

AAA级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:完成了一种光谱匹配、辐照不均匀度和辐照不稳定性均能达到A级标准的AAA级太阳模拟器的设计与研制。介绍了太阳模拟器的光源选择和滤光片的设计,给出了太阳模拟器的光机结构,测量了太阳模拟器的各项技术指标。结果表明,太阳模拟器的光谱匹配在波长400~1100 nm处满足ASTM E927-10中AM1.5G A级要求。在有效辐照面55 mm×55 mm内,其平均辐照度达到1000 W/m²,辐照不均匀度达到1.35%,辐照不稳定性达到1.27%。测量数据显示设计的太阳模拟器满足ASTM E927-10的AAA级标准。

关键词:太阳模拟器;氙灯;光谱匹配;辐照均匀度;辐照稳定性

中图分类号:TH703; TM923.32 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130604.0570

Design and development of a class AAA 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: hbliu120@sina.com

Abstract: This paper designs and develops a class AAA solar simulator and its spectral matching, Irradiance non-uniformity and irradiance temporal instability all can reach class A standard. It firstly describes the light source selection of the solar simulator and gives the design process of the filter. Then, it introduces the optical system and mechanical structure of the solar simulator. Finally the technical specifications of the simulator are measured. The experiments show that the solar simulator spectral match meet the ASTM E927-10 the AM1.5G class A requirements in the wavelength range of 400 – 1100 nm. In an effective irradiated surface area of 55 mm×55 mm, its average irradiance, Irradiance non-uniformity, and irradiance temporal instability have been up to 1000 W/m², 1.35% and 1.27%, respectively. Obtained data demonstrate that the solar simulator meets the standard ASTM E927-10 class AAA.

Key words: solar simulator; xenon lamp; spectral match; irradiance uniformity; irradiance stability

1 引言

随着世界经济的发展,能源的消耗越来越大,常规能源终将耗尽,而随之带来的环境污染问题将日益严重,因此,最重要的清洁能源之一——太阳能越来越引起人们的重视,而获取太阳能的重要途径就是使用太阳能电池。现在全球 50% 以上的太阳能电池片产自中国,这意味着众多的太阳能电池厂家对太阳模拟器设备的需求会越来越多,因此,太阳能电池的功效检测和 $I-V$ 曲线测试都对模拟器与太阳光的逼近程度要求增高,即要求 AAA 级太阳模拟器^[1-2]。所谓 AAA 级太阳模拟器是指光谱匹配、辐照不均匀度和辐照不稳定性都能达到 A 级标准^[3]。目前 AAA 级太阳模拟器生产厂家主要是来自国外,且价格较高,而国内的厂家多是以脉冲式太阳光模拟器为主。本文设计了一种可以提供长时间稳定辐照的 AAA 级太阳模拟器。

2 太阳模拟器光源的选择与滤光片的设计

要使太阳模拟器达到 AAA 级标准,光谱匹配精度达到 A 级尤为重要。由于氙灯在可见光部分与太阳光谱非常接近,选择短弧氙灯作为光源,再加特制滤光片,就可以使光谱达到要求。

2.1 氙灯光谱测试

光谱检测设备采用的是荷兰 Avantes 公司的 AvaSpec-2048 光谱仪,可测量光谱为 200 ~ 1 100 nm,光谱分辨率为 2.4 nm。

氙灯光源是利用氙气放电发光的电光源。由于放电物质是惰性气体氙气,所以激发电位和电离电位相差较小。氙灯辐射光谱能量分布与日光十分接近,色温约为 6 000 K。氙灯连续光谱的部分光谱分布几乎与灯输入功率变化无关,在寿命期内光谱能量分布也变化不大。氙灯的光、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^[4]。

本系统的光源采用 XQ500 短弧氙灯,功率 500 W,氙灯光谱与太阳光谱的对比如图 1 所示,

在可见光部分氙灯光谱与太阳光谱非常接近,但在 800 ~ 1 000 nm 之间有很多尖峰,不能达到 A 级光谱的要求。

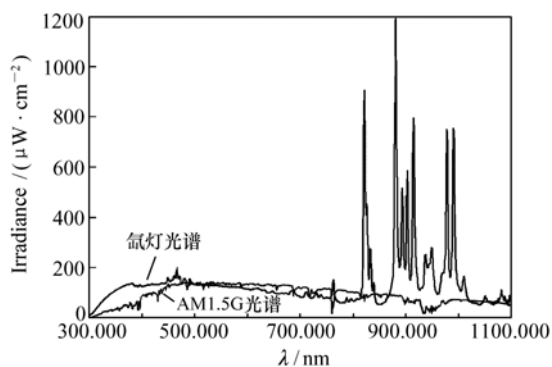


图1 太阳光谱与氙灯光谱的对比

Fig. 1 Comparison of solar spectrum and xenon-lamp spectrum

2.2 滤光片的设计

本系统滤光片属于干涉截止滤光片中的一种,它是利用干涉原理仅使特定光谱范围的光通过的光学薄膜。常见的干涉滤光片分为截止滤光片和带通滤光片两种。截止滤光片要求某一波段的光束高反射,偏离这一波段的光束高透射^[5]。

实际使用的干涉滤光片是用真空镀膜法在透红外的光学材料基片上交替沉积高折射率层和低折射率层形成周期性结构的多层膜。根据标准的太阳光谱曲线和氙灯光谱曲线的对比,滤光片的设计光谱透过率如表 1 所示。

表 1 滤光片波段透过率要求

Tab. 1 Wavelength and transmittance of the filter

波段/nm	透过率/%
300 ~ 400	60 ± 5
400 ~ 500	90 ± 5
500 ~ 800	95 ± 5
800 ~ 1 000	35 ± 5
920	20 ± 5
1 000 ~ 1 100	90 ± 5

依据使用环境,滤光片的基片材料必须耐高温,热膨胀系数小,并且对全光谱有高透射率。根据使用要求,本文选择 JGS_3 石英玻璃作为基片材

料。

镀膜采用箱式光学镀膜机,该设备配有光学膜厚控制仪(光控)和 IC/5 石英晶体膜厚控制仪(晶控)。通常光控法适合控制光学厚度为 $1/4\lambda$ 整数倍的膜层,而晶控法可以控制任意厚度的膜层,由于优化后的膜系为非周期膜系,所以本实验采用了晶控。在镀膜过程中,基片的烘烤温度为 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,真空度高于 $5 \times 10^{-3}\text{ Pa}$,充氧后的工作真空度为 $1.4 \times 10^{-2}\text{ Pa}$,膜层均采用离子束辅助电子束热蒸发技术进行沉积^[6]。镀制完成后,进行了滤光片抗高温测试:将滤光片样品放在太阳模拟器中的相应位置,点燃 $3\ 000\text{ W}$ 氙灯对其进行连续照射,24 h 后取出样品,在高倍显微镜下观察,发现膜层表面结构没有变化。在实际使用中,对膜系进行强制风冷换热,因此膜层温度耐受度没有问题。

实际镀制的滤光片曲线如图 2 所示。滤光片膜层厚度中心波长 920 nm 处的透射率约为 20%,半宽度约 250 nm ; $400 \sim 700\text{ nm}$ 波段内,平均透射率 $T_a \geq 95\%$, $1\ 200 \sim 1\ 400\text{ nm}$ 内平均透射率 $T_a \geq 92\%$,对于 AM1.5G 光谱的太阳模拟器来说, $1\ 400\text{ nm}$ 后的光谱可不作要求。

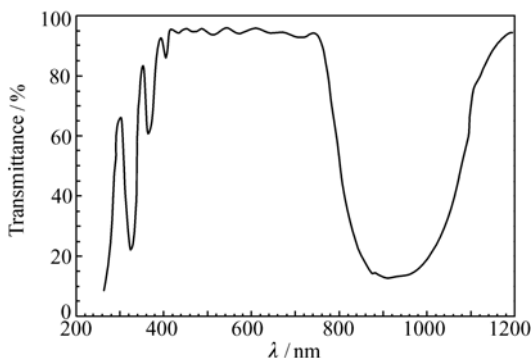


图 2 实际光谱透过率曲线

Fig. 2 Measured transmittance of the filter

滤光之后的氙灯光谱与太阳光谱的比较如图 3 所示,由对比图可以看出,氙灯在 $800 \sim 1\ 100\text{ nm}$ 之间的尖峰大幅减小,同时滤光片的设计还可以改进,氙灯光谱 $300 \sim 400\text{ nm}$ 之间应再降一些, $800 \sim 1\ 100\text{ nm}$ 之间应再提升一些,光谱会接近 AM1.5G 标准太阳光谱。

2.3 太阳模拟器光谱匹配标准

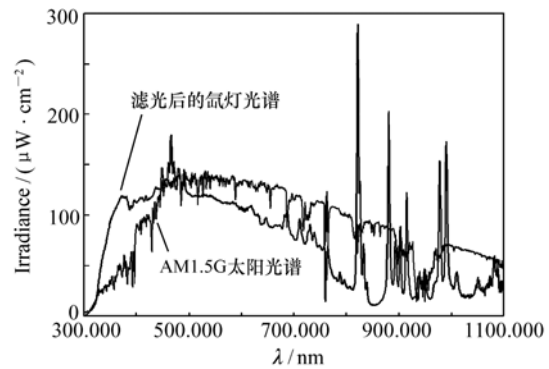


图 3 太阳光谱与加滤光片的氙灯光谱

Fig. 3 Solar spectrum and xenon-lamp spectrum with optical filter

表 2 给出了 ASTM E927-10 光谱匹配等级。表 3 给出了 ASTM E927-10 AM1.5G 光谱各波段标准积分值。

表 2 ASTM E927-10 等级标准

Tab. 2 ASTM class specifications

等级	光谱匹配 (各波段)	辐照不 均匀度/%	辐照不 稳定度/%
A 级	0.75 ~ 1.25	±2	±2
B 级	0.6 ~ 1.4	±5	±5
C 级	0.4 ~ 2.0	±10	±10

表 3 ASTM 3 种标准光谱的照度分布

Tab. 3 ASTM spectral irradiance for three standard spectra

波段/nm	AM1.5D	AM1.5G	AM0
300 ~ 400	no spec	no spec	8.0%
400 ~ 500	16.9%	18.4%	16.4%
500 ~ 600	19.7%	19.9%	16.3%
600 ~ 700	18.5%	18.4%	13.9%
700 ~ 800	15.2%	14.9%	11.2%
800 ~ 900	12.9%	12.5%	9.0%
900 ~ 1 100	16.8%	15.9%	13.1%
1 100 ~ 1 400	no spec	no spec	12.2%

太阳模拟器光谱匹配检测结果:实际光谱测试图如图 4 所示,对比结果见表 4。

由检测结果可知,最大偏差为 19.29%,太阳模拟器光谱匹配满足 A 级标准。

表 4 光谱测量结果对比
Tab.4 Contrast of spectrum test results

谱段/nm	积分值/ $(\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$	所占百分比/%	AM1.5G/%	相对偏差/%
300 ~ 400	-	-	no spec	-
400 ~ 500	18 693	20.18	18.4	9.68
500 ~ 600	17 852	19.27	19.9	-3.15
600 ~ 700	15 848	17.11	18.4	-7.01
700 ~ 800	11 618	12.54	14.9	-15.82
800 ~ 900	11 044	11.92	12.5	-4.61
900 ~ 1 100	17 568	18.97	15.9	19.29
400 ~ 1 100	93 623	-	no spec	-

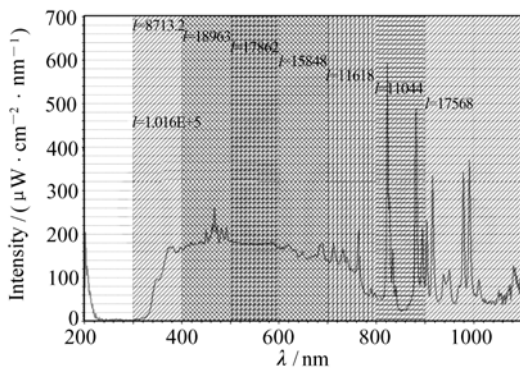


图 4 氙灯光谱测试图

Fig. 4 Xenon-lamp spectrum tested with optical filter

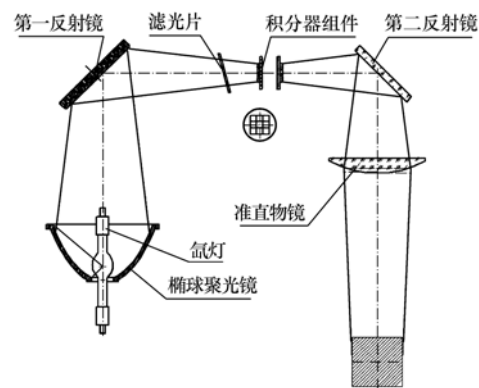


图 5 模拟器光学系统

Fig. 5 Optical system of solar simulator

3 太阳模拟器的设计

3.1 光学系统

光学系统如图 5 所示,太阳模拟器光学系统包括椭球聚光镜、氙灯、第一反射镜、滤光片、积分器组件、第二反射镜和准直物镜等。积分器采用 9 块正方形平凸透镜光胶在石英光胶板上,两组相反排列。

短弧氙灯阴极尖端位于椭球镜第一焦点,氙灯发出的光经聚光镜反射会以一定的放大倍率汇聚到椭球镜第二焦面上,形成一个较大范围的辐照分布。光学积分器场镜阵列位于椭球镜第二焦面上,将氙灯投射过来的辐照分布对称分割成 9 个小范围的辐照范围,再经光学积分器投影镜阵列中对应的元素透镜成像到无穷远,叠加成一个较为均匀的辐照分布,然后经准直物镜后以一定的准直角投影到准直物镜的后焦面上,形成一

个均匀的有效辐照面。第一反射镜和第二反射镜用来改变光路方向,使系统结构更为紧凑^[7-8]。

通过 LightTools6.0 照明仿真软件进行系统仿真,按照光学系统设计尺寸建模后,微调光学元器件的设计参数,如氙灯的离焦量、积分器的轴向位移等,每次改变参数后进行蒙特-卡洛光线追迹计

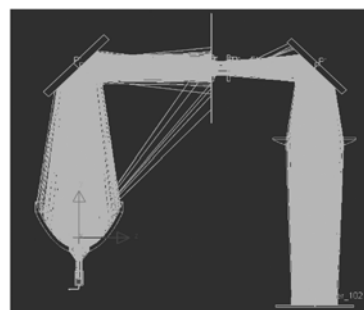


图 6 蒙特-卡洛光线追迹

Fig. 6 Monte Carlo ray-tracing

算,不断优化,从而得出系统最优的设计结果^[9]。系统的光线追迹如图6所示。

通过仿真达到有效辐照面上的能量与氙灯离焦量的关系如图7所示,在氙灯正向离焦0.3 mm时,有效辐照面上的能量达到最大值10.28 W。

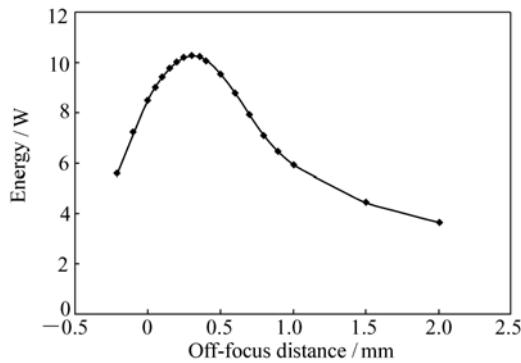


图7 系统能量和离焦量的关系

Fig. 7 Relation between system energy and off-focus distance

3.2 模拟器的结构

如图8所示,模拟器的整体结构采用铸铝件,分为底座,下箱体,上箱体,前箱体四部分,箱体采用铸件性能比较稳定,能够保证光学件的安装精度。箱体内壁喷黑色无反射涂层,减少杂散光。同时设计多个侧门,方便更换氙灯和滤光片。

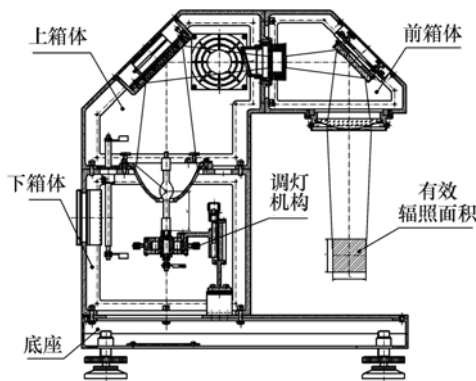


图8 系统结构布局

Fig. 8 Structural layout of system

系统整机高610 mm,有效辐照面积55 mm × 55 mm,位于准直镜下方200 mm处。调灯机构设计为三向调节,用来调节氙灯的中心位置和离焦量。

第一反射镜和第二反射镜均采用三紧三拉调整机构来对光束方向进行微调。最后太阳模拟器的调试,如图9所示。通过激光自准直法调整光轴,达到系统要求。



图9 太阳模拟器调试

Fig. 9 Debugging of solar simulation

4 太阳模拟器技术指标的测试

测量仪器使用的是以色列 OPHIR 公司的激光功率计,探头接收面积为 $\phi 9.5$ mm。在55 mm × 55 mm 的有效辐照面内平均分布25点进行测试,如图10所示。辐照不均匀度按下式计算^[10]:

$$E = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$$

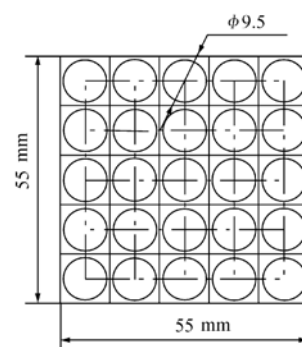


图10 辐照不均匀度的测试

Fig. 10 Test of the irradiance non-uniformity

式中: E 为辐照不均匀度; E_{\max} 为辐照面上(或体积内)的辐照度最大值; E_{\min} 为辐照面上(或体积内)的辐照度最小值。

同时在有效辐照面 ± 30 mm两处用同样的方法测试,辐照不均匀度分别为 $\pm 1.42\%$ 、 $\pm 1.35\%$ 、 $\pm 1.49\%$ 。由此可知,太阳模拟器的辐照不均匀度指标满足 ASTM E927-10 A级标准。

太阳模拟器的辐照不稳定性主要取决于氙灯供电电源的稳定性。模拟器氙灯采用高精度开关电源,电源本身的供电稳定性小于1%,外部采用电流负反馈方式对氙灯进行稳流,氙灯电源原理如图11所示。

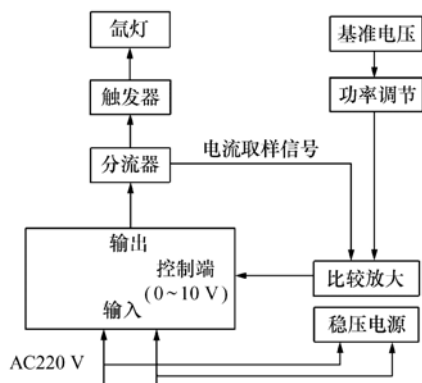


图11 氙灯电源原理框图

Fig. 11 Principle of xenon-lamp power supply

在有效辐照面的中心作为测试辐照不稳定度的位置,氙灯点燃后需要20 min才能达到稳定状态,为了更加精确,辐照不稳定性从点灯20 min后开始计算,测试曲线如图12所示。

参考文献:

- [1] ULMER S, REINALTER W, HELLER P. Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators[J]. *Sol. Energy Eng.*, 2002, 124: 182-188.
- [2] BRINKMAN P W. Main characteristics of the Large Space Simulator (LSS) at ESA/ESTEC[C]//NASA CP-2340, Proceedings of the 13th Space Simulation Conference, Oct. 8-11, 1984, Orlando, USA, 1984.
- [3] 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 SH, ZHANG Q Y, LIU SH, et al.. Lagrange invariant energy transfer of solar simulator[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 639-645. (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]. *ACAT Energiae Solaris Sinica*, 2006, 27(11): 1133-1136. (in Chinese)
- [5] 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.

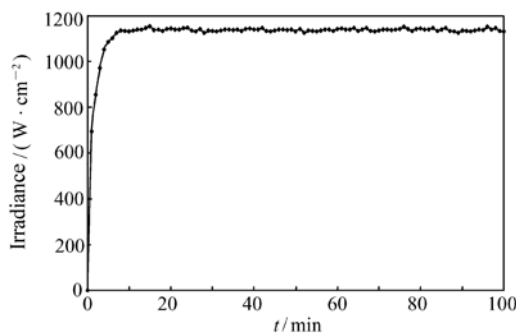


图12 辐照不稳定性测试曲线

Fig. 12 Test of the irradiance temporal instability

辐照不稳定性表征辐照度随时间的变化,由下式决定:

$$E/T = \pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% / T$$

式中: E/T 为时间 T 内的辐照不稳定性。

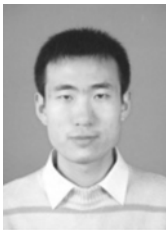
根据实验辐照不稳定性达到 $\pm 1.27\%$,满足 ASTM E927-10 A级标准。

5 结论

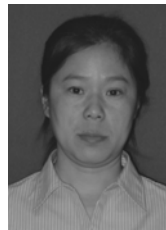
本文完成了一种 AAA 级太阳模拟器的设计、研制和实验工作。根据氙灯光谱与标准太阳光谱的比较,研制滤光片,使得光谱匹配误差在波长 400 ~ 1 100 nm 满足 ASTM E927-10 A 级要求。太阳模拟器在 55 mm × 55 mm 的有效辐照面内辐照度达到一个太阳常数,同时其辐照不均匀度、辐照不稳定性均满足 A 级要求,为光伏器件的电学性能测试提供了一个可靠的平台。

- 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 Appl.*, 2006, 26(5):333-335. (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]. *Opto-Electronic Eng.*, 2010, 37(2):50-53. (in Chinese)
- [7] 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 Eng.*, 2006, 33(9):32-35. (in Chinese)
- [8] 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)
- [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] 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,2006年于东北大学获得学士学位,2008年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,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,高级工程师,1987年于中央广播电视大学毕业,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,1982年于长春理工大学获得学士学位,1989年于长春理工大学获得硕士学位,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,研究实习员,2007年于华中科技大学获得学士学位,2010年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ggc-2003@163.com