

太阳模拟器的光谱设计实验研究

陈文志 蒋绿林 姜 黎 王 宏 周 其

(江苏工业学院机械与能源学院, 江苏 常州 213016)

摘要 通过对太阳模拟器的光谱测试研究发现:未采用滤光片的太阳模拟器中氙灯辐射的 800~900 nm, 900~1100 nm 红外波段占总光谱波段 400~1100 nm 的百分比远远大于国际标准规定的匹配度, 导致其相对光谱的能量分布不能满足 A 级或 B 级要求, 严重影响太阳电池的测试结果。因此, 该模拟器通过加入特别设计的滤光片对光谱加以矫正, 滤除或减弱部分红外波段的辐射能量, 使其能满足 A 级或 B 级光谱的要求, 再通过对滤光片的优化设计, 进而使得模拟光谱达到最佳均匀性。

关键词 光学设计; 太阳模拟器; 光谱; 匹配度; 太阳电池测试

中图分类号 TB133 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0222002

Experimental Research of Spectral Design of Solar Simulator

Chen Wenzhi Jiang Lulin Jiang Li Wang Hong Zhou Qi

(Mechanical and Energy College, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou, Jiangsu 213016, China)

Abstract The spectral test of solar simulator is carried out. The test result shows that the energy of the spectra from 800 to 900 nm and from 900 to 1100 nm which are radiated by the xenon lamp from solar simulator without laying optical filter occupies too much percentage of the whole spectra and is greater than that of the international standard code matching limit. Then it results in that the relatively spectral distribution of energy cannot fulfil the demand of A or B grade, which seriously affects the solar cell test result. So solar simulator needs to lay special designed optical filter to remedy the spectra, and the optical filter can filter or weaken energy of infrared band and fulfil the spectral demand of A or B grade. By optimal design of optical filter, we can make the spectrum to reach optimal uniformity.

Key words optical design; solar simulator; spectral; matching limit; solar cell test

OCIS codes 220.4840; 220.4830; 260.1960

1 引 言

太阳模拟器作为标定和检测太阳电池的一种设备^[1], 特别是脉冲式太阳模拟器受到广大太阳能电池厂家的青睐。在太阳能光伏市场快速发展的当代社会里, 从经济效益和节能上考虑选择脉冲式太阳模拟器可以说是最佳选择, 因此脉冲式太阳模拟器的市场需求也随之增加。随着各个电池厂家对电池测试准确度和国际标准规定的提出, 人们对太阳模拟器要求的提高, 特别要求在均匀性、稳定性及光谱匹配度方面等达到国际标准水平。

本文主要对氙灯为圆弧形的脉冲式太阳模拟器进行阐述。由于氙灯的色温约为 6000 K 最为接近

太阳光的色温, 因此一般是应用氙灯作为光源, 但是氙灯做为光源却存在不足, 经过荷兰爱万提斯公司制造的光谱仪测得脉冲氙灯和连续氙灯的光谱在红外波段的能量太强, 在紫外和可见光的能量太弱, 为此对氙灯的发光光谱进行矫正, 通过特定滤光片的设计使其发光光谱达到 A 级标准。

2 太阳模拟器的光谱设计方法

在很多关于太阳模拟器的技术资料中, 光谱辐照度分布的详细资料很少给出, 一般只是说明其为 AM0 或 AM1.5 的设备^[2]。但是在不同的光谱辐照度分布下, 太阳电池的输出电流值总是存在差

收稿日期: 2010-03-24; 收到修改稿日期: 2010-07-06

作者简介: 陈文志(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事太阳能方面的研究。E-mail: chenwenzhi12345@163.com

导师简介: 蒋绿林(1965—), 男, 博士, 副教授, 主要从事可再生能源方面的研究。E-mail: 5green@163.com

别,这可以很好的反映出太阳模拟器对于标准光谱辐照度的模拟精度。

脉冲式太阳能模拟器从氙灯设计结构上可分为多种:有上打光、下打光及侧打光^[3]。本文主要针对下打光太阳模拟器组件测试仪和上打光太阳模拟器单片电池测试仪进行光谱设计的,模拟器的氙灯功率 3000 W,形状为圆弧形,因此针对以上两种仪器分别采用椭圆形和正方形滤光片,滤光片由一家专业镀膜公司制作,可以根据各个波段实际情况适当滤除能量高的波段的一部分能量。本文主要解决两个问题:1)滤光片放置位置,2)滤光片的光谱性能研究。

滤光片的放置方法是将滤光片放置在氙灯正下方,在单片电池测试模拟器测试仪中氙灯距离滤光片约 6 cm,在组件模拟器测试仪中氙灯距离滤光片约 1.5 cm,由于不同的位置确定要求滤光片镀膜厚度不同,因此根据设备本身的结构问题^[4],确定这两个距离才可确定镀膜厚度,氙灯与滤光片平行放置。特别值得注意的是在氙灯四周遮挡情况的严格要求下,这距离可以说是较为合理的。滤光片的选择主要是根据光谱仪的测试结果和计算进行重复镀膜模拟选择,最后选择 3 种滤光片,这 3 种滤光片在镀膜厚度上稍微有些变化,表现为对相同红外波段的不同过滤效果^[5],这些滤光片经过参照相关资料和光谱仪测试确定的。固定好滤光片,就可以利用 AvaSpec-2048 型光谱仪,这时光谱仪需要外部触发,利用光纤在氙灯发光的过程中同时进行采集。

3 光谱设计的结果分析讨论

3.1 实验测得太阳光谱分布图

图 1 为国际标准光谱图。

由光谱仪测得的太阳光光谱与未加滤光片的氙

灯光谱如图 2 所示。

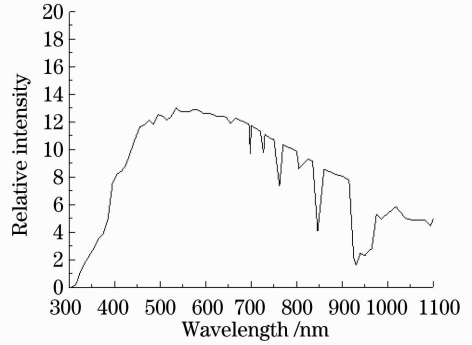


图 1 标准光谱图

Fig. 1 Standard spectrum

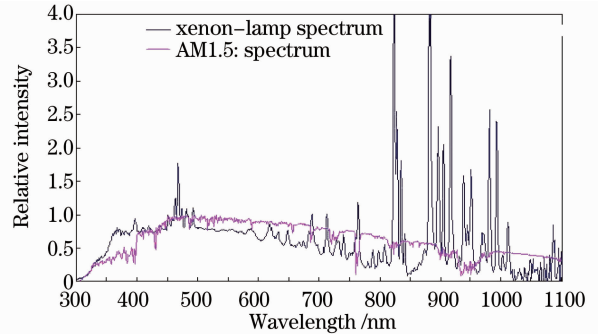


图 2 太阳光与未加滤光片的氙灯光谱

Fig. 2 Solar spectrum and xenon-lamp spectrum without optical filter

表 1 是国际标准光谱匹配度和实测太阳光谱各波段百分比,由此可以得出光谱仪的准确性,对于 A 级光谱匹配度必须在 75%~125%之间^[6],表 1 计算了偏离标准匹配度值的两个极值,用测得的太阳光谱百分比与标准值比较,计算得出在 800~900 nm 波段的偏差最大,其值为 -8.3%,由此可以得知所用光谱仪的测试结果是可信的,其次证明光谱标准值的可确定性。

表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

Wave band /nm	Max left bias (0.75) /%	Standard matching value /%	Max right bias(1.25) /%	Solar spectrum percentage /%
400~500	13.8	18.4	23.0	18.1
500~600	14.925	19.9	24.875	19.6
600~700	13.8	18.4	23.0	18.9
700~800	11.175	14.9	18.625	15.3
800~900	9.375	12.5	15.625	12.0
900~1100	11.925	15.9	19.875	16.1

3.2 实验用的镀膜滤光片

滤光片主要是通过通过在规格为 10 cm×10 cm×0.2 cm 的特制玻璃上利用离子电子枪镀膜^[7],玻璃

的选择必须是耐高温、折射率温度系数小^[8]。经过镀制多层膜,使得在波长约为 910 nm 的光被过滤掉约 80%,这样可以达到在 800~1100 nm 的光被

合理减弱的目的,而有些实验显示镀膜滤光片是在约 930 nm 透射比达到最低点,透射比为 30%^[9],如图 3 所示的滤光片透射率。

从图 3 研究发现滤光片在 400~750 nm 之间透射率都在 70% 以上,到了约 900 nm 达到最低点,只有约 15% 可以透过。

3.3 无滤光片的实验结果

表 1 显示的光谱百分比说明尽管氙灯的色温已经很接近太阳色温,但是在红外部分氙灯却表现太强^[10],这时就需要加以滤光片矫正。表 2 为氙灯发光光谱在各个波段的百分比及偏差值。

表 2 氙灯发光光谱百分比

Table 2 Percentage of xenon-lamp luminescent spectrum

Wave band /nm	400~500	500~600	600~700	700~800	800~900	900~1100
Spectrum percentage of xenon lamp /%	9.68	10.84	11.21	10.74	27.4	30.02
Standard bias value /%	-47.39	-45.52	-39.07	-27.92	119.2	88.8

表 2 中偏差值计算公式为:(氙灯光谱波段百分比减标准光谱对应波段百分比)/标准光谱对应波段百分比。

从表中数值可以看出在红外波段 800~900 nm 处的光强明显很强,其最大偏差值超过 100%,在 800~900 nm 处达到 119.2% 的偏差,明显不能符合 A 级标准值±25%。

3.4 加 3 种滤光片的不同实验结果

图 4 为未加滤光片和 3 种滤光片滤光后的光谱图,其中系列 1 为未加滤光片的测试结果,系列 2、系列 3 及系列 4 分别为镀膜滤光片 1、镀膜滤光片 2 及镀膜滤光片 3 的测试结果。

从光谱图中研究发现不同的滤光膜会产生不同的滤光效果,首先在要求的 800~1100 nm 内滤光片都进行一定的滤光,但是系列 2 在 700~800 nm 也进行滤光导致此波段过度滤光,使滤光结果偏小,系列 4 则在 800~1100 nm 范围内过度滤光,导致在此波段的光强减弱太大,不符合要求。而系列 3 其滤光效果明显变好,在 700~800 nm 波段的滤光程度较小,在 800~1100 nm 波段没有过度滤光,这达

表 3 加 3 种滤光片的光谱测试结果

Table 3 Spectral test results of three different optical filters

Wave band /nm	400~500	500~600	600~700	700~800	800~900	900~1100
Serials 2 spectrum percentage /%	16.7	23.0	18.3	10.1	13.5	18.4
Bias value /%	-9.3	15.6	-0.6	-32.3	8.0	15.7
Serials 3 spectrum percentage /%	17.0	20.1	18.2	14.2	13.2	17.3
Bias value /%	-7.6	1.0	-1.1	-4.7	5.6	8.8
Serials 4 spectrum percentage /%	19.4	24.0	19.6	16.2	9.0	11.9
Bias value /%	5.4	20.6	6.5	8.7	-28	-25.2

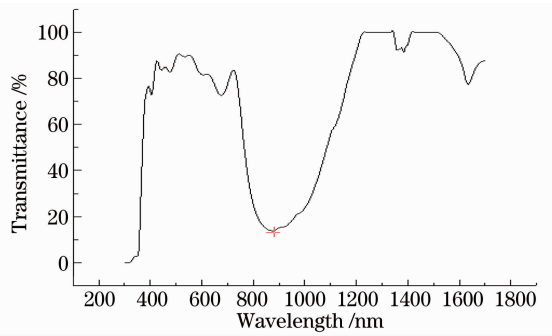


图 3 滤光片透射比

Fig. 3 Transmittance of optical filter

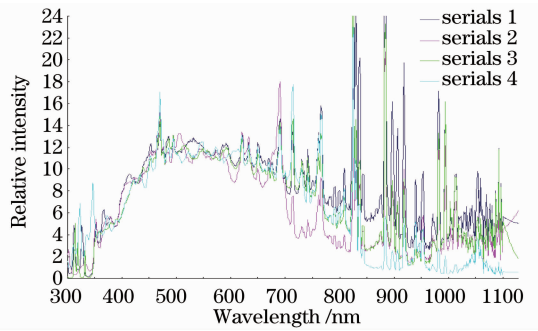


图 4 透过不同镀膜滤光片光谱

Fig. 4 Spectra of permeating different metallic-membrane plating optical filter

到实验和实际的要求。但是由于氙灯的造型为圆弧形,本身不是点光源,因此产生的光照到滤光片上并不是垂直照射的,这时候会产生一些区域范围内的光谱偏差,这就要求滤光片要进行组合,在氙灯的垂直面上的滤光片镀膜对 910 nm 红外波长过滤,在离氙灯的偏角越大的地方要求比 910 nm 偏短一些进行过滤,这样才能达到各点光谱相对均匀一些。

表 3 为光通过 3 种滤光片的光谱测试结果,从表格数据研究所测得的光滤过后的光谱偏差。

从以上数据研究发现系列 3 光谱与标准光谱偏差明显较小,最大偏差只有 8.8%,而系列 2 最大偏差为 32.3%,系列 4 最大偏差为 28%。

系列 3 滤光片情况下得到的 3 个不同点的光谱百分比数据如表 4 所示。

表 4 3 个不同点的光谱
Table 4 Spectra of three different points

Wave band /nm	400~500	500~600	600~700	700~800	800~900	900~1100
Point 1 spectrum percentage /%	16.9	19.8	17.6	14.9	13.5	18.3
Bias value /%	-7.2	-0.5	-4.4	0.0	8.0	15.1
Point 2 spectrum percentage /%	17.0	20.1	18.0	14.2	13.4	17.3
Bias value /%	-7.7	1.0	-2.2	-4.7	7.2	8.8
Point 3 spectrum percentage /%	16.8	20.0	18.1	14.8	13.2	18.1
Bias value /%	-7.7	0.5	-1.7	-0.7	5.6	13.8

从表中数据发现系列 3 滤光片 3 个不同点的光谱百分比最大偏差值为 15.1%

3.5 组合滤光片实验结果

图 5 为无滤光片和组合滤光片的光谱图。由于光谱需要在每一点的位置保持基本不变,而所用的氙灯并不是点光源而是圆弧型光源,因此正如以上所说的光照到滤光片上并不是垂直照射的,这时候会产生一些区域范围内的光谱偏差,这就要求滤光片要进行组合。表 5 是滤光片组合后 4 个不同点处的光谱百分比数据。

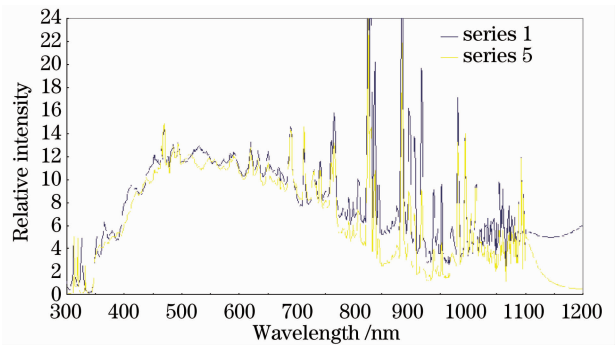


图 5 组合滤光片光谱

Fig. 5 Spectrum of combination optical filter

表 5 4 个不同点处的光谱

Table 5 Spectra of four different points

Wave band /nm	400~500	500~600	600~700	700~800	800~900	900~1100
Point 1 spectrum percentage /%	17.6	20.0	18.4	14.5	13.0	17.5
Bias value /%	-4.4	0.5	0.0	-2.7	4.0	10.0
Point 2 spectrum percentage /%	17.0	20.1	18.2	14.2	13.2	17.3
Bias value /%	-7.7	1.0	-1.1	-4.7	5.6	8.8
Point 3 spectrum percentage /%	17.5	20.2	18.5	14.1	12.9	17.8
Bias value /%	4.9	1.5	0.5	5.4	3.2	11.9
Point 4 spectrum percentage /%	17.1	20.0	18.3	14.6	13.2	17.8
Bias value /%	7.1	0.5	0.6	2.1	5.6	11.9

从表 5 数据研究表明在组合滤光片的情况下,各点的最大偏差为 11.9%,这已经很接近标准光谱的匹配度,而与在没有组合的情况下最好的滤光片的最大偏差 15.1%比较,可以发现在没有滤光片组合的情况下其光谱均匀性还是较差的,特别是在模拟器边缘的点明显偏差很大。

4 光谱对太阳电性能测试的影响分析

光谱对太阳电池的影响很大,主要是对电流的影响,会导致对填充因子有很大影响,填充因子是最大功率与开路电压和短路电流之积的比值。电池本身对于不同光谱波段有不同的响应,这也是光谱对

太阳电池测试影响的最重要原因^[11]。图 6~9 的测试结果表明不同光谱对相同的电池片的不同影响。

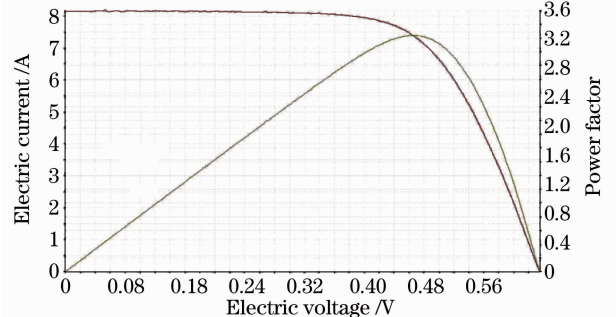


图 6 未加滤光片的测试结果

Fig. 6 Test result without optical filter

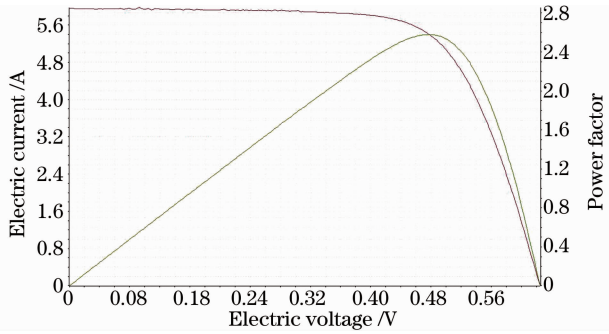


图 7 滤光片系列 2 的测试结果

Fig. 7 Test result of optical filter series 2

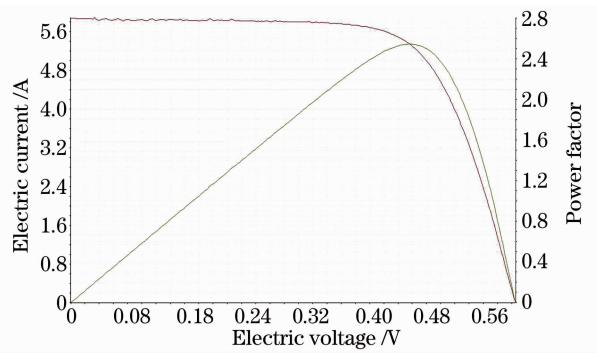


图 9 滤光片系列 4 的测试结果

Fig. 9 Test result of optical filter series 4

表 6 是测试同一电池片相同光强下不同滤光片所获得的数据。

表 6 中 I_{sc} 为短路电流, V_{oc} 为开路电压, I_m 为最大工作电流, V_m 为最大工作电压, F_F 为填充因子, R_{sh} 为并联电阻, R_s 为串联电阻。从表 6 数据研究发现, 没有加滤光片时其光谱产生的填充因子最小, 在不同滤光片下测得的填充因子各不相同。根据电池原理由于薄膜电池对光照各个不同波段的影响较大, 由测试所得到的结果非常符合理论分析, 这说明光谱的重要性是不可忽略的。

表 6 4 种不同光谱相同电池的测试结果

Table 6 Same cell test results of four different spectra

Parameter	I_{sc}/A	V_{oc}/V	I_m/A	V_m/V	F_F	R_{sh}/Ω	R_s/Ω
Without optical filter	5.11	0.614	4.49	0.465	0.665	20.14	0.0179
Optical filter series 2	5.95	0.624	5.39	0.477	0.692	12.26	0.0160
Optical filter series 3	5.99	0.624	5.44	0.476	0.690	2.168	0.0179
Optical filter series 4	5.87	0.624	5.34	0.476	0.693	2.178	0.0183

5 不同氙灯的光谱设计讨论

对不同氙灯和不同的滤光结构应有不同的设计方法, 本文主要针对圆弧形的氙灯进行设计。由于圆弧型的结构发出的光也是圆弧形的, 这样滤光片的镀膜设计要在不同位置对应不同镀膜圆环。对距离氙灯最近的垂直位置镀膜正好过滤掉 910 nm 波长, 距离氙灯较远的滤光片镀膜对比 910 nm 短一些的波长进行过滤, 这样的设计结果理论上是最符合实际要求的, 但是镀膜上要求技术较高, 很难做到, 一般可以利用滤光片组合法达到所要求的结果。按照以上分析对于圆弧形结构的氙灯应该在灯的正下方放置镀膜较厚的膜系, 在远离灯管的地方放置较薄的膜系, 这样产生的光谱较为均匀。

如图 10 所示, 对于椭圆形的氙灯, 应该根据椭圆的结构中间放置镀膜过滤 910 nm 的滤光片, 两

边放置镀膜过滤比 910 nm 波长短一些的滤光片, 这有利于光谱均匀。按照以上分析, 一般要在灯管正下方放置镀膜过滤 910 nm 的滤光片, 偏离灯管的地方放置镀膜过滤比 910 nm 波长短一些的滤光片。

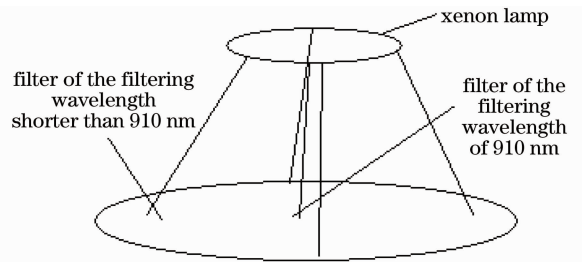


图 10 结构图

Fig. 10 Constructional drawing

6 结 论

对太阳模拟器的光谱进行了测试研究, 实验结

果表明在组合滤光片的情况下,各点光谱的最大偏差值为 11.9%,与在没有组合的情况下最好的滤光片的最大偏差值 15.1%相比,可以说明该组合滤光片是优越的。对于相同光照强度下,在不同的光谱百分比情况下对同一太阳能电池测试结果表明,测得的电池短路电流受到的影响较大偏差约 1A,特别是对薄膜电池测试结果影响更大。填充因子也发生变化,标准光谱下测得填充因子为 0.690,而非标准光谱下测得填充因子为 0.665,这说明 A 级光谱的重要性。确定氙灯与滤光片的相对位置后,再确定垂直照射下的滤光片。由于光谱与氙灯和滤光片的距离及其镀膜情况有关,因此放置在离氙灯较远的镀膜滤光片应对比 910 nm 短的波长进行过滤,这样利于实现光谱的均匀性。

参 考 文 献

- 1 Zhang Linhua, Wang Yuan. Experimental study on the selection of light sources for full spectrum solar simulators[J]. *Shandong Jianzhu University Transaction*, 2007, **12**(6): 531~536
张林华,王元. 全光谱太阳模拟器光源选择的实验研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2007, **12**(6): 531~536
- 2 Lang Yongzhi, Yu Peinuo, Zhong Jigong *et al.*. Spectral irradiance distribution of a typical chinese solar simulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, **6**(3): 26~29
郎永志,于培诺,仲跻功等. 太阳模拟器的光谱辐照度分布[J]. *光学精密工程*, 1995, **6**(3): 26~29
- 3 Peng Xiaojing. Study on Radiate Spectrum of Solar Simulator [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008
彭小静. 太阳模拟器的辐射光谱研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008
- 4 Ling Mushou. Deviding light determination and electric measure of solar radiate[J]. *China Periodical.*, 1979, **9**(4): 40~44
铃木守. 太阳辐射的分光测定和电测量[J]. *中国期刊*, 1979, **9**(4): 40~44
- 5 Xia Yuemei. Experiment and standard analysis of solar radiate [J]. *Aeronautic Standandization & Quality*, 2001, **5**: 33~36
夏越美. 太阳辐射试验及其标准分析[J]. *航空标准化与质量*, 2001, **5**: 33~36
- 6 Li Shensheng. Spectrum distribution of solar radiate and sun constant[J]. *Solar Energy*, 2003, **4**: 5
李申生. 太阳常数与太阳辐射的光谱分布[J]. *太阳能*, 2003, **4**: 5
- 7 Zhang Dawei, Sun Haojie. Investigation of laser induce damage threshold of HfO2 films prepared with oxygen ion beam assisted deposition[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(5): 333~335
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
- 8 Bai Shengyuan, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Optical stability of thin film filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(5): 576~580
白胜元,顾培夫,刘旭等. 薄膜滤光片的光学稳定性研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(5): 576~580
- 9 Meng Jiayi, Fu Xiuhua, Wang Di. Fabrication of spectral correction filter in solar simulator [J]. *Photoelectricity Engineering*, 2010, **37**(2): 50~53
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
- 10 Liu Hongbo. Solar simulation technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(2): 177~182
刘洪波. 太阳模拟技术[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(2): 177~182
- 11 Wang Bingzhong. The attenuation of the solar radiation in ideal atmosphere [J]. *Acta Energiae Solaries Sinica*, 1982, **10**: 374~387
王炳忠. 太阳辐射在理想大气中的衰减[J]. *太阳能学报*, 1982, **10**: 374~387