文章编号 2095-1531(2015)06-1004-09

# 实用型三谱段太阳模拟器的设计与研制

高 雁*,刘洪波,王 丽,顾国超
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘要**:本文设计并研制了一种实用型三谱段太阳模拟器,其光谱匹配可同时调整 3 个谱段(300 ~ 700 nm,700 ~ 900 nm,900 ~ 1 700 nm)范围的能量,修正后可满足三结砷化镓太阳电池的测试使用要求。本文重点阐述了三谱段太阳模拟器滤光片的设计和氙灯光谱的修正及测试,介绍了太阳模拟器的光机结构。实验表明:三谱段太阳模拟器的光谱匹配满足三结砷化镓太阳电池各子电池的响应电流值。在有效辐照面 150 mm × 150 mm 上,平均辐照度可以达到 2 个太阳常数(2 730 W/m$^2$),辐照不均匀度达到 ±1. 77%,辐照不稳定度达到 ±0. 83%,为太阳电池自动分拣系统提供了可靠稳定的平台。

**关 键 词**:太阳模拟器;三谱段;光谱匹配;三结太阳电池
**中图分类号**:TH74 **文献标识码**:A doi:10. 3788/CO. 20150806. 1004

# Design and manufacture of a practical triple spectrum solar simulator

GAO Yan*, LIU Hong-bo, WANG Li, GU Guo-chao
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: ynogg@163. com*

**Abstract**: A practical triple spectrum solar simulator is designed and developed in this paper. The spectral match of this solar simulator can adjust intensity of three spectral bands(300 – 700 nm, 700 – 900 nm, 900 – 1 700 nm), which can meet the test requirement of triple junction GaInP/GaAs/Ge solar cell after spectrum correction. This paper first describes the design of the filter and the process of system spectrum correction and testing, and then introduces the optical system and mechanical structure of the solar simulator. The experiments show that the solar simulator's spectral match meet triple junction GaInP/GaAs/Ge solar cell's response currents. In the effective irradiated surface area of 150 mm × 150 mm, the average irradiance reaches 2 730 W/m$^2$, the irradiance non-uniformity reaches ±1. 77%, and the irradiance temporal instability is up to ±0. 83%. The solar simulator provides a stable and reliable platform for the solar cell automatic sorting system.

**Key words**: solar simulator; triple spectrum; spectral match; triple junction solar cell

**收稿日期**:2015-06-12;**修订日期**:2015-07-16
**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60507003)

## 1　引　言

目前人类在太空中的卫星等航天器两端都安装了大型的空间太阳电池阵,它是卫星等航天器的核心供电装置。随着空间太阳电池阵的不断发展,三结砷化镓电池已经逐渐取代了传统的硅光电池。三结砷化镓电池的光电转换效率比硅光电池要高很多,同时三结砷化镓电池的耐温性也比较好,而且可以制成薄膜和超薄型太阳电池[1]。三结砷化镓电池的测试需要精确模拟空间太阳光的光谱特性。

美国研制了一种三光源的 AM0 太阳模拟器[2],整个设备由一台 X-25 短弧氙灯太阳模拟器,通过双向分色镜提供紫外和可见光谱段的光谱,由 36 只红外钨丝灯阵来提供红外光谱,其中 12 只钨丝灯配置 700 ~ 900 nm 的带通滤光片,并且由独立的电源供电,其余 24 只钨丝灯负责远红外光谱(900 ~ 1 700 nm),然后通过红外整形滤光片,再与 X-25 短弧氙灯太阳模拟器的光谱相混合。在测试平面上,最终设备的光谱曲线与 AM0 太阳光谱非常一致,尤其是红外波段。这种多光源太阳模拟器虽然光谱匹配与太阳光非常一致,但系统复杂成本较高,同时光束准直角较差达到 7.6°。

本文的所研制的三谱段太阳模拟器使用 4 种滤光片互相配合,能够在 300 ~ 700 nm,700 ~ 900 nm,900 ~ 1 700 nm 各谱段内准确的模拟太空环境中太阳光的辐照度,可以满足三结砷化镓电池的测试要求,同时光束准直角 2.5°,整个系统结构简单,可靠性好,成本低。

## 2　太阳模拟器光源与三谱段滤光片的设计

太阳模拟器想要满足 GaInP/GaAs/Ge 三结砷化镓电池的测试要求,其光谱匹配精度就必须与 AM0 太阳光谱非常接近。

### 2.1　氙灯光谱的初调

随着光源技术的进步,短弧氙灯、金属卤素灯、碳弧灯、卤素灯、钨丝灯、LED 等光源均可以用作太阳模拟器的光源,并且各有优缺点[3]。氙灯种类中有一种短弧氙灯,其辐射光谱能量分布与日光相接近,色温约为 6 000 K,而且光、电参数一致性好,工作状态受外界条件变化的影响相对较小,并且在其寿命期内光谱能量分布也变化不大,是太阳模拟器光源的优先选择[4]。

本系统采用欧司朗生产的 3 kW 短弧球形氙灯作为光源,氙灯的光谱分布在紫外和可见光部分与太阳光谱十分相似,但在 800 ~ 1 000 nm 之间有很多尖峰,远远达不到三结砷化镓太阳电池的测试要求,如图 1 所示。所以,首先需要将氙灯的特征光谱滤掉,使其大致满足 AM0 太阳光谱,我们称之为 AM0 滤光[5]。

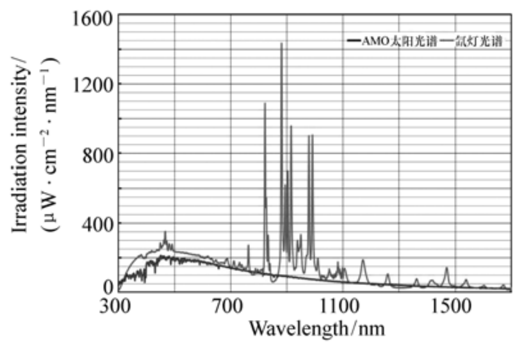



图 1　AM0 太阳光谱与氙灯光谱对比

Fig. 1　Comparison of AM0 and Xenon-lamp spectra

AM0 滤光片属于干涉截止滤光片的一种,由于其位置处于积分器附近,温度非常高,所以基片材料必须耐高温,JGS3 石英玻璃耐高温且热膨胀系数小[6]。故选择 JGS3 石英玻璃作为基片,同时要对滤光片进行强制风冷却。

3A 级太阳模拟器也利用过此种滤光片,但中心波长处的光谱透过率只有 13% 左右,对于 AM0 太阳光谱来说,对氙灯特征谱线压制过低,本文的滤光片对此进行改进,光谱透过率曲线如图 2 所示。滤光片中心波长 930 nm 处的透射率提升至 18%,半宽度约 200 nm;400 ~ 760 nm 波段内,平均透射率 $T_a \geqslant 95\%$,1 160 ~ 1 700 nm 内平均透射率 T≥92%[7-9]。

通过 AM0 滤光片之后的氙灯光谱在 800 ~ 1 000 nm之间的尖峰大幅降低,整个光谱曲线与

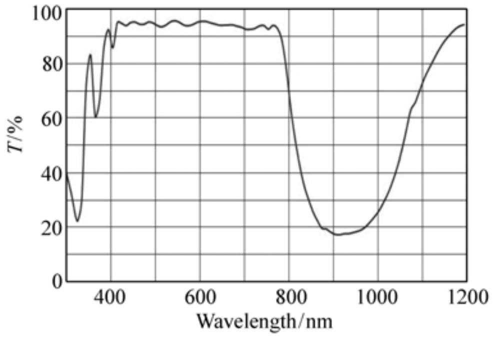



图2 AM0 滤光片光谱透过率曲线

Fig. 2 Transmittance curve of the AM0 filter

AM0 太阳光谱已经大致相近,可以满足 ASTM E927-10 光谱匹配 A 级标准,如图 3 所示,但还是不能够满足三结砷化镓电池的测试要求。谱线在 400 ~ 760 nm 之间强度应再降低一些,800 ~ 1 100 nm之间强度应再提高一些。

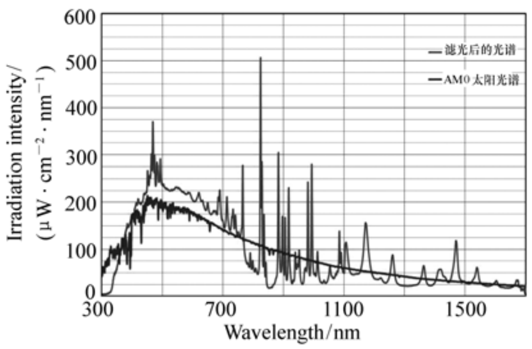



图3 AM0 太阳光谱与滤波后的氙灯光谱对比

Fig. 3 Comparison of AM0 and filtered xenon-lamp spectra

## 2.2 三谱段滤光片的设计

要更进一步的对光谱进行修正,就需要额外的滤光片。三结砷化镓电池的量子效率与 AM0 太阳光谱曲线如图 4 所示[10]。系统需要匹配太阳电池 300 ~ 700 nm, 700 ~ 900 nm, 900 ~ 17 00 nm三个谱段的光谱,所以设计的光谱修正组件至少需要 3 种滤光片,每种滤光片负责一个谱段。

光谱修正组件如图 5 所示,包括第一滤光片(1)、第二滤光片(2)和第三滤光片(3)及其滤光片平移机构(4)和圆形支撑架(5)等。每种滤光片各有两块,对称放置。每个滤光片固定在一个

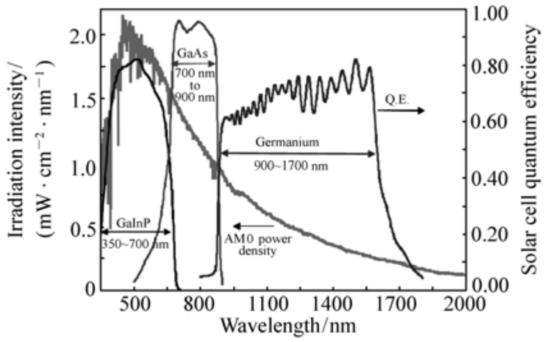



图4 砷化镓电池的量子效率与 AM0 光谱曲线图

Fig. 4 Quantum efficiency of a GaInP/GaAs/Ge solar cell plotted and the AM0 spectrum curve

平移机构上,可以前后移动来控制滤光片在光路中的参与程度。6 组平移机构固定在圆形支撑架上,安装在椭球镜的正上方,实物如图 6 所示。

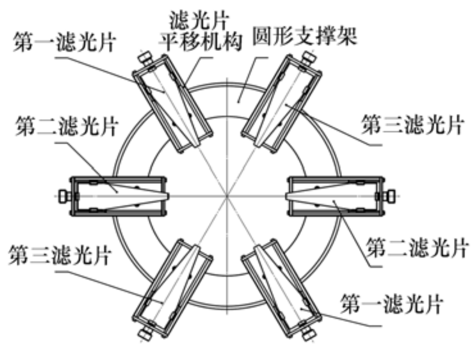



图5 光谱修正组件的结构布局

Fig. 5 Structural layout of spectrum correction module

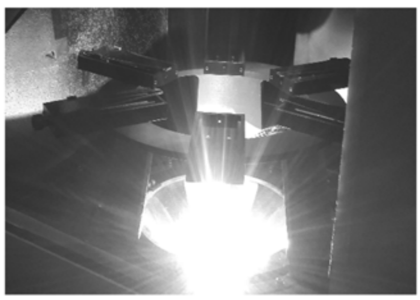


图6 光谱修正组件实物图

Fig. 6 Practicality of the spectrum correction module

光谱修正组件共 3 组滤光片,每组 2 片,其中第一滤光片为钢化透红外玻璃 HB700,为前截止滤光片,截止波长约为 700 nm,光谱透过率曲线如图 7 所示[11];第二滤光片为隔热玻璃 GRB3,为

后截止滤光片,截止波长约为 700 nm,光谱透过率曲线如图 8 所示[12];第三滤光片为 700 ~ 900 nm的带通滤光片,也属于干涉截止滤光片,光谱透过率曲线如图 9 所示。

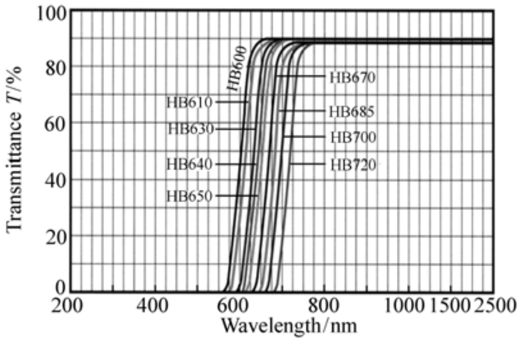



图 7　HB700 滤光片光谱透过率曲线

Fig. 7　Transmittance curves of HB700 filter

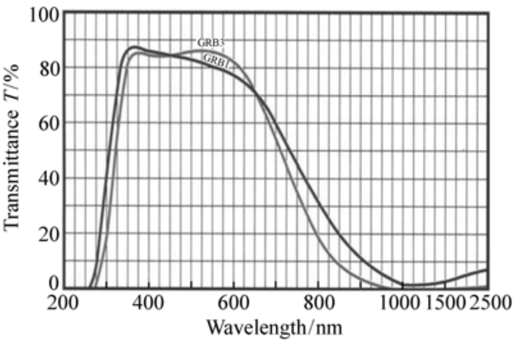



图 8　GRB3 滤光片光谱透过率曲线

Fig. 8　Transmittance curves of GRB3 filter

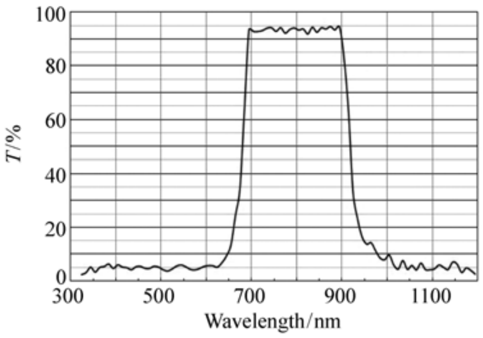



图 9　带通滤光片光谱透过率曲线

Fig. 9　Transmittance curves of band filter

光谱修正组件的滤光片位于椭球镜上方,直接受到氙灯的照射,温度较高。HB700 和 GRB3 属于颜色玻璃,材料均选用耐高温的钢化玻璃。700 ~ 900 nm 带通滤光片膜系镀在耐高温的 JGS3 石英玻璃上,并通过轴流风机强制风冷却,保证膜系安全。

### 2.3　氙灯光谱的最终修正

为了能够达到三结砷化镓电池的测试要求,我们需要通过光谱修正组件来调节光谱。通过我们的设计,系统现在具有 4 个可调变量:氙灯功率和 3 组不同滤光片在光路中的参与程度。

首先我们将标定好的三结砷化镓电池和光谱仪探头放置于有效辐照面的中心位置,在修正过程中同时监测砷化镓电池三谱段的响应电流值和实时的光谱曲线。当太阳模拟器内部不进行任何修正时,在有效辐照面的中心附近测试三结砷化镓电池子电池的电流值分别为:74.6 mA、70.8 mA、125.0 mA(3 片子电池的标称值分别为 62.6 mA、75.3 mA、125 mA)。从相应电流可以看出,在谱段 300 ~ 700 nm 辐照值偏高,700 ~ 900 nm,900 ~ 1 700 nm偏低。如图 10 所示,滤光后的氙灯光谱多项式平均线与 AM0 太阳光谱有一定的偏差,从图中也可以看出大概的趋势。

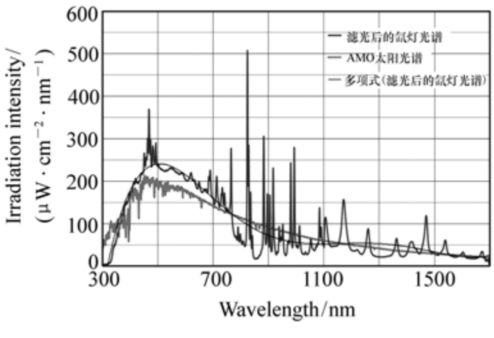



图 10　AM0 太阳光谱与加 AM0 滤光片的氙灯光谱

Fig. 10　AM0 spectrum and Xenon-lamp spectrum with AM0 optical filter

光谱修正的原则是如果要提升某一波段的强度,先将对应滤光片推入光路中,压低其余谱段的强度,改变光谱分布的百分比,然后再提高氙灯功率,提升整体的强度。根据这一原则,反复几次调整,就可以将光谱修正到可以满足太阳电池测试要求的状态。

具体调试过程:(1)将 HB700 滤光片 1 移入光路中;(2)将对称的 HB700 滤光片 2 移入光路

中一半;(3)提升氙灯功率20%;(4)继续将HB700滤光片2向光路中移动,同时将GRB3滤光片1移入光路中一半;(5)将GRB3滤光片2也移入光路中一半;(6)再提升氙灯功率20%;(7)将两片带通滤光片移入光路中,同时微调其它滤光片,最终得到需要的光谱分布。每调整一步,记录下来三结砷化镓电池各子电池的电流值,如表1所示。

**表1 系统光谱修正过程**

**Tab.1 Process of system spectrum correction**

| 步骤 | GaInP顶电池/mA | GaAs中电池/mA | Ge底电池/mA |
|---|---|---|---|
| 标称值 | **62.6** | **75.3** | **149.3** |
| 1 | 74.6 | 70.8 | 125.0 |
| 2 | 66.9 | 67.7 | 124.7 |
| 3 | 53.9 | 64.3 | 124.1 |
| 4 | 67.5 | 78.1 | 143.8 |
| 5 | 53.6 | 70.9 | 139.0 |
| 6 | 52.1 | 61.5 | 125.2 |
| 7 | 68.4 | 76.2 | 161.9 |
| 8 | 62.6 | 74.4 | 149.3 |

调试完成后,只有GaAs中电池的响应电流值有-1.2%的偏差,其余两个谱段完全满足标称值。从图11中可以看出,修正后的氙灯光谱的多项式平均线与AM0太阳光谱基本重合。系统修正后的光谱测试结果如表2所示[13],最大偏差为-14.86%,优于A级标准的±25%。

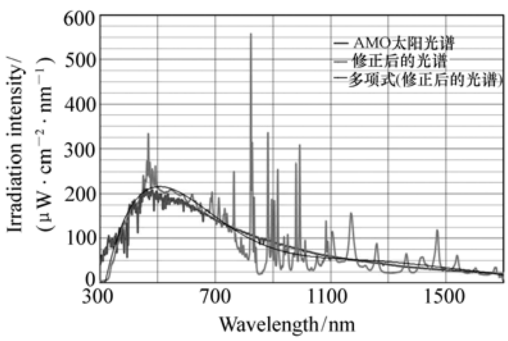



图11 AM0太阳光谱与修正后的氙灯光谱对比

Fig.11 Comparison of AM0 and revised xenon-lamp spectra

**表2 光谱测量结果对比**

**Tab.2 Contrast of spectra test result**

| 谱段/nm | 标准值/% | 实测值/% | 偏差/% |
|---|---|---|---|
| 300~500 | 22.77 | 22.54 | -1.01 |
| 500~600 | 15.13 | 16.58 | 9.58 |
| 600~700 | 12.96 | 13.93 | 7.48 |
| 700~800 | 10.38 | 10.12 | -2.50 |
| 800~900 | 8.33 | 7.09 | -14.86 |
| 900~1 100 | 11.97 | 10.38 | -13.28 |
| 1 100~1 700 | 18.46 | 19.36 | 4.88 |

## 3 太阳模拟器的设计

### 3.1 太阳模拟器光学系统

三谱段太阳模拟器的光学系统如图12所示。氙灯光源发出的光,经椭球镜反射后,经过第一平面反射镜改变光束方向,再经过AM0滤光片滤光,得到与太阳光谱接近的光谱分布,然后以给定的包容角汇聚于积分器组件的场镜处,形成一个较大范围的辐照分布。这个较大范围的辐照分布经元素透镜分割后形成多个光通道,再经积分器组件的投影镜成像到无穷远,形成一个均匀的辐照面。然后经第二平面反射镜改变光束方向,通过准直物镜以±2.5°的光束准直角,投影到有效辐照面上[14-16]。最后通过滤光片组件的修正,获得满足三结砷化镓电池测试要求的太阳光谱。

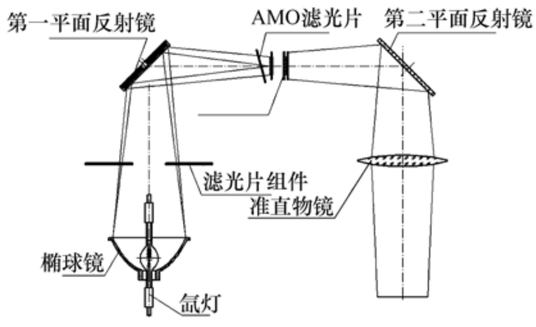



图12 太阳模拟器光学系统结构图

Fig.12 Schematic diagram of optical system of solar simulator

### 3.2 太阳模拟器的结构

三谱段太阳模拟器结构如图13所示,主要由地脚(1)、下箱体(2)、聚光组件(3)、光谱修正组件(4)、上箱体(5)、第一反射镜组件(6)、积分器组件(7)和前箱体(8)、第二反射镜组件(9)和准

直镜组件(10)等组成。

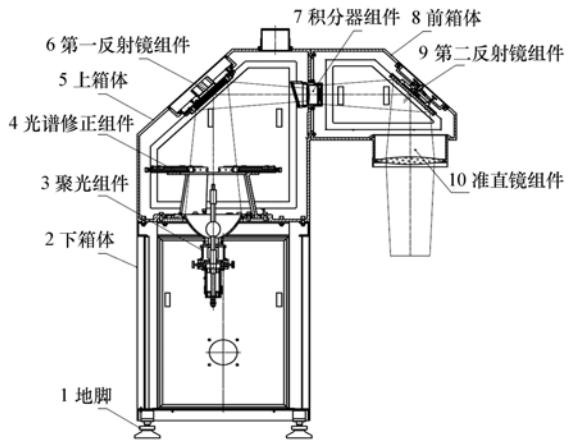



图 13　系统结构布局

Fig. 13　Structural layout of system

氙灯的调节机构位于椭球镜的下端,功能是使氙灯的氙弧在椭球镜的第一焦点附近做平移和升降运动,用于调试模拟器输出光束的辐照不均匀度和总辐照度。光谱修正组件位于聚光组件的正上方,用来修正氙灯光谱。椭球镜固定在一个托盘上,整体安装在下箱体的上部,微调机构带动托盘和椭球镜使其能够进行微量平面移动,设计在托盘上的三紧三拉机构使其产生倾斜,目的是在系统装调的过程中,调整椭球镜的光轴线与系统光轴重合。箱体内的两个平面反射镜及角度调整机构采用的是平面内 3 点拉紧结构,作用是微调通过该反射镜系统的光轴偏折方向。

上箱体安装积分器组件的孔位是整个系统的基准孔。在装调模拟器光学系统时,首先要确定系统的光轴,调试时在孔位上安装一片基准平面反射镜,利用光束自准直法确定系统的光轴。

## 4　太阳模拟器的指标测试

三谱段太阳模拟器的指标测试如图 14 所示,测量仪器使用的是面积为 20 mm×20 mm 的标准硅光电池和高精度数字源表。

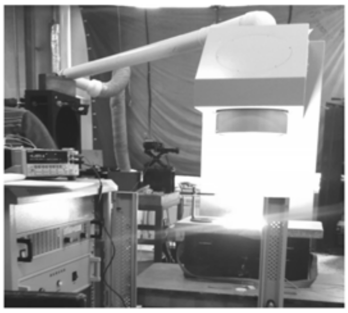


图 14　太阳模拟器指标测试

Fig. 14　Qualification test of solar simulation

### 4.1　辐照不均匀度测试方法及测量结果

太阳模拟器的辐照不均匀度主要是由积分器组件和调试时对氙灯的离焦来实现。积分器组件是两组蜂窝透镜阵列,蜂窝元素透镜越多,有效辐照面上的均匀性就越好[17]。

| | | | |
|---|---|---|---|
| A | B | C | D |
| E | F | G | H |
| I | J | K | L |
| M | N | O | P |

图 15　辐照不均匀度测试点分布

Fig. 15　Irradiance non-uniformity test distribution

**表 3　辐照不均匀度测试数据**

**Tab. 3　Irradiance non-uniformity test data**

| 位置 | A | B | C | D | E | F |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 电流 $I$/mA | 152.7 | 154.8 | 156.7 | 153.6 | 155.5 | 156.9 |
| 位置 | G | H | I | J | K | L |
| 电流 $I$/mA | 158.2 | 157.1 | 154.6 | 157.5 | 157.8 | 153.1 |
| 位置 | M | N | O | P | | |
| 电流 $I$/mA | 154.0 | 156.3 | 156.6 | 153.9 | | |

测试方法:在 150 mm×150 mm 的有效辐照面内平均分布 16 个方格,测量硅光电池在每个方

格中心的光照电流值,如图 15 所示,测试数据如表 3 所示。

$$辐照不均匀度 = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100\% = \frac{158.2 - 152.7}{158.2 + 152.7} \times 100\% = \frac{5.5}{310.9} \times 100\% = \pm 1.77\%$$

### 4.2 辐照不稳定度测试方法及测量结果

太阳模拟器的辐照不稳定度主要是由器件的性能决定,包括氙灯和电源。氙灯点燃时的弧飘和电源的纹波都会对辐照不稳定度造成影响。

(a)长时间辐照不稳定度测试

测试方法:将硅光电池放在有效辐照面中心点附近,测量其光照电流值,每隔 2 min 测量一次,记录 15 次测量结果,测试数据见表 4。

**表 4 长时间辐照不稳定度测试数据**

**Tab.4 Irradiance temporal instability test data**

| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 电流 I/mA | 157.6 | 157.4 | 157.2 | 157.3 | 156.9 | 157.1 |
| 次数 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 电流 I/mA | 157.2 | 157.0 | 157.3 | 157.3 | 157.0 | 156.8 |
| 次数 | 13 | 14 | 15 | | | |
| 电流 I/mA | 157.1 | 157.0 | 157.4 | | | |

$$长时间辐照不均匀度 = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100\% = \frac{157.6 - 156.8}{157.6 + 156.8} \times 100\% = \frac{0.8}{314.4} \times 100\% = \pm 0.25\%$$

(b)短时间辐照不稳定度测试

测试方法:将硅光电池放在有效辐照面中心点附近,测量其光照电流值,连续读数大于 50 次并记录,其中最大值158.4 mA,最小值155.8 mA。

$$短时间辐照不均匀度 = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \times 100\% = \frac{158.4 - 155.8}{158.4 + 155.8} \times 100\% = \frac{2.6}{314.2} \times 100\% = \pm 0.83\%$$

由以上测试结果可以看出,三谱段太阳模拟器不但光谱匹配可以满足砷化镓太阳电池的测试要求,其辐照不均匀度和辐照不稳定度(包括稳态和瞬态)均可以满足 ASTM E927-10 A 级标准。

## 5 结 论

本文对实用型三谱段太阳模拟器的研制工作进行了阐述,重点描述了光谱匹配的设计和实验工作。整个系统结构简单,易于实现,成本较低,并且很好的满足了三结砷化镓电池的测试对 300 ~ 700 nm,700 ~ 900 nm,900 ~ 1 700 nm 3 个谱段光谱匹配的要求,同时辐照不均匀度和辐照不稳定度均满足 A 级标准,为太阳电池的自动分拣系统和光伏器件的电学性能测试提供了一个可靠的光源平台。

**参考文献:**

[1] 王子龙,张华,赵巍,等. 高聚光条件下砷化镓光伏电池特性的实验研究[J]. 太阳能学报,2013,34(1):39-44.
WANG Z L,ZHANG H,ZHAO W,*et al.*. Electrical properties of the InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell under high concentration Photovoltaic system based on field-test experimental[J]. *ACAT Energiae Solaris Sinica*,2013,34(1):39-44. (in Chinese)

[2] JENKINS P,SCHEIMAN D,SNYDER D. Design and performance of a triple source air mass zero solar simulator[C]. NASA/CP. Cleveland:NASA Glenn Research Center,USA,2005,213431:134-138.

[3] 高雁,刘洪波,王丽,等. 大面积准直型太阳模拟器的设计与研制[J]. 中国光学,2014,4(7):657-664.

GAO Y,LIU H B,WANG L,*et al.*. Design and manufacture of a large-area collimation solar simulator[J]. *Chinese Optics*,2014,4(7): 657-664. (in Chinese)

[4] 王元,张林华.一种新型全光谱太阳模拟器设计[J].太阳能学报,2006,27(11):1133-1136.
WANG Y,ZHANG L H. Design of a new type of full-spectrum solar simulator[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*,2006,27(11):1133-1136. (in Chinese)

[5] 王素平,凌健博,刘立伟,等.一种应用于太阳仿真器的照明系统设计[J].光电工程,2006,33(9):32-35.
WANG S P,LING J B,LIU L W,*et al.*. Simple lighting system applied to the solar simulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*,2006,33(9):32-35. (in Chinese)

[6] 孟嘉译,付秀华,王迪.太阳模拟器中光谱修正滤光片的研制[J].光电工程,2010,37(2):50-53.
MENG J Y,FU X H,WANG D. Fabrication of spectral correction filter in solar simulator[J]. *Photoelectricity Engineering*,2010,37(2):50-53.

[7] 张大伟,孙浩杰.氧离子束辅助沉积氧化铪薄膜光学属性的研究[J].应用激光,2006,26(5):333-335.
ZHANG D W,SUN H J. Investigation of laser induce damage threshold of $HfO_2$ films prepared with oxygen ion beam assisted deposition[J]. *Laser Applied*,2006,26(5):333-335. (in Chinese)

[8] 刘洪兴,孙景旭,刘则洵.氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J].光学 精密工程,2012,20(7):1447-1453.
LIU H X,SUN J X,LIU Z X. Design of intergrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(7):1447-1453. (in Chinese)

[9] 刘洪波,高雁,王丽,等.高倍聚光太阳模拟器的设计[J].中国光学,2011,4(6):594-599.
LIU H B,GAO Y,WANG L,*et al.*. Design of high-flux solar simulator[J]. *Chinese Optics*,2011,4(6):594-599. (in Chinese)

[10] WARNER J H,WALTERS R J,MESSENGER S R,*et al.*. Measurement and characterization of triple junction solar cells using a close matched multi-zone solar simulator[J]. *SPIE*,2004,5520:45-55.

[11] 罗青青.宽光谱太阳模拟器的理论分析与整体设计[D].天津:天津大学,2009.
LUO Q Q. Theoretical analysis and integral design for wide spectrum solar simulator[D]. Tianjin:Tianjin University,2009. (in chinese)

[12] 陈文志,蒋绿林,姜黎,等.太阳模拟器的光谱设计实验研究[J].光学学报,2011,31(2):0222002.
CHEN W ZH,JIANG L L,JIANG L,*et al.*. Experimental research of spectral design of solar simulator[J]. *Acta Optica Sinica*,2011,31(2):0222002. (in Chinese)

[13] 顾国超,王丽,刘洪波,等.瞬态热量标定系统的太阳模拟器光学系统设计[J].中国光学,2012,5(6):630-638.
GU G C,WANG L,LIU H B,*et al.*. Optical design of solar simulator use for transient calorimeter calibration system[J]. *Chinese Optics*,2012,5(6):630-638. (in Chinese)

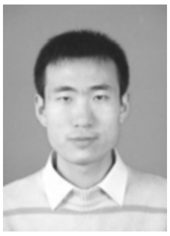
[14] 高雁,刘洪波,王丽,等.AAA级太阳模拟器的设计与研制[J].中国光学,2013,4(6):570-576.
GAO Y,LIU H B,WANG L,*et al.*. Design and development of a class AAA solar simulator[J]. *Chinese Optics*,2013,4(6):570-576. (in Chinese)

[15] 任建岳,苏克强,王兵,等.真空应用太阳模拟灯及其灯阵的研制[J].光学 精密工程,2010,18(8):1699-1706.
REN J Y,SU K Q,WANG B,*et al.*. Development of vacuum application solar simulation Xenon flash lamp array[J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(8):1699-1706. (in Chinese)

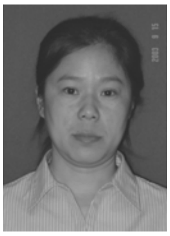
[16] 单秋莎,张国玉,刘石,等.太阳模拟器的拉赫不变量传递[J].中国光学,2012,5(6):639-645.
SHAN Q S,ZHANG G Y,LIU SH,*et al.*. Lagrange invariant energy transfer of solar simulator[J]. *Chinese Optics*,2012,5(6):639-645. (in Chinese)

[17] 张以谟.应用光学[M].北京:电子工业出版社,2008.
ZHANG Y M. *Application Optics*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2008. (in Chinese)

**作者简介：**



高　雁(1982—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ynogg@163.com



王　丽(1964—),女,吉林长春人,学士,高级工程师,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ynogg@126.com

刘洪波(1956—),男,吉林长春人,硕士,研究员,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:hbliu120@sina.com

顾国超(1983—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ggc-2003@163.com