

模拟太阳光与高空自然光条件下航天用三结砷化镓太阳电池光电性能测量对比

孟海凤^{1*}, 徐国宁², 张俊超¹, 苗颖², 赫英威¹, 张碧丰¹, 蔡川¹, 满帅¹, 王萌¹, 许宁¹, 熊利民^{1**}

¹ 中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029;

² 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094

摘要 针对航天用三结砷化镓太阳电池的光电性能测量, 介绍了太阳模拟器法和高空气球法两种方法。阐述了太阳模拟器法的测量原理和关键量值的溯源路径, 基于双光源稳态太阳模拟器和光谱失配分析技术, 对航天用三结砷化镓太阳电池的光电性能进行了测量, 获得了短路电流、开路电压和最大发电功率等关键参数及相应的温度系数。介绍了高空气球法测量技术, 高空氦气球将三结砷化镓太阳电池搭载至海拔 35 km 以上的高空中, 在高空自然太阳光下进行光电性能测量, 采集了伏安特性数据及实时温度数据。对高空自然太阳光下测得的数据执行温度修正后, 与地面太阳模拟器法所得的数据进行对比。结果显示, 两种测量方法在短路电流、开路电压和最大发电功率上的最大相对偏差分别为 2.61%、2.13% 和 1.63%, 结果具有较好的一致性。

关键词 测量; 计量学; 航天用多结太阳电池; 光电性能; 太阳模拟器; 高空气球

中图分类号 TB96

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0312004

Comparison of Photoelectric Performance Measurements for GaInP/InGaAs/Ge Triple-Junction Space Solar Cells Based on Solar Simulator and High Altitude Natural Sunlight

Meng Haifeng^{1*}, Xu Guoning², Zhang Junchao¹, Miao Ying², He Yingwei¹, Zhang Bifeng¹, Cai Chuan¹, Man Shuai¹, Wang Meng¹, Xu Ning¹, Xiong Limin^{1**}

¹ *Division of Metrology in Optics and Lasers, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;*

² *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China*

Abstract Aiming at the photoelectric performance measurement for GaInP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells used in aerospace, we introduce the solar simulator method and the high altitude balloon method. The measurement principle of the solar simulator method and the traceability chain of key values are described. Based on the dual light source steady state solar simulator and the spectral mismatch analysis, the photoelectric performances of the GaInP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells are measured, and the key parameters such as short circuit current, open circuit voltage, maximum power and their corresponding temperature coefficients are obtained. In addition, we introduce the high altitude balloon calibration method. The GaInP/InGaAs/Ge triple-junction space solar cells are carried by the Helium balloon to arrive at the altitude higher than 35 km and their photoelectric performances under high altitude natural sunlight are measured. Simultaneously, their current-voltage characteristic data and the real-time temperature data are collected. After temperature correction, the data collected under high altitude natural sunlight is compared with that by the solar simulator method. The results show that the maximum relative deviations in the short circuit current, open circuit voltage and maximum power are 2.61%, 2.13% and 1.63%,

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-09-08; 录用日期: 2020-09-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFF0200801)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA17020304)

* E-mail: menghf@nim.ac.cn; ** E-mail: xlmin@nim.ac.cn

respectively. It means that there is a good consistency between these results of the two measurement methods.

Key words measurement; metrology; multi-junction space solar cells; photoelectric performance; solar simulator; high altitude balloon

OCIS codes 120.3940; 350.6050; 040.5350

1 引言

三结砷化镓太阳电池通常是由顶电池如 GaInP、中电池如 InGaAs 以及底电池如 Ge 三个子结串联而成的,光谱响应范围覆盖 300~1800 nm 波段,对太阳光的利用效率较高。随着生产工艺的持续改进,三结砷化镓太阳电池单片的最高光电转换效率已超过 30%,最大开路电压已超过 2.5 V^[1-5]。正是因为它的高效率、高功重比以及强抗辐照能力等^[6-7],三结砷化镓太阳电池已成为航天器在轨活动的主电源。为了满足航天任务多样化和总体设计精细化的需求,自主准确测量航天用太阳电池的关键光电性能参数如短路电流、开路电压和最大发电功率至关重要^[8]。

航天用太阳电池的光电性能参数需要在 AM0 (大气质量为 0)条件下进行标定或者修正到 AM0 光谱和辐照度条件下^[9-10]。研究者自 20 世纪 60 年代就开始着手研究太阳电池的 AM0 标定,并从只能标定其短路电流值逐渐发展到可测量整条电流-电压特性曲线。国际标准 ISO 15387-2005^[11]规定了单结太阳电池在 AM0 条件下的测量与标定要求,阐述了高空气球标定法、高空飞机标定法、地面直接阳光标定法、太阳模拟器法和差分光谱响应度法以得到 AM0 标准测试条件下的短路电流值。针对晶硅、单结和多结砷化镓太阳电池的光电性能、线性度及光谱响应度测量等,欧洲航天标准化合作组织发布的国际标准 ECSS-E-ST-20-08C^[12]进行了较为详细的规定。理论上,空间站或卫星标定法是最贴近空间 AM0 真实光谱和辐照度条件的标定方法,但是此方法的发射成本高,且不易实施。高空气球标定法是除空间站标定法外最接近 AM0 真实条件的标定方法,也是美国、法国等发达国家常用的航天用太阳电池标定方法,但在我国尚处于初级研究阶段。地面太阳模拟器法虽然受限于光源的光谱匹配度,但受天气等自然环境因素的影响较小,是人力最可控的方法。

我国航天用太阳电池的标准量值过于依赖国外,通常采用经国外机构标定的标准太阳电池来校准和调整所用的太阳模拟器,再测量航天用三结砷化镓太阳电池。然而,愈发严重的国外技术封锁使

得很多企业只能继续采用多年前的标准太阳电池。但是,由于航天任务的多样性及电池生产工艺的持续改进,目前主流航天用太阳电池在各子结的电流匹配甚至子结数和组成等方面已与多年前大不相同。

为了不依赖于国外量值并获得准确可靠的航天用太阳电池的关键光电性能参数,本文研究了高光谱匹配 AM0 太阳模拟器下航天用三结砷化镓太阳电池的光电性能测量方法,并将其关键参数溯源至光学计量领域最高标准——低温辐射计,从而实现量值独立溯源至国际单位制(SI)。另外,采用高空气球法将航天用三结砷化镓太阳电池搭载至 35 km 以上高空,开展了高空自然太阳光下电流-电压($I-V$)特性的测量研究,实时监测温度,并与地面太阳模拟器下测量所得的数据进行了对比。通过计算关键参数短路电流、开路电压和最大发电功率的相对偏差,分析了两种测量方法所得结果的一致性。

2 太阳模拟器法

2.1 原理和装置

太阳模拟器法是基于比较法的一种测量方法,先用标准太阳电池将太阳模拟器的辐照度和光谱条件校准至 AM0 标准条件(AM0 光谱,辐照度为 1367 W/m²)下,将被测太阳电池的温度控制在(25±1)℃,通过程序改变加载的偏置电压,扫描样品在太阳模拟器辐照下的电流-电压数据,最终获得各光电性能参数。此方法对单结太阳电池而言,技术成熟且易操作,国际标准和校准规范等对此也有详细阐述^[13]。但对于多结太阳电池,由于子结限流效应,该方法变得颇为复杂,尽管存在相关的国际标准文件,但该方法对模拟光源、标准太阳电池和测量本身均提出了较高要求^[14]。测量多结太阳电池的光电性能参数时,需要采用对应各子结的同型电池组成标准太阳电池组,每个同型标准太阳电池的 AM0 标定值需准确标定,且需与 AM0 太阳模拟器协同满足光谱匹配条件,这样才能得到可靠的多结太阳电池的电流-电压特性参数。

图 1(a)为太阳模拟器法的示意图,先采用各同型标准太阳电池校准光源以满足光谱匹配条件,再切换至样品测量。图 1(b)为本文所选用的双光源 AAA

等级太阳模拟器的光谱曲线与 AM0 标准光谱曲线的对比,可以看出,在全波段范围内,所选用的双光源 AAA 等级太阳模拟器均具备高光谱匹配度,经校准

分析,其光谱失配度小于 5%。另外,光源还具备优异的辐照度均匀度和稳定性。图 1(c)为本文所用的双光源稳态太阳模拟器装置的实物照片。

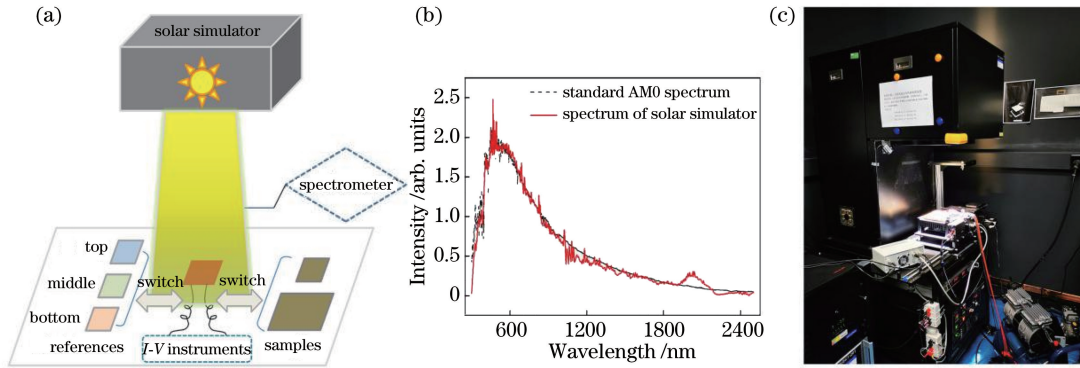


图 1 太阳模拟器法的示意图、光谱曲线对比以及装置照片。(a)方法示意图;

(b)所用的太阳模拟器的光谱与标准 AM0 光谱的对比;(c)所用的太阳模拟器装置的实物照片

Fig. 1 Schematic of solar simulator method, comparison of spectral curves, and photo of equipment. (a) Schematic of method; (b) comparison between spectrum of solar simulator used in this work and standard AM0 spectrum; (c) photo of solar simulator equipment used in this work

2.2 标准器标定和量值溯源

本文中的标准器即同型标准太阳电池,其组成和结构与被测多结太阳电池一样,但不同于由各子结串联而成的多结太阳电池,其接线端子是分别从不同子结单独引出的。譬如三结太阳电池的顶电池同型标准太阳电池,其接线端子是从顶电池子结的正负极引出,而中电池和底电池则无电学活性。本文中的同型标准太阳电池的 AM0 标定值均采用差分光谱响应度 (DSR, Differential Spectral Responsivity)法标定得到,即对测量太阳电池的光谱响应度 $S(\lambda)$ 与国际标准发布的标准太阳光谱辐照度 $E(\lambda)_{Solar}$ 进行积分,从而计算得到太阳电池在标准测试条件下的短路电流 I_{STC} ,即标定值,计算公式^[15]为

$$I_{STC} = A \cdot \int S(\lambda) \cdot E(\lambda)_{Solar} d\lambda, \quad (1)$$

式中: A 为被测标准太阳电池的面积; λ 为波长。航天用太阳电池通常选取国际标准所规定的 AM0 标准太阳光谱辐照度为标准太阳光谱辐照度,因此其标准太阳电池的 AM0 标定值即为光谱响应度与 AM0 标准太阳光谱辐照度的积分值。

具体标定过程如下:先在单色光下测量标准探测器的电信号,再在同样条件下测量被测同型标准太阳电池的电信号;为了减小光源不稳定性带来的偏差,测量过程中采用监视探测器监视和修正光源的波动;然后根据标准探测器的已知光谱响应度,计算出被测同型标准太阳电池的光谱响应度,再与

AM0 标准光谱辐照度进行积分计算,得出其 AM0 标定值^[15-16]。此量值经标准探测器和陷阱探测器,可溯源至光学计量领域最高标准——低温辐射计,实现了量值独立溯源至 SI。校准装置和量值溯源示意图如图 2 所示。

值得一提的是,执行不同航天任务的太阳电池需选取不同的太阳光谱辐照度进行积分计算以得到相应的短路电流值。如对于火星探测器所用的太阳电池,则应选取火星表面所接收到的太阳光谱辐照度进行积分计算。因为火星表面存在大气,对太阳光具有较大的衰减作用,到达火星表面的太阳光与 AM0 标准光谱辐照度大不相同。我国首次发射的火星探测器“天问一号”,其所用太阳电池的同型标准太阳电池就是采用 DSR 法标定,通过选取火星表面对应不同光学深度的太阳光谱辐照度进行积分计算,得到了火星所接收光谱辐照度条件下的短路电流值,这也说明了 DSR 标定法的普适性优势。

2.3 光谱失配误差分析

依据标准 IEC 60904-7^[17-18],基于标准光谱辐照度数据、测量所得的光谱响应度和 AM0 太阳模拟器的光谱数据,计算光谱失配因子(MMF, M_F):

$$M_F = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{ref}(\lambda) S_{ref}(\lambda) d\lambda \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{sim}(\lambda) S_{test}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{ref}(\lambda) S_{test}(\lambda) d\lambda \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{sim}(\lambda) S_{ref}(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

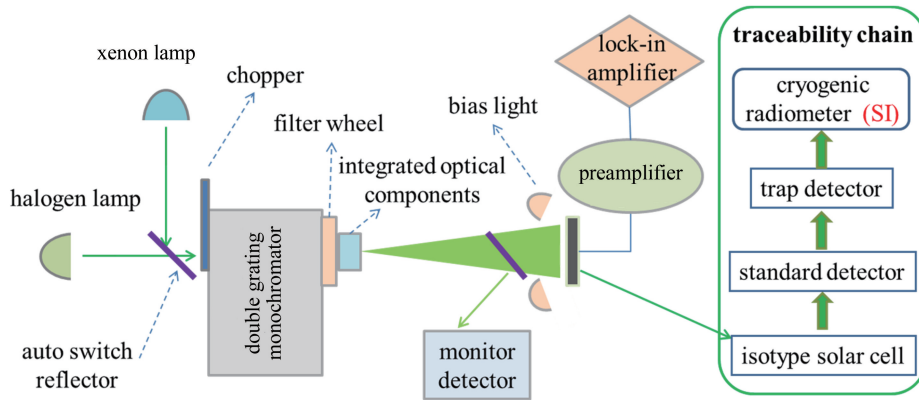


图 2 基于 DSR 法的标准太阳电池校准装置及其量值溯源示意图

Fig. 2 Schematic of calibration setup and value traceability for reference solar cells based on DSR method

式中： $E_{ref}(\lambda)$ 为标准光谱分布 (本文取 ISO 15387: 2005 所规定的 AM0 标准光谱辐照度) 在特定波长下的单位带宽的辐照度； $E_{sim}(\lambda)$ 为 AM0 模拟光源光谱分布在特定波长下的单位带宽的辐照度； $S_{ref}(\lambda)$ 为同型标准太阳电池的光谱响应度； $S_{test}(\lambda)$ 为被测三结砷化镓太阳电池对应子结的光谱响应度。根据 MMF 计算结果校准和调整太阳模拟器的辐照度和光谱。

对于多结太阳电池,理论上需对每一个子结都进行光谱失配分析,若满足 $|M_F - 1| < 1\%$,则在校准 AM0 太阳模拟器时直接采用同型标准太阳电池的 AM0 标定值 (失配偏差记为不确定度分量),否则需采用失配修正后的标定值进行光源辐照度的校准。此过程比较繁琐,需多次反复迭代调节太阳模拟器的光谱和辐照度并执行光谱失配分析计算,才可能得到满意的结果。以三结砷化镓太阳电池为例,典型的光谱失配分析流程图如图 3 所示。如果所用太阳模拟器的光谱与 AM0 标准光谱的匹配度高,则可省去底电池的光谱失配分析步骤,只需确认其非限流即可。

2.4 测量结果

本文以目前航天用太阳电池主流产品三结砷化镓太阳电池 GaInP/InGaAs/Ge 为研究对象,采用高光谱匹配的双光源稳态太阳模拟器对其光电性能进行测量。参照图 3 所示流程,分析对应其 GaInP 顶电池、InGaAs 中电池和 Ge 底电池的同型标准太阳电池,在太阳模拟器下测量三结砷化镓全结构太阳电池的光谱失配误差。同型标准太阳电池的光谱响应度由上文所述的 DSR 装置测量得出,全结构三结砷化镓太阳电池各子结的光谱响应度则是通过加载偏置光和偏置电压,利用子结限流效应,由多结太

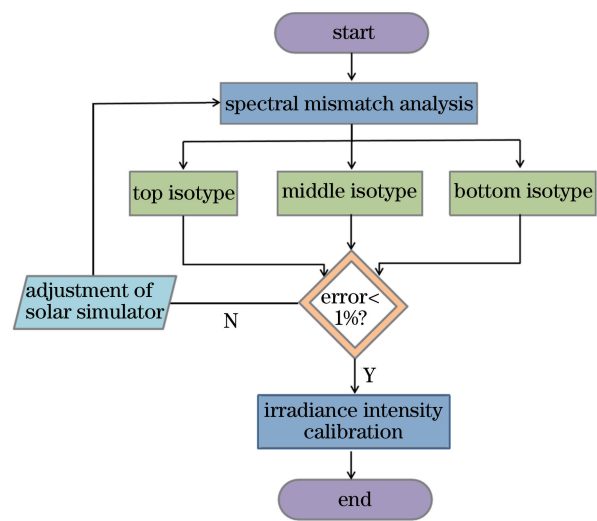


图 3 三结太阳电池的光谱失配分析流程图

Fig. 3 Flow chart of spectral mismatch analysis for triple-junction solar cells

阳电池量子效率测量装置测得^[19-21]。用于光谱失配分析的四合一标准太阳电池组在偏置光下的照片如图 4(a) 所示,从左上角开始,顺时针方向依次为顶电池、中电池和底电池的同型标准太阳电池,以及全结构三结砷化镓太阳电池。本文所用的双光源稳态太阳模拟器的光谱与 AM0 标准光谱匹配度高,如图 1(b) 所示,且实验表明,底电池在此太阳模拟器下的电流远大于顶电池和中电池电流,故只需考虑顶电池和中电池的光谱失配误差。图 4(b) 所示为所测得的顶电池和中电池同型标准太阳电池与全结构太阳电池的顶、中子结的光谱响应度曲线对比。

通过多次调整太阳模拟器的光谱和辐照度以及计算失配误差,得到最终测量条件下顶电池和中电池的光谱失配偏差分别为 0 和 0.06%,可直接用 DSR 法标定所得的顶电池和中电池同型标准

太阳电池的标定值校准太阳模拟器的辐照度。然后,用半导体控温台将样品的温度控制为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,并扫描被测全结构三结砷化镓太阳电

池的伏安特性数据。四个被测样品的实物照片如图 5(a)所示,所得 $I-V$ 和功率-电压($P-V$)曲线如图 5(b)所示。

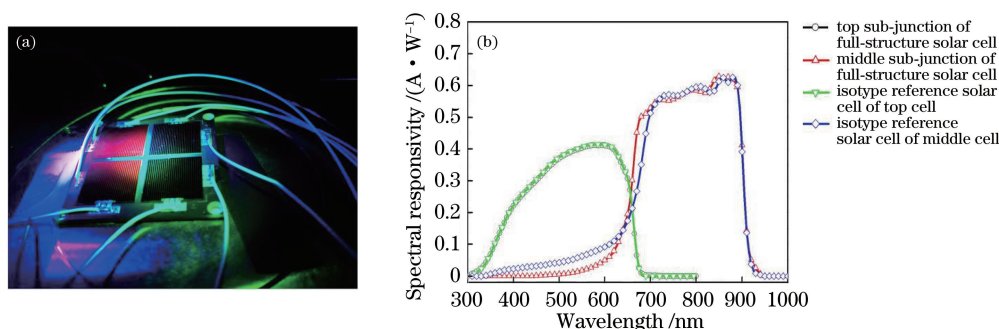


图 4 四合一标准太阳电池组的照片和光谱响应度曲线。(a)太阳电池组的照片;(b)光谱响应度曲线
Fig. 4 Photo of four-in-one reference solar cells and spectral responsivity curves. (a) Photo of solar cell group; (b) spectral responsivity curves

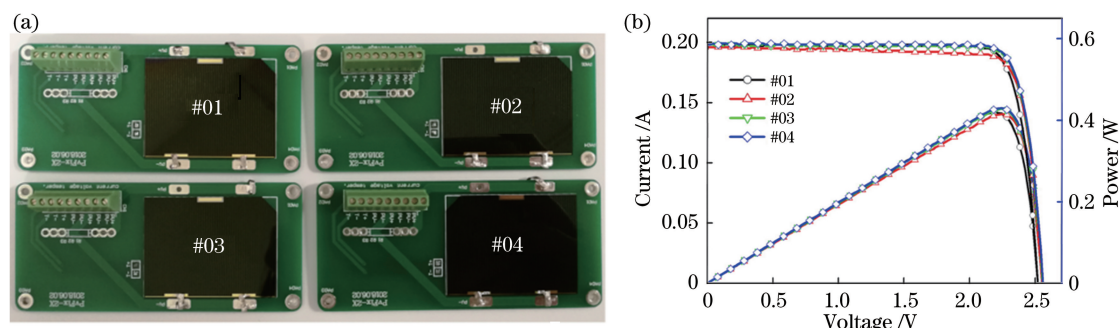


图 5 基于太阳模拟器法测量的三结砷化镓太阳电池的光电性能。(a)四个样品的实物照片;(b)光电性能
Fig. 5 Photoelectric performance of triple-junction GaAs solar cells based on solar simulator method. (a) Photos of four samples; (b) photoelectric performances

根据 $I-V$ 特性曲线,可得出四个三结砷化镓太阳电池的短路电流、开路电压和最大发电功率等关键光电性能参数,如表 1 所示,其中 I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压, P_{max} 为最大发电功率, I_m 为最大功率电流, V_m 为最大功率电压, FF 为填充因子。

通过同型标准太阳电池、标准探测器和陷阱探测器,将这些关键参数的量值溯源到低温辐射计,实现了量值独立溯源至 SI。初步分析得出,短路电流、开路电压和最大发电功率三项关键参数的测量不确定度分别为 2.5%, 1.0% 和 2.7% (包含因子 $k=2$)。

表 1 基于太阳模拟器法测量所得的关键光电性能参数

Table 1 Key photoelectric performance parameters measured by solar simulator method

Sample No.	I_{sc}/mA	V_{oc}/mV	P_{max}/mW	I_m/mA	V_m/mV	FF / %
#01	197.9	2520.0	419.6	192.5	2180.0	84.2
#02	195.6	2551.0	415.3	185.4	2240.0	83.3
#03	198.0	2555.0	427.7	190.9	2240.0	84.5
#04	198.2	2558.0	429.7	191.8	2240.0	84.7

此外,为了获得关键光电性能参数的温度系数以评估太阳电池的在轨性能,也为了对高空气球法所得的测量数据进行温度修正,本文采用半导体控温台将三结砷化镓太阳电池的温度从 15°C 升到 55°C ,每升高 5°C 扫描测量其 $I-V$ 曲线,得到相应的关键光电性能参数,结果如图 6 所示。

对图 6 中的三条曲线作最小二乘法线性拟合,得到三项关键参数的温度系数,结果如表 2 所示。三结砷化镓太阳电池短路电流的温度系数为 $0.0732 \text{ mA}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$,开路电压的温度系数为 $-5.71 \text{ mV}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$,最大发电功率的温度系数为 $-0.988 \text{ mW}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ 。

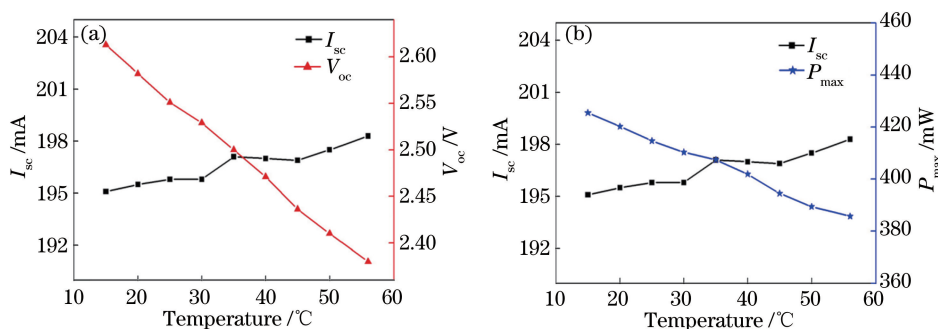


图 6 太阳模拟器测量所得的关键参数随温度的变化。(a) I_{sc} 和 V_{oc} ; (b) I_{sc} 和 P_{max}

Fig. 6 Key parameters measured by solar simulator versus temperature. (a) I_{sc} and V_{oc} ; (b) I_{sc} and P_{max}

表 2 太阳模拟器法测量所得三项关键参数的温度系数列表

Table 2 Temperature coefficients for three key parameters measured by solar simulator

Key parameter	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
Temperature coefficient	$0.0732 \text{ mA} \cdot \text{°C}^{-1}$	$-5.71 \text{ mV} \cdot \text{°C}^{-1}$	$-0.988 \text{ mW} \cdot \text{°C}^{-1}$

3 高空气球法

3.1 测量原理和方法

除了火箭和空间站标定,高空气球法是最接近 AM0 条件的方法,它的飞行高度可超过 30 km 甚至到达 36 km 以上。绝大部分大气在 36 km 以下,在这个高度以上,几乎没有灰尘,没有水蒸气,也没有臭氧带,太阳光辐照基本近似于外太空的太阳光辐照。高空气球标定的基本原理就是在接近 AM0 的高空条件下测量飞行电池的短路电流等关键光电性能参数^[22-24]。具体方法是利用高空氦气球将被测太阳电池带到 35 km 以上高空,在气球上升和平飞阶段,利用太阳跟踪器使被测太阳电池正对太阳,同步采集太阳电池的温度和 $I-V$ 特性数据,并保存数据实时传回地面。测量结束后实验装置与高空气球分离,利用降落伞将太阳电池和实验装置带回地面,回收太阳电池及实验装置。

如忽略太阳跟踪误差,高空气球标定法则只需考虑两项修正即可将测量值转换为 AM0 标准测试条件下的值,一项是日地平均距离修正,另一项是温度修正。短路电流的修正公式为

$$I_{25,1} = I_{T,R} \cdot R^2 - \alpha \cdot (T - 25), \quad (3)$$

式中: $I_{25,1}$ 为 1 个天文单位 ($1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$) 下,太阳电池温度为 25 °C 时的短路电流; R 为日地距离,单位为 AU; $I_{T,R}$ 为日地距离为 R ,太阳电池温度为 T 时的短路电流; α 为太阳电池短路电流的温度系数。对于开路电压,则只执行温度修正即可^[25]。太阳电池在阳光的持续辐照下会出现温升现象,如果无控温装置,太阳电池的温度甚至可

超过 70 °C ,故必须监测其温度并进行修正。

3.2 测量装置

高空气球标定法装置主要包括高空气球、太阳跟踪控制系统、数据采集系统以及样品降落回收系统。本文所用的高空测量装置示意图和实物照片如图 7 所示。图 7(a) 为高空气球法的实验装置示意图,图 7(b) 为发射场地上所拍摄的装置实物照片,图 7(c) 为搭载的被测太阳电池样品照片。

高空气球法的主体设施是高空氦气球,利用它可将被测样品和相关测试设备升至海拔超过 35 km 的高空中,以获得近似于 AM0 真实条件的太阳光谱和辐照度。而太阳跟踪控制系统主要是用于调整样品姿态以使其正对太阳,对测量结果的准确性至关重要。本文采用双轴跟踪方式,通过两个电机分别调整方位角和俯仰角,使太阳电池正对太阳以满足高空气球标定法测量所需的条件。数据采集系统包括充放电电路、高速采集电路、数据记录电路和控制电路等,主要采集包括开路电压、短路电流、最大功率、辐照度和温度等参数。采用动态电容充电法对太阳电池的伏安特性进行测量,即利用电容充放电效应,将一定容量的电容作为负载连接到太阳电池的输出电路上。在太阳电池对电容充电的过程中,电容中的电压和电流会不断变化,通过对其采样读数,可以得到太阳电池的伏安特性曲线。

本文选取太阳模拟器测量用的四个三结砷化镓太阳电池,在内蒙古巴彦淖尔市乌拉特中旗,利用高空氦气球将电池升至 35 km 以上的高空。在上升和平飞阶段,利用太阳跟踪控制系统使太阳电池对准太阳,持续扫描其 $I-V$ 特性数据,并实时监测其

温度。短路电流和温度等关键数据通过气球通信链路实时上传至地面。平飞 2 h 后, 电池测量及其他搭载负荷实验完成, 触发切割装置, 实验装置和样品与高空气球分离, 并利用降落伞对装置和样品进行

回收。此次实验同时还搭载了经地面标定的太阳总辐射表和单晶硅标准太阳电池, 将它们安装在同一面板上, 利用太阳跟踪器调整角度, 实时跟踪和验证上升和平飞阶段太阳辐照度的变化。

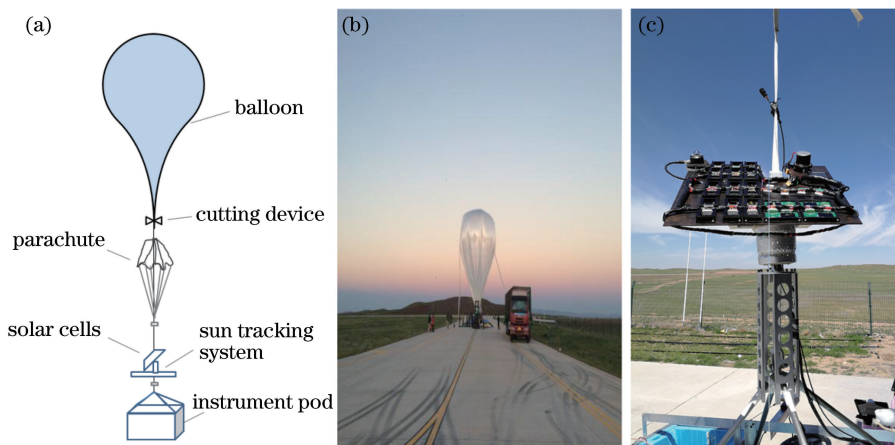


图 7 高空气球法实验装置。(a)装置示意图;(b)装置照片;(c)被测样品照片

Fig. 7 Experimental setup by high altitude balloon method. (a) Schematic of setup; (b) photo of setup; (c) photo of samples to be measured

3.3 测量结果

在高空平飞阶段, 太阳电池正对太阳时接受的辐照度最大, 其短路电流也最大, 二者相互印证。故选取海拔 35 km 以上平飞阶段的短路电流最大值所对应的原始数据, 绘制被测三结砷化镓太阳电池的 I - V 特性曲线, 如图 8 所示。分析提取实时温度监测数据和相应的关键性能参数, 如表 3 所示。由于太阳持续辐照, 太阳电池的温度远高于太阳模拟器所控制的标准测试温度 25 °C, 四个样品在高空的短路电流均大于地面测量值, 而开路电压和最大发电功率均小于地面测量值。这与前文所测得的该三项关键参数随温度变化的规律是一致的。

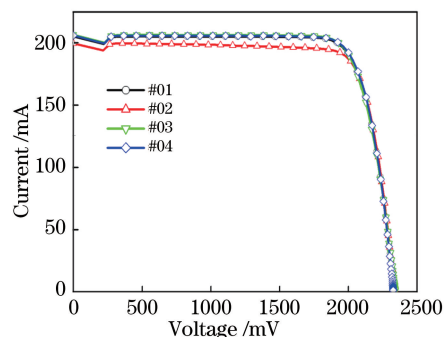


图 8 高空气球法测量所得的未经修正的 I - V 曲线
Fig. 8 Unmodified I - V curves measured by high altitude balloon method

表 3 高空气球法测量的实时温度数据及未经修正的关键光电性能参数

Table 3 Real-time temperature data and unmodified key photoelectric performance parameters measured by high altitude balloon method

Sample No.	Temperature /°C	I_{sc} /mA	V_{oc} /mV	P_{max} /mW	I_m /mA	V_m /mV	FF /%
# 01	67.0	205.0	2333.8	384.94	196.7	1957.0	80.5
# 02	67.6	199.6	2334.1	375.21	189.5	1980.0	80.5
# 03	66.5	206.2	2337.4	385.80	200.0	1929.0	80.0
# 04	69.1	205.7	2325.2	386.91	197.1	1963.0	80.9

4 分析与讨论

基于以上内容, 本文针对航天用主流全结构三结砷化镓太阳电池, 分别采用地面太阳模拟器法和高空气球法, 测量得到了 I - V 特性曲线及相应的关键光电性能参数。但由于温度等条件相差悬殊, 无

法直接进行对比分析, 故采用太阳模拟器测量得到的温度系数(表 2)对高空气球法所得的三项关键参数进行修正。受我国高空气球标定法成熟度的限制, 此处略去了短路电流对日地平均距离的影响, 将在后续研究工作中进行完善。表 4 为修正到 25 °C 的三项关键光电性能参数。

表 4 高空气球法测量所得的温度修正后的
关键光电性能参数

Table 4 Key photoelectric performance parameters measured
by high altitude balloon method after temperature correction

Sample No.	Temperature / °C	I_{sc}/mA	V_{oc}/V	P_{max}/mW
#01	25.0	201.9	2573.6	426.44
#02	25.0	196.5	2577.3	417.30
#03	25.0	203.2	2574.4	426.80
#04	25.0	202.5	2577.0	430.48

对比表 1 和表 4, 计算各组参数的相对偏差, 结果如表 5 所示。短路电流、开路电压和最大发电功率的最大相对偏差分别为 2.61%、2.13% 和 1.63%, 最小相对偏差分别为 0.45%、0.74% 和 0.18%。由此可见, 两种方法在测量航天用三结砷化镓太阳能电池光电性能参数方面具有较好的一致性。太阳模拟器法的量值可溯源至低温辐射计, 因此两种测量方法的量值具有独立性且数据可靠, 解决了我国航天用太阳能电池关键光电参数量值依赖国外的历史问题。

表 5 高空气球法和太阳模拟器法测量的关键
光电性能参数的相对偏差

Table 5 Relative deviations of key photoelectric performance
parameters measured by high altitude balloon method
and solar simulator method

Sample No.	Relative deviation /%		
	I_{sc}	V_{oc}	P_{max}
#01	2.03	2.13	1.63
#02	0.45	1.03	0.48
#03	2.61	0.76	-0.21
#04	2.16	0.74	0.18

5 结 论

针对航天用三结砷化镓太阳能电池的光电性能参数测量, 阐述了基于高光谱匹配双光源太阳模拟器的测量方法及其量值溯源路径, 获得了可溯源至低温辐射计的关键光电性能参数, 实现了我国航天用太阳能电池关键量值独立溯源至 SI, 不再依赖于国外。此外, 对三项关键参数的温度系数进行了测量分析, 依此对高空气球法所得数据进行了温度修正, 温度系数后续还可用于评估航天用太阳能电池的在轨性能。

介绍了高空气球法的原理、装置和方法, 利用高空氦气球, 将地面太阳模拟器法测量用的三结砷化镓太阳能电池样品升至 35 km 以上高空, 进行高空自然太阳光条件下的 I - V 特性测量; 对数据执行温度

修正后, 与地面所得测量值进行对比分析。此为国内首次基于高空气球法成功测量三结砷化镓太阳能电池的光电性能。但此方法还需在以下方面改进: 样品温度的精确控制和监测、样品的安全回收以及基于短路电流数据的日地平均距离修正。另外, 还等需纳入测量不确定度的分析评估, 以便获得更为完整可靠的结果。

太阳模拟器法和高空气球法测量所得的三项关键光电参数的最大相对偏差分别为 2.61%、2.13% 和 1.63%, 最小相对偏差分别为 0.45%、0.74% 和 0.18%。说明了两种方法的测量结果具备较好的一致性。后续的工作将进一步深入研究以提高测量水平, 为我国航天用多结太阳能电池光电性能参数的准确测量提供更有力的技术支撑。

致谢 感谢中国电子科技集团公司第十八研究所肖志斌的讨论。

参 考 文 献

- [1] Green M A, Dunlop E D, Hohl-Ebinger J, et al. Solar cell efficiency tables [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2020, 28 (1): 3-15.
- [2] Sun X P, Xiao Z B, Du Y C. Design of broadband antireflection coating for new gallium arsenide solar cell[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0431002. 孙希鹏, 肖志斌, 杜永超. 新型砷化镓太阳能电池的宽带减反射膜设计[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0431002.
- [3] Pakhanov N A, Andreev V M, Shvarts M Z, et al. State-of-the-art architectures and technologies of high-efficiency solar cells based on III-V heterostructures for space and terrestrial applications [J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2018, 54(2): 187-202.
- [4] King R P, Fetzer C M, Colter P C, et al. High-efficiency space and terrestrial multijunction solar cells through bandgap control in cell structures[C]// The 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, May 20-24, 2002, New Orleans, Louisiana. New York: IEEE, 2002:1190685.
- [5] Bailey S, Raffaele R. Space solar cells and arrays [M] // Luque A, Hegedus S. Handbook of photovoltaic science and engineering. Chichester, UK: Wiley, 2005: 413-448.
- [6] Ma D Y, Chen N F, Tao Q L, et al. Performance of space GaInP/(In) GaAs/Ge triple-junction solar cell containing Bragg reflector [J]. Acta Optica Sinica,

- 2017, 37(11): 1131001.
- 马大燕, 陈诺夫, 陶泉丽, 等. 包含布拉格反射器的空间用 GaInP/(In)GaAs/Ge 三结太阳能电池性能[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1131001.
- [7] Qi L, Zhang R Z. Damage characteristics of three-junction GaAs cell under combined pulse laser irradiation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0514002.
- 戚磊, 张蓉竹. 复合脉冲激光辐照下三结 GaAs 电池的损伤特性[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0514002.
- [8] Jenkins P, Scheiman D, Goodbody C, et al. Results from an international measurement round robin of III-V triple-junction solar cells under air mass zero[C]//2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, May 5-12, 2006, Waikoloa, Hawaii, USA. New York: IEEE, 2006: 279885.
- [9] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Measurement method for electrical characteristics of aerospace solar cells: GB/T 6494—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 航天用太阳能电池电性能测试方法: GB/T 6494—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [10] Ma J J. Physical power technology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2020: 218-246.
- 马季军. 物理电源技术 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2020: 218-246.
- [11] Space systems: single-junction solar cells: measurement and calibration procedures: ISO 15387-2005 [EB/OL]. (2005-06-01) [2020-06-05]. <https://www.sis.se/api/document/preview/906051/>.
- [12] Photovoltaic assemblies and components: ECSS-E-ST-20-08C [EB/OL]. (2012-07-18) [2020-06-05]. <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-20-08c-photovoltaic-assemblies-and-components/>.
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Photoelectric properties: JJF 1622—2017[S]. Beijing: Quality Inspection of China Press, 2017.
- 国家质量监督检验检疫总局. 光电性能: JJF 1622—2017[S]. 北京: 中国质检出版社, 2017.
- [14] Meng H F, Xiong L M, Zhang J C, et al. AM0 performance measurement of triple-junction GaInP/InGaAs/Ge solar cells by a compound light source [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10819: 108190L.
- [15] Reference solar devices: procedures for establishing calibration traceability: IEC 60904-4 [EB/OL]. (2019-11-12) [2020-06-05]. <https://webstore.ansi.org/Standards/IEC/IEC60904Ed2019-2395161>.
- [16] He Y W, Xiong L M, Zhang J C, et al. Primary calibration of solar cells based on DSR method at the National Institute of Metrology of China [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9623: 96230S.
- [17] Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices: IEC 60904-7 [EB/OL]. (2019-08-01) [2020-06-05]. <https://standards.globalspec.com/std/13416107IEC60904-7>.
- [18] Meusel M, Adelhelm R, Dimroth F, et al. Spectral mismatch correction and spectrometric characterization of monolithic III-V multi-junction solar cells [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2002, 10(4): 243-255.
- [19] Meusel M, Baur C, Létay G, et al. Spectral response measurements of monolithic GaInP/Ga(In)As/Ge triple-junction solar cells: measurement artifacts and their explanation [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2003, 11(8): 499-514.
- [20] Meng H F, Yang H D, Zhang J C, et al. Spectral responsivity measurements of monolithic GaInP₂/InGaAs/Ge triple-junction solar cells [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11189: 111891T.
- [21] Measurement of spectral responsivity of multi-junction photovoltaic (PV) devices: IEC 60904-8-1 [EB/OL]. (2017-05-01) [2020-06-05]. <https://standards.globalspec.com/std/10157861/60904-8-1>.
- [22] Hoheisel R, Lorentzen J. High-altitude balloon based AM0 solar cell calibration platform [C] // 43rd Photovoltaic Specialists Conference, June 5-10, 2016, Portland, OR, USA. New York: IEEE, 2016: 16483838.
- [23] Jenkins P, Wilt D, Scheiman D, et al. A new Air Mass Zero calibration facility using the high altitude balloon method [EB/OL]. (2011-06-01) [2020-06-05]. http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?2011ESASP.690E..15J&defaultprint=YES&filetype=.pdf.
- [24] Snyder D B. Solar cell short circuit current errors and uncertainties during high altitude calibrations [C] // 38th Photovoltaic Specialists Conference, June 3-8, 2012, Austin, Texas, USA. New York: IEEE, 2012: 6318182.
- [25] Anspaugh B E, Mueller R L. Results of the 2001 JPL balloon flight solar cell calibration program [EB/OL]. (2002-03-01) [2020-06-05]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020048594.pdf>.