

# 高精度星模拟器目标标准源设计

孙向阳<sup>1,3</sup> 张国玉<sup>1,2</sup> 段 洁<sup>1</sup> 孙高飞<sup>1</sup> 高 越<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; <sup>2</sup> 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022

<sup>3</sup> 长春大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 为满足高精度光学导航传感器地面标定要求, 针对传统标定用目标标准源技术特点, 给出了一种基于有机电致发光器件(OLED)光源与光纤光导技术相结合的高精度目标标准源设计方法。分析设计方案并给出了目标标准源的整体结构; 同时为提高 OLED 与光纤耦合效率, 详细设计了标准目标源的光纤光源耦合机构以及光纤入/出射板的结构; 为满足 5~10 等星的精确控制, 对光耦合机构的自聚焦透镜和星等输出模拟系统中的滤光片进行了详细设计, 并对自聚焦透镜进行了参数优化。对目标标准源的主要参数-星等和星点间距精度进行的理论分析和实际测试表明所设计目标标准源达到了高精度星敏传感器标定需要。

**关键词** 光学器件; 星敏传感器; 目标靶; 光纤; 星等

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0523001

## Design of Star Charts Simulator for High-Precision Star Simulator

Sun Xiangyang<sup>1,3</sup> Zhang Guoyu<sup>1,2</sup> Duan Jie<sup>1</sup> Sun Gaofei<sup>1</sup> Gao Yue<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-Electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup> Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>3</sup> Electronics and Information Engineering School, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In order to meet the demands of calibration on the ground for optical navigation sensor with high precision, a method is given to design precise star charts simulator based on the characteristics of conventional technique by combined the OLED light source with fiber-optic light guide technology. The general structure of star charts simulator is presented after the analysis of its design. The coupling efficiency between the OLED and fiber is improved by a rebuilding of the coupling structure between the optical fiber and the light source as well as the fiber holding plate. By optimizing the design of the self-focusing lens in coupling system and the detail design of filters in stellar magnitude simulation system, a precise control is achieved to 5~10 for the stars positional accuracy. It is found that the design for star charts simulator approaches the requirement for the calibration of precise optical navigation star sensor through the theoretical analysis and the measurements for the magnitude and the stars positional accuracy.

**Key words** optical devices; star sensor; target; optical fiber; stellar magnitude

**OCIS codes** 230.6080; 120.4640; 120.4800; 120.4820; 130.3120

## 1 引 言

随着深空探测项目的开展, 用于近地探测敏感器标定的常规星模拟器已无法满足深空探测星敏传感器的地面标定与检测要求, 从已有的相关资料了解

到, 当前国内还没有研制出具有性能指标(星间角距精度不大于 1", 星等不小于 10 等星)的高精度星模拟器。星模拟器由目标标准源与准直光学系统两部分组成, 其中目标标准源是专为所标定敏感器提供

**收稿日期**: 2011-11-09; **收到修改稿日期**: 2011-12-05

**作者简介**: 孙向阳(1978—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事航天器地面模拟技术与光电检测技术等方面的研究。

E-mail: xys0321@126.com

**导师简介**: 张国玉(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测与航天器模拟设备等方面的研究。

E-mail: zh\_guoyu@yahoo.com.cn

标准星图的设备。现有的目标源设计多采用液晶显示屏(LCD)背光板配合固定星点板和液晶光阀控制背光板两种星图模拟方法,而对于需具有捕捉更高星等和高精度星间角距性能的深空导航敏感器来说,以上两种方法在提供高精度标定参数方面均存在缺点。例如,采用固定星图板模拟时,不同星图需更换靶标;采用液晶光阀控制时,较低亮度的稳定性受动态噪声影响较大,从而使高星等的精确模拟无法实现,同时矩形像素点也不能满足亚像素标定精度时的星点圆度要求<sup>[1~3]</sup>。因此针对某星敏感器的标定要求,本文设计了一种可实现高星等、高星点间距精度及单星实时控制等指标的高精度目标标准源。

## 2 目标标准源的构成与工作原理

### 2.1 目标标准源主要技术指标

根据高精度星敏感器的标定要求,所设计的目标标准源主要技术指标如表 1 所示。

表 1 目标标准源的技术指标

Table 1 Design index of star charts simulator

| No. | Parameters                      | Performance index      |
|-----|---------------------------------|------------------------|
| 1   | Effective size of target        | 100 mm×100 mm          |
| 2   | Spectrum                        | 500~800 nm             |
| 3   | Stars positional accuracy       | $\leq 1 \mu\text{m}$   |
| 4   | Stat magnitude                  | 5~10                   |
| 5   | No-uniformity of star luminance | 2%                     |
| 6   | Roundness of star               | $\leq 0.2 \mu\text{m}$ |

### 2.2 目标标准源的设计方案与工作原理

为消除传统目标源的技术缺点,采用有机电致发光器件(OLED)面阵光源与光纤传光束耦合机构配合高精度星点靶的方法来进行星图模拟。采用光纤是考虑其发光端面为圆形,易于提高质心法计算星点位置的精度;采用 OLED 是因其具有单个像素点亮度可控,且相对于 LCD 背光板具有更高的对比度和光照均匀性,使得高星等模拟成为可能。所设计的目标标准源由可变星等目标模拟器照明系统和高精度靶标两部分构成,如图 1 所示。

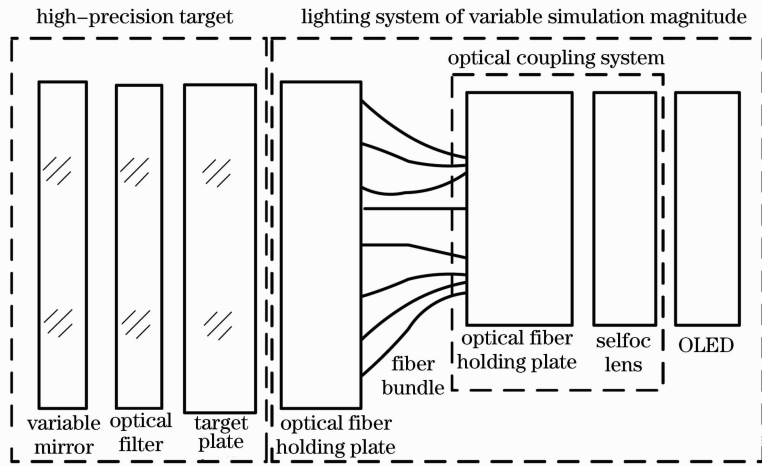


图 1 目标标准源组成

Fig. 1 Composition of star charts simulator

由精微可控电源控制 OLED 已定位置像素点发光,出射光进入由自聚焦透镜组与光纤入/出射板组成的光耦合系统后投射于星模拟器光学准直系统焦平面处的星图靶标上,由其上若干透光微孔模拟出特定星图。每个单独星点的亮度由每一路耦合光束来控制,因此形成静态可变星等目标标准源。

确保耦合光路的稳定性,耦合机构与 OLED 光源固定到同一金属支架内;为避免光纤更换时损坏光纤,光纤入射板与出射板用螺栓锁紧;同时为保证光纤出射板端面与靶标星点位置相对应,靶标与光纤出射板置于同一套筒内,与光学衰减片、滤光片安装于组装镜筒中;目标标准源配有准直光学系统接口,组装后为标定提供高精度星图<sup>[4~6]</sup>。

## 3 目标标准源光机结构设计

### 3.1 目标标准源结构设计

目标标准源整体结构如图 2 所示,由高精度靶标组装镜筒、光耦合结构及 OLED 光源等构成。为

#### 3.1.1 光耦合系统结构设计

从准直性与发光面积考虑,所采用的 OLED 光源与常用光纤耦合光源(例如激光器)差异较大,无法实现直接光线耦合,故需设计光耦合机构来提高

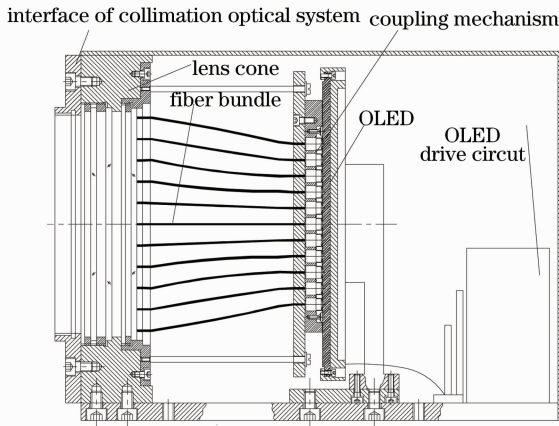


图 2 目标标准源总体结构

Fig. 2 Overall structure of star charts simulator

耦合效率。如图 3 所示,光耦合机构采用自聚焦透镜阵列结构,每一透镜接收 OLED 固定区域的光照后与对应光纤耦合,构成光纤与光源耦合系统<sup>[7~9]</sup>,图 4 为两路耦合结构图。

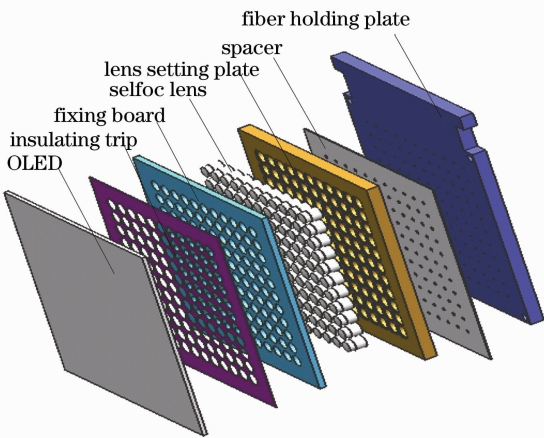


图 3 光耦合系统组成

Fig. 3 Optical coupling system

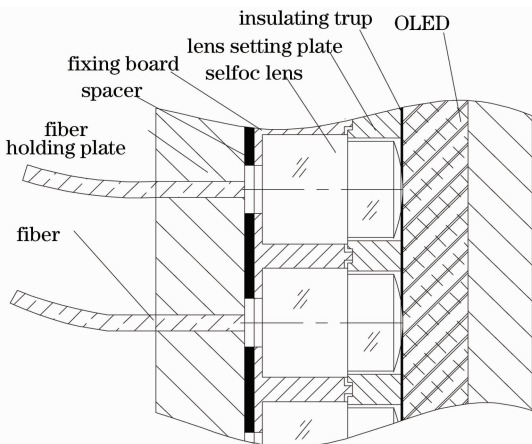


图 4 光耦合系统结构图

Fig. 4 Structure of optical coupling system

将加工有圆孔阵列(与自聚焦透镜组配对)的绝缘片贴于 OLED 光源面上的,以分割整个发光面,单个发光圆孔将作为对应自聚焦透镜的光源;针对透镜组中透镜尺寸小、数目多的特点,采用加工有通孔阵列的压板以取代单独压圈对透镜组进行轴向固定;考虑透镜的加工误差,透镜与光纤入射板之间配有耦合距调整片,研磨其厚度可修正耦合率,保证会聚光斑严格覆盖光纤纤芯端面,以满足星点不均匀性的要求;为保证光耦合机构的装配精度以及透镜光轴与耦合光纤端面的垂直度,用销钉将各组成零件定位锁紧后,再依次加工完成透镜组压板、耦合距调整垫和光纤入射板的通孔阵列;光纤与光纤入/出射板胶粘后,表面再进行精密研磨<sup>[10]</sup>。

### 3.1.2 高精度目标靶与光纤入/出射板设计

所设计目标标准源的星点间距精度由目标靶与光纤入/出射板的加工精度来保证。靶标以透光率高、线膨胀系数小的石英玻璃作为基底,一侧镀金属膜,另一侧镀减反膜,采用激光直写光刻技术,按一定坐标位置加工有 121 个圆形通孔,无金属遮光膜的圆点代表星点,黑色不透光区域代表实际星空,配合每条光纤所导光束,将实现星空星点位置和照度的模拟。目标靶有效直径  $D$  可由准直光学系统焦距  $f$  和使用视场  $a \times a$  所确定的像面大小决定:

$$D = 2ftan(a/2). \quad (1)$$

而与面阵光源和靶标配合使用的光纤入/出射板采用膨胀系数较小的钛合金材料。参考光纤直径大小以及 OLED 光源有效尺寸与靶标尺寸的坐标转换比例,分别在光纤入/出射板上加工圆孔,孔内插入光纤以胶粘方式进行固定,然后对其表面进行精密研磨抛光,其结构如图 5 所示<sup>[11,12]</sup>。



图 5 光纤入射板/出射板实物图

Fig. 5 Holding plate of optical fiber

### 3.2 标准目标源光学系统设计

标准目标源的光学系统包括光束耦合系统和星点输出模拟系统两部分,其作用就是将光源耦合进入光纤并输出到靶标,并经滤光和衰减后从星模拟器准直光学系统射出,其原理如图 6 所示<sup>[13,14]</sup>。

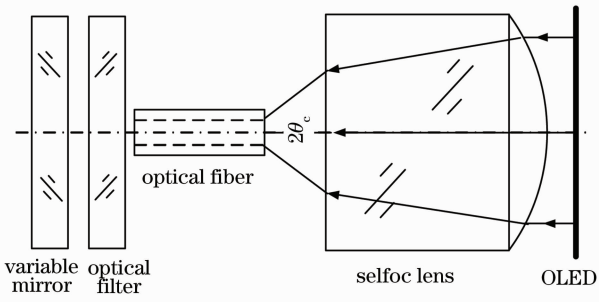


图 6 光源与光纤耦合原理图

Fig. 6 Coupling principle of area light sources and fiber

### 3.2.1 光源与光纤耦合系统设计

#### 3.2.1.1 光源与光纤的选择

设计采用的 OLED 为自发光材料,内置电子电路系统,每个像素点都由对应的电路独立驱动。作为面光源其发光效率较高、均匀性好,满足所设计目标源设计要求。规格有由星图的对比度、发光亮度和星图尺寸来确定。

已知每一星等间的亮度差为 2.51 倍,实现 5~10 等星模拟时所选目标源的对比度  $M$  应满足

$$M = \frac{E_5}{E_{10}} = \frac{E_0}{(2.51)^5} / \frac{E_0}{(2.51)^{10}} = (2.512)^5 \approx 100. \quad (2)$$

根据 0 等星的辐射通量  $6.87 \times 10^{-13} \text{ W/cm}^2$ ,可以计算出 5 等星辐射通量为  $6.87 \times 10^{-15} \text{ W/cm}^2$ ,即面阵 OLED 为每组耦合系统提供的辐射通量在各种衰减因素影响后应大于此值。

由于要求星图具有 100 个星点,其单星尺寸在  $60 \sim 100 \mu\text{m}$  之间,若 1 根光纤对应于 1 个星点,则根据所计算的有效靶标尺寸和光纤间隔,就能确定 OLED 面型尺寸。

#### 3.2.1.2 光源与光纤的选择

在光纤的实际使用中,光纤与光束的高效耦合是需解决的主要问题,效率决定于发光面积和光纤纤芯面积的匹配以及光源发散角和光纤数值孔径角的匹配。光束在光纤中传输的全反射条件为

$$\begin{cases} D_{\text{light}} < D_{\text{core}} \\ \theta_{\text{light}} < 2\arcsin NA \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $D_{\text{light}}$  和  $D_{\text{core}}$  分别为光斑直径和纤芯直径, $\theta_{\text{light}}$  为光束发散全角。

根据指标要求选择光纤参数:纤芯直径  $\Phi 60 \mu\text{m}$ ,数值孔径 NA 为 0.6 的多模光纤,其孔径角  $2\theta_c$  约为  $62^\circ$ 。

#### 3.2.1.3 自聚焦透镜设计与优化

通常在耦合系统中利用端面球透镜、柱透镜或圆锥形透镜来提高耦合效率,但需应用高精度的光纤端面加工技术其难度较大<sup>[15,16]</sup>。本文采用凸透镜偶合法,选择具有体积小、易加工组装、易调整对准以及耦合效率高等优点的自聚焦透镜代替先准直再汇聚的透镜组合。所设计自聚焦透镜结构如图 7 所示,其参数由表 2 给出。

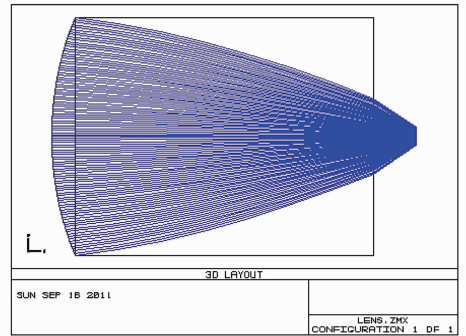


图 7 自聚焦透镜设计结果

Fig.7 Design of selfoc lens

表 2 自聚焦透镜设计参数

Table 2 Design parameters of selfoc lens

| Surface type  | Radius    | Thickness | Glass    | Semi-diameter |          |
|---------------|-----------|-----------|----------|---------------|----------|
| Object        | Standard  | Infinity  | Infinity |               | 0.000000 |
| Aperture stop | Gradient6 | 8.000000  | 8.000000 | ARS10         | 3.000000 |
| 2             | Standard  | Infinity  | 1.076529 |               | 0.959963 |
| Imaging plane | Standard  | Infinity  |          |               | 0.000000 |

为使自聚焦透镜对光束会聚能力增强,以缩短透镜与光纤耦合距离,提高耦合效率,同时最大程度的消除传统自聚焦透镜平端面的反射光对光源的干扰,对透镜进行了优化设计,将传统的光束入射端的平面结构设计为具有合理弧度的凸透镜面,优化后的半径值(Radius)为 8.000000 mm。

#### 3.2.2 星点输出模拟系统设计

模拟器要求光谱范围为  $500 \sim 800 \text{ nm}$ ,采用光学滤光片对光源的光谱特性进行修正。由于敏感器的接收器为 CCD,一般其截止波段到  $1200 \text{ nm}$ ,因此,滤光片按  $500 \text{ nm}$  以下波段截止和  $800 \sim 1200 \text{ nm}$  波段截止、中心波长为  $650 \text{ nm}$  设计,即可实现  $500 \sim$



800 nm通光谱辐照,设计的滤光片透射率曲线如图 8 所示。

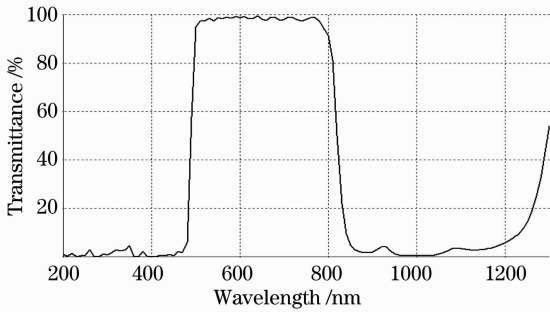


图 8 滤光片设计结果

Fig. 8 Design result of filter

考虑到 5~10 等星的亮度很低,同时 OLED 发光稳定性在常态显示亮度时更好,故可在较高亮度输出端装配光学衰减片以衰减星点能量来实现 5~10 等星的亮度精确控制,而衰减片也可根据实际应用进行更换。

## 4 精度分析与测试结果

对于所设计的高精度标准目标源来说,所模拟的星等精度和星点间距位置精度是关键技术指标,决定着标准目标源对星敏感器的标定水平,而其设计难点在于对光纤光斑亮度的精度控制。

### 4.1 星等亮度分析与测试

从设计原理可知,耦合效率是本文所设计耦合机构的重要指标,其影响因素包括光纤入射板与自聚焦透镜组机械对准的纵向精度、横向间距误差以及光纤端面倾斜误差<sup>[17]</sup>。通过光耦合机构的整体配合加工,耦合距调整片研磨及入/出射板的抛光打磨,其耦合效率(包括光纤端面反射 5%,光纤损耗 5%)可以控制在 65%以上。目标标准源的光辐射量损失(不含衰减片衰减率)为

$$E = \eta_1 \eta_2 \eta_3 = 80\% \times 65\% \times 90\% \approx 47\%, \quad (4)$$

式中  $\eta_1$  为光源效率; $\eta_2$  为光束耦合效率; $\eta_3$  为其他损耗后效率。

每个星点亮度的控制则需测试出靶标上星点的实际亮度及对应 OLED 发光位置驱动电流值,建立星等与电流的实际函数关系,通过控制软件实现星点亮度的精确控制。采用 BM-5A 型亮度计(亮度为 0.001~1200000 cd/m<sup>2</sup>,精度±4%)对靶标星图进行实际测试,图 9 给出一组输入星等理论亮度与对应输出实测星点亮度比较结果。

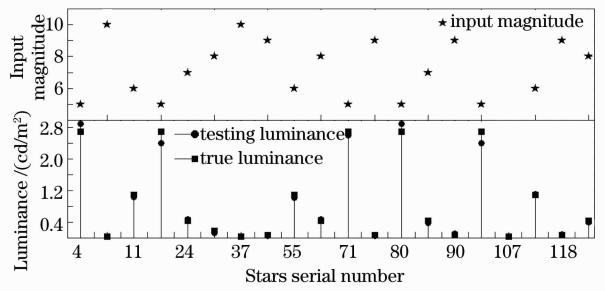


图 9 星等测试结果

Fig. 9 Test results of stellar magnitude

### 4.2 星点间距精度分析与测试

星点间距精度  $\Delta s$  指目标标准源的靶标星图中任意两星点间的直线位移误差,星模拟器标定敏感器参数时换算为星间角距精度给出,小视场大焦距光学系统中由  $\Delta s$  所引起的星间角距误差为

$$\sigma = \arctan(\Delta s / f), \quad (5)$$

式中  $\Delta s$  为目标标准源的星点间距精度, $f$  为星模拟器准直光学系统的焦距。

若要满足高精度导航敏感器星间角距精度的标定要求,就需严格控制并合理分配星模拟器准直光学系统误差和目标标准源的设计精度。考虑到用于靶标星图制备的激光直写设备 200 mm 行程内  $x$  轴、 $y$  轴直线度不大于 0.15  $\mu\text{m}$ ,故控制靶标面板的星点间距精度  $\Delta s \leq 1 \mu\text{m}$ 。采用精密显微镜对所设计靶标进行实测,考虑到标定环境极限温度下的靶标变形量对星点间距精度影响很小,故图 10 只给出常温下靶标星图中各点对中心星点位置精度。

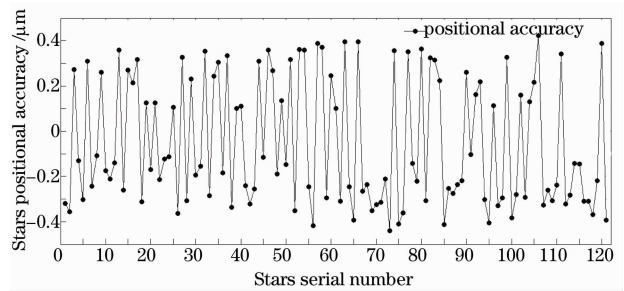


图 10 各点相对中心星点的星点间距精度

Fig. 10 Test results of angular accuracy to center star

以实际设计为例,当光学导航敏感器的星间角距标定精度不大于 1",星模拟器准直光学系统焦距  $f=5000 \text{ mm}$  时,参考图 10 测试结果,由(5)式可知,设计的目标标准源可保证星点间距精度  $\sigma \leq 0.14''$ 。

## 5 结 论

本文设计出由可变星等目标模拟器照明系统和

高精度靶标组成的高精度目标标准源,与已有相关设备相比其具有星点大小标准、均匀性高、星等可变等优点。根据标定指标要求,分别对其光纤光源耦合机构、光纤入/出射板、靶标等光机结构进行了详细设计。经理论分析与实际测试,所设计的目标标准源既可保证星敏传感器标定所需星点的圆度、不均匀度指标,也实现了星点间距精度不大于  $1\ \mu\text{m}$ ,  $5\sim 10$  等星的模拟,满足高精度敏感器的标定要求。

## 参 考 文 献

- Zhang Hongpo, Huang Li. Research of a point target simulator [J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(6): 74~76  
张红坡, 黄莉. 点源目标模拟器研制[J]. *光学仪器*, 2008, **30**(6): 74~76
- Liu Yaping, Li Juan, Zhang Hong. Design and calibration of star simulator [J]. *Infrared & Laser Engng.*, 2006, **35**(z1): 331~334  
刘亚平, 李娟, 张宏. 星模拟器的设计与标定[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(z1): 331~334
- Zhao Chenguang, Tan Jiubin, Liu Jian *et al.*. Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(6): 1326~1332  
赵晨光, 谭久彬, 刘俭等. 用于天文导航设备检测的星模拟装置[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(6): 1326~1332
- Miao Jianyu, Zhang Liping, Wu Qingwen *et al.*. Design, manufacturing and assembly for optical lens of mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1648~1653  
苗健宇, 张立平, 吴清文等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1648~1653
- Zhang Qunyan, Zhou Zhen, Feng Lishuang *et al.*. Research on optical structure of the novel micron-grating accelerometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1796~1799  
张群雁, 周震, 冯丽爽等. 新型微米光栅加速度计光学结构研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1796~1799
- Xie Na, Zhou Hai, Zhang Junwei *et al.*. Stability of optical elements in large laser facilities [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(10): 2411~2417  
谢娜, 周海, 张军伟等. 大型激光装置光学元件的稳定性设计[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(10): 2411~2417
- Li Hui, Liu Kan, Zhang Xinyu *et al.*.  $128 \times 128$  elements frequency driven liquid crystal lens array with tunable focal length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 218~223  
李晖, 刘侃, 张新宇等.  $128 \times 128$  元频率驱动变焦液晶透镜阵列[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 218~223
- Tian Wei, Wang Rudong, Wang Ping *et al.*. Key structural parameters of 300 mm aperture reference flat mirror[J]. *Chin. Opt.*, 2011, **4**(3): 264~270  
田伟, 王汝冬, 王平等. 300 mm 平面标准镜装卡结构的关键参数[J]. *中国光学*, 2011, **4**(3): 264~270
- Tang Caijie, Jiang Yi. High-finesse micro-lens optical fiber Fabry-Pérot interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1062~1065  
唐才杰, 江毅. 高精细度微透镜光纤法布里-珀罗干涉仪[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1062~1065
- Jia Wenwu, Wang Yuefeng, Huang Feng *et al.*. Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **28**(2): 0202008  
贾文武, 汪岳峰, 黄峰等. 复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J]. *中国激光*, 2011, **28**(2): 0202008
- Liu Hongliang, Yang Minghong, Dai Jixiang *et al.*. Research on characteristic of fiber optic hydrogen sensor based on palladium and its composite films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3398~3402  
刘宏亮, 杨明红, 代吉祥等. 基于钯及其复合膜的光纤氢气传感器特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3398~3402
- Wang Daihua, Liu Shuxin, Yuan Gang *et al.*. Study on parallel multiplexed Fabry-Pérot fiber optic accelerometers and the signal demodulation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1776~1782  
王代华, 刘书信, 袁刚等. 并联复用光纤法-珀加速度传感器及解调方法的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1776~1782
- Chen Yuan, Zhang Wenming. Tunable color temperature light source for star simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **27**(8): 50~53  
陈源, 张文明. 面向星模拟器的可调标准色温光源[J]. *光电工程*, 2010, **27**(8): 50~53
- Hu Yi, Gong Yan. Preliminary research on color simulation of stars in a star simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(8): 65~73  
胡宜, 巩岩. 星模拟器星光颜色模拟的初步研究[J]. *光电工程*, 2010, **37**(8): 65~73
- Yang Chun, Xia Zhichao. Propagation constant solution for large core and high numerical aperture step-index multimode optical fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 957~960  
杨春, 夏志超. 大芯径大数值孔径阶跃光纤传导模特征方程求解[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 957~960
- Gao Yingjun, Yao Shengli, Gao Feng. Optimized coupling of gradient index rod lenses with single mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(2): 176~179  
高应俊, 姚胜利, 高凤. 用自聚焦透镜作平行光束与单模光纤的最佳耦合[J]. *光子学报*, 1999, **28**(2): 176~179
- He Xun, Xiang Yang. Study on contrast transfer function of fiber-optic image bundles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706006  
何煦, 向阳. 线列光纤传像束对比度传递函数研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706006

栏目编辑: 何卓铭