文章编号 2095-1531(2018)04-0582-08

复合式无遮拦激光扩束器的设计

卢政伟[1,2],邵 帅[1*],马亚坤[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为满足大功率激光发射的要求,提出研制一种基于卡塞格林系统的大口径激光发射的复合式无遮拦激光扩束器,消除卡塞格林系统中心遮拦,提高激光发射效率。依据卡塞格林系统原理及其结构特征,结合伽利略折射式扩束器的特点,设计一种发射口径为 550 mm 的复合式无遮拦激光扩束器,采用反射式扩束器和折射式扩束器结合的方式,在卡塞格林次镜中心开通孔,使中心被遮拦激光透过。后接伽利略式折射扩束器,对中心透过光束进行扩束,两光束共轴发射。对设计的新型复合扩束器进行激光透过率实验,实验结果表明,对于波长 10.6 μm 激光,透过率大于 95.21%,比传统卡塞格林扩束器提高 22.12%。

关 键 词:发射效率;扩束器;卡塞格林
中图分类号:TN243; TH703 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20181104.0582

Design of a composite laser beam expander without obscuration

LU Zheng-wei[1,2], SHAO Shuai[1*], MA Ya-kun[1]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and physics, Chinese Academy of sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: shaoshuaiciomp@163.com*

Abstract: In order to meet the requirements of high-power laser emission, a large-diameter composite laser beam expander without central obscuration based on Cassegrain system is proposed to eliminate the central obscuration of the Cassegrain system and improve the laser emission efficiency. Based on the principle of the Cassegrain system and its structural characteristics, combined with the characteristics of the Galileo refraction type beam expander, a composite laser beam expander without central obscuration with an emission aperture of 550 mm is designed. Using a combination of a reflective beam expander and a refractive beam expander, a through hole is opened in the center of the Cassegrain secondary mirror so that the center is passed through the obscured laser. The rear side is connected to a Galileo-type refracting beam expander, which expands the beam transmitted through the center, and the two beams are emitted coaxially. The laser transmittance test is

收稿日期:2017-12-01;**修订日期**:2018-02-01
基金项目:中科院三期创新资助项目(No. 09J52SCN90)
Supported by the 3rd Innovation Project of CAS(No. 09J52SCN90)

carried out on a new type of composite beam expander. The experimental results show that for the laser of 10.6 μm wavelength, the transmittance is more than 95.21%, which is 22.12% higher than that of the traditional Cassegrain beam expander.

Key words: emission efficiency; laser beam expander; Cassegrain

1　引　言

在激光通讯,激光制导及激光武器等研究领域里,对发射激光功率要求越来越高。在大功率激光发射系统中,考虑到口径较大和能量吸收较少的特点,通常采用两片共轴使用的抛物面反射镜(即卡塞格林系统),对激光进行准直,保证系统的入射光和出射光都是平行光并压缩激光的空间发散角[1-5]。双镜卡塞格林系统中,由于次镜的遮拦导致光束中心部分无法输出,光能传输效率降低的现象被称为中心遮拦问题。传统的双镜卡塞格林系统由于中心遮拦的存在,会导致 20% ~ 40% 左右的光能得不到利用。目前解决这一问题常采用离轴光路设计或将入射光束通过多组镜片反射变成环形光束后入射到次镜上,避开中间遮拦区域[6],以消除中心遮拦。

常用的离轴光路设计方法,使入射光束避开次镜中间的盲区,全部处在次镜通光口径内[7]。这种方法受到激光发射系统主发射口径大小的限制,尤其在实际工程应用中存在以下应用问题:(1)发射系统机械结构体积庞大;(2)受次镜口径限制扩束倍率不能达到预期要求;(3)过大的镜面使成本呈指数增加。国内其他学者也做过这方面的努力并提出了很多种消除手段,比如将入射光束通过多组特殊形状的镜片反射变成环形光束,然后入射到次镜上避开中间遮拦区域[6],其弊端是镜组复杂,安装定位困难。或者是将两快抛物面反射镜离轴非对称放置[8-9],虽解决了遮拦问题却使光路复杂,扩束结构变的庞大。所以在实际应用中急需更优的解决办法出现。

本文综合反射式扩束器和折射式扩束器的优点,在大功率长波激光发射模式设定下选择卡塞格林系统和伽利略扩束器并将其复合到一起,设计形成一种新型无遮拦扩束系统。

2　设计原理

为了使被次镜遮拦部分的激光得以发射,在双镜卡塞格林系统中次镜中心设计一个通孔,使被遮拦部分的长波激光直接穿过次镜。在次镜后设计小口径伽利略式扩束镜组。将中心光束进行扩束。这样原始入射光束被分为内外两部分,一部分经双镜卡塞格林系统发射,另一部分经小口径伽利略式扩束系统发射,两束光同轴发射。由于双反系统公差敏感性,必须保证大扩束系统光轴和小扩束光轴同轴度在某一公差范围内,激光远场光斑才能够达到预期要求[9]。图 1 为系统光路图。

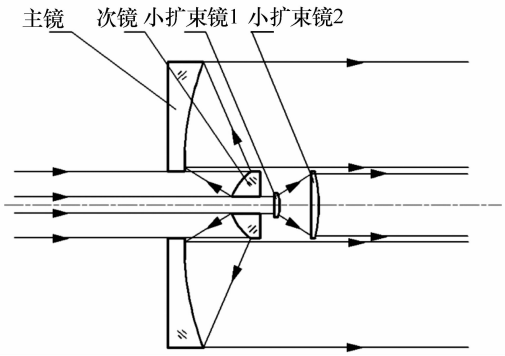


图 1　系统光路示意图

Fig. 1　Layout of the system

3　光学系统设计

在某 10.6 μm 波长激光发射系统中,根据系统整体技术指标要求,设计一种复合式扩束器,用于对 10.6 μm 激光进行扩束。激光系统中激光到次镜的光束直径为 100 mm。发射系统主镜通光口径为 600 mm,扩束倍率 5 倍。考虑到系统中存在快速反射镜(如图 2 所示),在一定范围内的角度转动导致入射到次镜上的光斑中心具有径向

10 mm 的移动范围,次镜直径为 Φ140 mm,实际工作时通光口径为 Φ120 mm。主镜直径为 Φ620 mm。主镜中通心孔径取为 Φ140 mm。

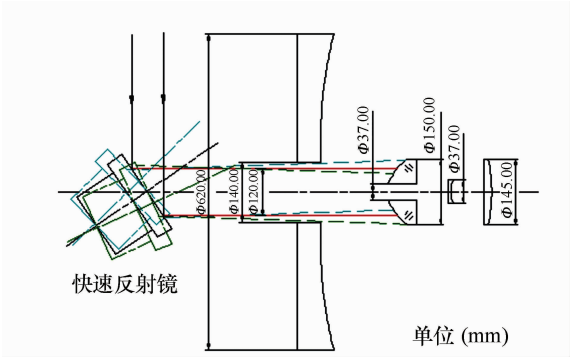


图 2 尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lens parameters

设计主镜近轴曲率半径为 1 500 mm,综合考虑机械支撑系统刚度对光学系统精度的影响、整体重量的限制、结构空间限制等因素,主次镜间距确定为 600 mm。次镜的近轴曲率半径为 300 mm。主、次镜均为抛物面。各参数见表 1。

表 1 反射扩束镜片尺寸参数(单位:mm)

Tab. 1 Lens parameters of reflective beam expander(Unit: mm)

	主镜	次镜
直径	620	150
通光口径	600	140
中心孔径	140	37
近轴曲率半径	1 500	300
材料	Zerodur	Si

主镜抛物面方程为:

$$x = \frac{1}{1500}(y^2 + z^2)\ . \tag{1}$$

次镜抛物面方程为:

$$x = \frac{1}{300}(y^2 + z^2)\ . \tag{2}$$

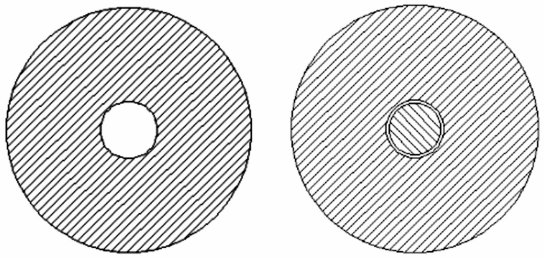
根据遮拦系数:

$$\varepsilon = \phi'_2/\phi_2 = \phi'_1/\phi_1\ , \tag{3}$$

得到系统遮拦系数为 $\varepsilon = 150/600 = 25\%$,故次镜中心直径 $\phi'_2 = \varepsilon\phi_2 = 35$ mm 范围内光束被遮拦,考虑到边缘遮拦和光轴晃动误差以及便于装调,在次镜中心设计直径 37 mm 的通孔,使被遮拦部分的长波激光直接穿过次镜通孔。

在次镜后设计长波小口径扩束镜组,采用伽利略式,长波小口径扩束入射镜直径为 37 mm,通光口径 35 mm。出射镜直径为 145 mm,通光口径 140 mm。光束直径 140 mm,次镜结构组件最大外径尺寸 149 mm(镜筒厚 2 m) < 150 mm,对双镜卡式扩束发射激光不产生遮拦。

由以上结构限制推导出的小扩束透镜最大尺寸,可知小扩束倍率 $\varepsilon = 140/35 = 4$ 倍,虽小于卡塞格林系统扩束倍率,但在保证小扩束和卡塞格林扩束器的光轴重合情况下,远场光斑重叠,增强了远距离打击能力。系统近场出射光斑形状如图 3所示。



(a) 传统卡塞格林光斑
(a) Optical spot of Cassegrain

(b) 复合系统光斑
(b) Optical spot of composite system

图 3 系统出射光斑图

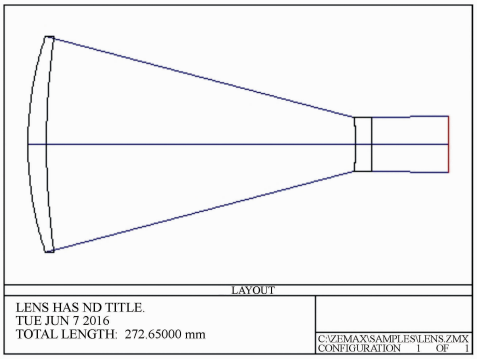
Fig. 3 Optical spots of two systems

表 2 折射扩束镜片参数

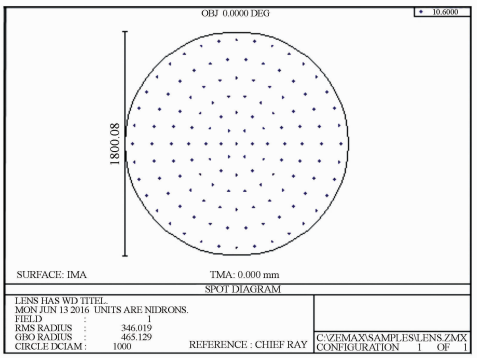
Tab. 2 Lens parameters of refractive beam expander

序号	注释	曲面类型	半径/mm	厚度/mm	材料	模式	通光口径/mm
1(STO)		Sphere	223.8	12	ZNSE_SPECIAL	Refract	140
2		Sphere	500	200.65		Refract	140
3		Sphere	-118.3	10	ZNSE_SPECIAL	Refract	36
4		Sphere	627.5	50		Refract	36
IMAGE		Sphere	INFINITY	0			9 756.037

小口径扩束系统镜片材料为硒化锌,对长波激光的透过率大于 90%。为保证同轴度精度,小扩束与双镜卡塞格林的次镜安装到一起。小口径扩束各镜片参数见表 2。光学系统及其成像质量如图 4 所示。



(a) 光线追迹图
(a) Ray tracing of optical system



(b) 光学系统点列图
(b) Spot diagram of the optical system

图 4　光学系统及其成像质量

Fig. 4　Refract light beam expanding system and image quality

系统发射激光为基模高斯光束,根据其在自由空间的传输特性,基模高斯光束在横截面内的场振幅分布按照高斯函数:

$$e = \frac{r^2}{\omega^2(z)}, \tag{4}$$

式中,r 为距离光斑中心的距离,$\omega(z)$ 为由幅值降落到中心值的 $1/e$ 的点所定义的光斑半径。所描述的规律从中心(即传输轴线)向外平滑降落,通过计算横截面内的能量分布可得卡塞格林系统透过能量与遮拦比的关系图,如图 2 所示,在遮拦比为 25% 时,卡塞格林系统有约 70% 的能量透过[10-11]。当被遮挡的光束通过小扩束时,能量利用率提高 30%。

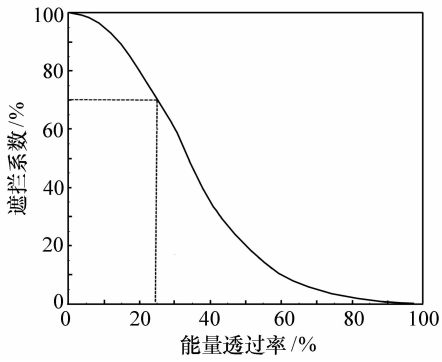


图 5　能量透过率和遮拦比图

Fig. 5　Energy transmission ratio and masking modulus

4　机械结构设计

4.1　小扩束镜筒结构设计

根据光学系统设计参数,小扩束镜筒轴向尺寸为 170 mm,两端径向尺寸分别为 Φ140 和 Φ36。镜片通过螺纹压圈压靠在镜座中,通过调整透镜和镜座之间垫片厚度微调两透镜之间的距离。镜筒中间设计法兰盘,平衡自身重量。通过螺钉与卡塞格林扩束器连接,中间设计有调整垫片用于微调。与透镜接触的金属材料均为铸铁,与 ZnSe 材料镜片接触性能良好。小扩束镜筒结构如图 6 所示。

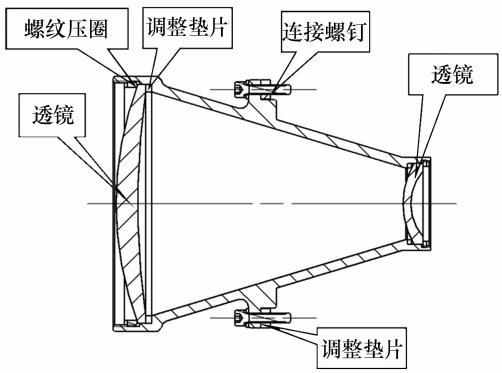


图 6　小扩束结构图

Fig. 6　Structure of small beam expander

4.2　连接结构设计

为保证小扩束和双镜卡式扩束光轴的重合度,设计小扩束和卡式双镜扩束器次镜安装在一

起,整体固定在次镜支撑架上。如图 4 所示,小扩束通过螺钉安装在连接镜筒上,卡塞格林次镜通过压块和螺钉连接在镜座上,镜座通过螺钉连接在镜筒另一侧。连接镜筒通过次镜支撑架与大镜筒固联,连接方式为焊接,保证次镜结构的稳定性[12-14]。系统装配结构如图 7 所示。

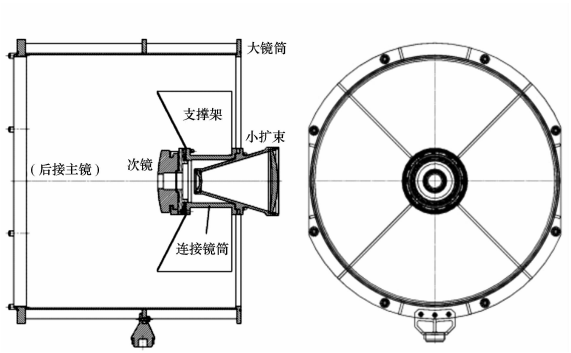


图 7 系统装配图

Fig. 7 System assemble diagram

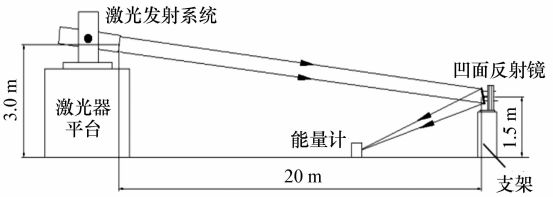
5 测量实验与结果

5.1 实验原理

激光在大气中的传输是一个多因素的综合问题,大气的温度、湿度、风向、风力、激光束引起的热晕等都会影响光束能量的损耗[15]。为保证测量数据更接近真实值,以及测量条件和可操作性,选择近场测量系统发射能量。利用能量计测得激光器原始输出能量 W,计算经导光光路多次反射后进入扩束系统的能量 W'。然后进行两组单脉冲能量测试,第一组将小扩束镜头遮拦,第二组去除遮拦。分别测得传统卡塞格林扩束器和复合式扩束器条件下的系统发射能量 W_1 和 W_2。然后求得系统在两种情况下的能量透过率 $\eta_1 = W_1/W'$,$\eta_2 = W_2/W'$以及透过率增加量 $\delta = \eta_2 - \eta_1$。

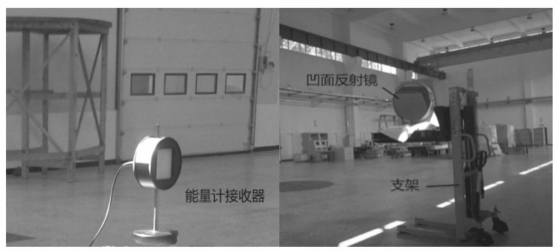
5.2 实验设计

采用设计好的支撑结构,安装并调试完成后,进行实验[16]。将复合扩束器安装在 10.6 μm 波长激光发射系统,采用单脉冲激光发射模式,经复合扩束器发射,出射光束直径 500 mm。发射系统出口中心距离地面 3 m。为减小大气对激光透过率的影响,尽量缩短测量距离,同时考虑发射系统俯仰极限,测量距离选为 20 m。用能量计接受测量脉冲能量,能量计接收器的接收口径为 35 mm×40 mm,为使光束全部收入并精确测量减小误差,需将光束直径汇聚减小至 $D < 30$ mm。在距离发射系统 20 m 处架设 550 mm 口径非球面凹面汇聚反射镜,其焦距为 $f = 3\ 000$ mm,反射镜中心距离地面 1.5 m。经计算能量计放于镜前水平距离 $L = 2.6$ m 处,此时能量计位于反射镜焦点附近,反射镜俯角为 12.856°。为保证反射能量全部被能量计接收,试验前在能量计表面覆盖一层热敏纸,发射激光在热敏纸留下的烧灼痕迹确定能量计位置。实验原理图及现场图如图 8 所示。



(a) 能量测量原理图

(a) Schematic diagram of energy test



(b) 测试现场图

(b) Test scene

图 8 实验原理图及现场图

Fig. 8 Test principle and scene photo

5.3 实验结果

表 3 为实验测得的两种情况下的透过能量以

表 3 能量测量结果(单位:J)

Tab. 3 Result of enegy measurement(Unit:J)

测量次数	无遮拦 W_2	有遮拦 W_1	激光器出口能量 W
1	7.0	5.6	21.8
2	7.1	5.2	20.9
3	6.6	5.9	21.3
4	6.9	5.0	21.5
5	7.2	4.9	20.8
6	7.0	5.5	21.7

及激光器原始出口能量值。

由表 3 可知,无遮拦情况下,接收到的能量平均值为:

$$W_2 = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^{6} W_{2i} = 6.97\ \text{J}. \tag{5}$$

遮拦小扩束情况下,接收到的能量平均值为:

$$W_1 = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^{6} W_{1i} = 5.35\ \text{J}. \tag{6}$$

激光器出口能量均值为:

$$W = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^{6} W_i = 21.33\ \text{J}. \tag{7}$$

由激光器出口到进入复合扩束器以及经过凹面反射镜,光束共经过 17 次反射,实验测得反射镜对 10.6 μm 激光的反射率为 0.939,光束进入扩束器能量:$W' = W \times 0.939^{17} = 7.32$ J。

传统卡塞格林扩束器能量透过率:

$$\eta_1 = \frac{W_1}{W'} = \frac{5.35}{7.32} = 73.09\%. \tag{8}$$

复合式扩束器能量透过率:

$$\eta_2 = \frac{W_2}{W'} = \frac{6.97}{7.32} = 75.21\%. \tag{9}$$

新型扩束器较原系统能量透过率增加 22.12%。

5.4　实验误差分析

首先,根据光学成像原理,在凹面反射镜倾斜的情况下,光束沿着非垂直镜面的方向入射,反射系统的聚焦能力会减弱,汇聚光斑分布呈非对称弥散斑形式。因此,在这种测量条件下,汇聚光斑边缘能量有可能溢出能量计接收面范围。实际测量值较真值偏小。

其次,凹面镜作为靶标进行对准时,由于其本身无热量,激光器的瞄准系统无法使用,只能采用肉眼观察红外跟瞄光束在反射镜上的位置。因此凹面镜口径与系统发射口径存在对准偏差,同时凹面镜的尺寸与光束直径相差不大,有溢出凹面镜的可能,凹面反射镜接收能量较系统发射能量偏小。

同时,在实验操作过程中,光束经过多次反射,在控制范围内,镜片表面灰尘仍然会造成光束散射,多次累积后也会使得测量结果较真值偏小。因此,该复合式扩束器的能量透过率大于实验结果,即 $\eta \geqslant 95.21\%$。

6　结　论

本文基于卡塞格林扩束器和折射式扩束器理论,结合两者的优点,在卡塞格林系统次镜上设计通孔,后接伽利略式小扩束系统,设计得到一种新型复合式扩束器,有效消除传统卡塞格林发射系统的中心遮拦。应用在工程实际中,通过近场实验验证新型扩束器在能量透过率方面的性能。其实验结果与理论分析相吻合,在 10.6 μm 激光发射条件下,系统能量透过率大于 95.12%,满足工程需要,达到预期目标。这种复合式扩束器在没有破坏卡带格林系统紧凑性的前提下,很好的解决了卡塞格林扩束器的中心遮拦问题,能量透过率比原系统提高 22.12%。这些实验和数据将对目前和今后强激光发射系统的研究及其发展提供重要的参考。

参考文献:

[1] 贾勇. 激光扩束系统的结构失调分析、优化和变倍技术研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2014.

JIA Y. Research on the Structural Misalignment, Optimization, and Zoom Technology of Laser Beam Expanders[D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Inst. of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014. (in Chinese)

[2] 孙敬伟,吕天宇,姚力双,等. 发射望远镜的设计与装调[J]. 光学 精密工程,2014,22(2):370-371.

SUN J W, LV T Y, YAO L SH, *et al*.. Design and assembly of transmitter-telescop[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 370-371. (in Chinese)

[3] 刘龙飞,佟首峰,王超. 经卡式光学天线发射的高斯光束衍射特性的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2015,38(1):11-12.
LIU L F,TONG SH F,WANG CH. The study of diffraction characteristics of gaussian beam transmitted by cassegrain optical antenna in laser communication[J]. *Journal of Chang chun University of Science and Technology*(Natural Science Edition),2015,38(1):11-12. (in Chinese)

[4] 巩盾,王红,田铁印. 多种应用于高功率激光技术的光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2013,S1:118-122.
GONG D,WANG H,TIAN T Y. Optical design of various optical systems applied in high power laser technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2013,S1:118-122. (in Chinese)

[5] 齐光,王书新,李景林. 空间遥感器高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件设计[J]. 中国光学,2015(1):99-106.
QI G,WANG SH X,LI J L. Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor[J]. *Chinese Optics*,2015(1):99-106. (in Chinese)

[6] 孔祥蕾,郝沛明. 消除中心遮拦的反射式激光扩束新方案[J]. 量子电子学报,2002,19(3):206-208.
KONG X L,HAO P M. New scheme of eliminating the central mask of reflective laser beam expander[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*,2002,19(3):206-208. (in Chinese)

[7] 何秉高,安志勇,高瑀含. 扩束系统设计与分析(英文)[J]. 红外与激光工程,2014,11:3825-3831.
HE B G,AN ZH Y,GAO Y H. Design and analysis of beam expanding system[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2014,11:3825-3831. (in Chinese)

[8] 张丽琴. 新型激光扩束器的设计[J]. 舰船科学技术,1994,1:47-49.
ZHANG L Q. Design of new laser beam expander[J]. *Ship Science and Technology*,1994,1:47-49. (in Chinese)

[9] 史广维,张新,张建萍. 无遮拦折反射红外光学系统[J]. 光学 精密工程,2014,22(8):1996-2000.
SHI G W,ZHANG X,ZHANG J P. Unobscured catadioptric infrared optical systems[J]. *Opt. Precision Eng.*,2014,22(8):1996-2000. (in Chinese)

[10] 周炳琨. 高以智,等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社 2004:70-71.
ZHOU B K,GAO Y ZH,*et al.*. *Laser Theory*[M]. Beijing:National Defend Industry Press,2004:70-71. (in Chinese)

[11] 虞林瑶,魏群,张鑫,等. 一体式紧凑型折反光学系统设计[J]. 光学 精密工程,2013,21(3):561-565.
YU L Y,WEI Q,ZHANG X,*et al.*. Design of compact integral structure of two-, mirror system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(3):561-565. (in Chinese)

[12] 刘韬,胡玥,董健,等. 激光主动照明光学系统设计[J]. 中国光学,2016(3):342-348.
LIU T,HU Y,DONG J,*et al.*. Design of laser active illumination optical system[J]. *Chinese Optics*,2016(3):342-348. (in Chinese)

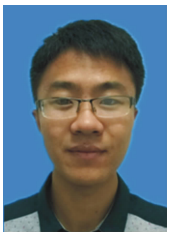
[13] 李艳杰,金光,张元,等. 成像与激光发射系统的共口径设计与实验[J]. 中国光学,2015(2):220-226.
LI Y J,JIN G,ZHANG Y,*et al.*. Co-aperture optical system for imaging and laser transmitting[J]. *Chinese Optics*,2015(2):220-226. (in Chinese)

[14] 虞林瑶,魏群,张天翼,等. 中波红外长焦距折返光学系统设计[J]. 中国光学,2015(2):234-240.
YU L Y,WEI Q,ZHANG T Y,*et al.*. Design of long focal infrared catadioptric optical system for multi-guided system[J]. *Chinese Optics*,2015(2):234-240. (in Chinese)

[15] 李正东. 激光在大气传输中的损耗和折射[J]. 红外与激光工程,2003,01:73-77.
LI ZH D. Loss and refraction of laser transmitting in the atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2003,01:73-77. (in Chinese)

[16] 陈夫林,张景旭,吴小霞,等. 620 mm 薄镜面的主动支撑结构及面形校正[J]. 光学 精密工程,2011,19(5):1023-1028.
CHEN F L,ZHANG J X,WU X X,*et al.*. Supporting structure of 620 mm thin primary mirror and its active surface correction[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(5):1023-1028. (in Chinese)

作者简介:



卢政伟(1990—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事光学精密机械方面的研究。E-mail:15948721102@163.com

邵　帅(1978—),女,吉林长春人,博士,研究员,硕士生导师,主要从事光学精密机械设计、光学仪器总体设计方面的研究。E-mail:shaoshuaiciomp@163.com

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊,曾于 1992 年,1996 年,2000 年和 2004 年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为"物理学类核心期刊",并于 2000 年同时被评为"无线电电子学、电信技术类核心期刊"。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和"万方数据资源系统"等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自 2000 年;美国《剑桥科学文摘社网站》自 2002 年;日本《科技文献速报》(CBST,JICST)自 2003 年已定期收录检索该刊论文;2008 年被荷兰"Elsevier Bibliographic Databases"确定为源期刊;2010 年被美国"EI"确定为源期刊。2001 年在国家科技部组织的"中国期刊方阵"的评定中,《发光学报》被评为"双效期刊"。2002 年获中国科学院 2001 ~2002 年度科学出版基金"择重"资助。2004 年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自 2011 年改为月刊,A4 开本,144 页,国内外公开发行。国内定价:40 元,全年 480 元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地　址: 长春市东南湖大路 3888 号
《发光学报》编辑部
邮　编: 130033
电　话: (0431)86176862,84613407
E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4
国际标准刊号: ISSN 1000-7032
国内邮发代号: 12-312
国外发行代号: 4863BM
http:// www.fgxb.org