	Absolute error/%	-24.10	-0.76	0.00	-1.29
120 V ELH	Relative error	-0.591 1	0.002 6	0.209 7	1.552 9
	Absolute error/%	2.82	0.39	0.25	7.74

参数偏离相对较小。

4 结 论

本文研究了 4 种不同人造太阳光源光谱与标准太阳光谱 AM1.5 之间的失配因子,并给出因光谱失配导致晶硅电池输出参数的变化。主要结论如下:4 种人造太阳光源均与标准太阳光谱 AM1.5 存在不同程度的失配:Q-Flash 型人造光源的 MM 值为 1.002,与标准太阳光谱 AM1.5 最为匹配;120 V ELH 型人造光源的 MM 值为 1.061,与标准太阳光

谱 AM1.5 失配最为严重。在 4 种人造光源的辐照下,晶硅电池的 4 个输出参数均存在不同程度的偏离。综合绝对误差数据可以得出:Arc lamp 型人造光源的 4 个输出参数偏离相对较小;Q-Flash W 型人造光源的 4 个输出参数偏离相对较大。

参考文献:

- [1] MICHAL O. Estimating effects of individual PV panel failures on PV array output[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4825-4832.

- [2] WU F, YANG B, HU A, et al. Inertia and damping analysis of grid-tied photovoltaic power generation system with DC voltage droop control[J]. IEEE Access, 2021, 9(1): 38411-38418.
- [3] BARDIZZA G, PAVANELLO D, GALLEANO R, et al. Calibration procedure for solar cells exhibiting slow response and application to a dye-sensitized photovoltaic device[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2017, 160(11): 418-424.
- [4] CHEN S S, FARKOUSH S G, LETO S. Photovoltaic cells parameters extraction using variables reduction and improved shark optimization technique[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(16): 10059-10069.
- [5] BONKOUNGOU D, GUINGANE T, KORSAGA E, et al. Parameters degradation analysis of a Silicon solar cell in dark/light condition using measured I-V data[J]. Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal, 2021, 6(1): 1151-1156.
- [6] WOYTE A, NIJS J, BELMANS R. Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results[J]. Solar Energy, 2003, 74(3): 217-233.
- [7] LU X D, LI Y K, LUN S X, et al. Uncertainty of the output parameters of c-Si solar cell under the standard testing conditions[J]. Sci SinTech, 2019, 49(12): 1-10.
陆晓东, 李禹阔, 伦淑娴, 等. 标准测试条件下晶硅电池输出参数的不确定度[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(12): 1-10.
- [8] MÜLLEJANS H, IOANNIDES A, KENNY R, et al. Spectral mismatch in calibration of photovoltaic reference devices by global sunlight method[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(6): 1250-1254.
- [9] YE S, CHEN B, CHENG Y, et al. Resolving spectral mismatch errors for perovskite solar cells in commercial class AAA solar simulators[J]. Journal of Physical Chemistry Letters, 2020, 11(10): 3782-3788.
- [10] FIELD H, EMERY K. An uncertainty analysis of the spectral correction factor[C]//23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 10-14, 1993, Louisville, Kentucky, USA. New York: IEEE, 1993(1): 1180-1187.
- [11] HOHL-EBINGER J, WARTA W. Uncertainty of the spectral mismatch correction factor in STC measurements on photovoltaic devices[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011, 19(5): 573-579.
- [13] IMAI Y, CHANFANA J, KAWANO Y, et al. Description of performance degradation of photovoltaic modules using spectral mismatch correction factor under different irradiance levels[J]. Renewable Energy, 2019, 141(4): 444-450.
- [13] TSUJI M, CHANTANA J, NAKAYAMA K, et al. Utilization of spectral mismatch correction factor for estimation of precise outdoor performance under different average photon energies[J]. Renewable Energy, 2020, 157(5): 173-181.
- [14] LU X D, LI Y K, LUN S X, et al. High efficiency light trapping scheme used for ultrathin c-Si solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 196(3): 57-64.
- [15] LU X D, WANG X X, GAO J, et al. Two-cavity light-trapping scheme used in ultrathin c-Si solar cells[J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4731-4734.
- [16] MAMBRINI T, DUBOIS A M, LONGEAUD C, et al. Photovoltaic yield: correction method for the mismatch between the solar spectrum and the reference ASTM G AM1.5G spectrum[J]. EPJ Photovoltaics, 2015, 6(1): 60701-60701.

作者简介:

陆晓东 (1977—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事高效晶硅电池、功率器件及集成系统等方向的研究工作。

伦淑娴 (1972—), 女, 博士, 主要从事智能控制与滤波、神经网络、风力发电、光伏发电系统的建模、发电量预测、故障诊断与预测等研究。