

多波段高功率激光扩束系统设计^{*}

王恒坤, 王 兵, 庄昕宇, 郭汝海, 马 军

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 对透射式和反射式扩束系统应用于高功率激光扩束的优缺点进行了对比研究。采用次镜为凸抛物面,主镜为凹抛物面的无焦卡塞格林系统,运用 ZEMAX 光学设计软件,按激光扩束系统的扩束倍率和系统的波像差要求,设计出多波段高功率激光扩束系统。对于高功率激光反射镜的基底材料进行分析,选用无氧铜作为基底材料;采用金增强的膜系设计,膜系从近红外到远红外宽光谱波段激光的反射率均在 98% 以上。面形精度均方根值优于 $\lambda/40$ ($\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$) 的平面镜作为基准镜,采用光学干涉方法对设计的激光扩束系统进行检测实验,结果表明:该扩束系统的扩束倍率为 3.53,波像差为 0.206λ ,满足多波段高功率激光光束发射要求。

关键词: 多波段; 扩束系统; 基底材料; 无氧铜; 膜系; 综合热性能比值

中图分类号: TN142; TN249

文献标志码: A

doi:10.3788/HPLPB20112307.1785

激光技术是 20 世纪 60 年代初发展起来的一门高新技术,以其功率输出高、光束质量高、方向性强、单色性好、相干性好等特点^[1-3],已经被广泛应用于激光雷达、激光测距、光通讯及精密加工等重要领域^[4-6]。激光扩束是高功率激光发射系统研究的关键技术。在实际使用中,由于激光器出射光束具有发散角,为了得到更好的准直激光光束,通常在激光器的内部或出口位置安装较小的透射式扩束结构来改善激光光束质量^[7-8]。但是对于高功率激光发射系统来说,为在远场获得更高的激光功率密度,必须使激光发散角尽量小,同时发射系统对目标的定位精度要高。针对这一技术难点,本文设计了应用于高功率激光器及多波段激光共用的激光扩束系统,对适用于高功率激光反射镜的基底材料和多波段的反射镜膜系也进行了研究。

1 扩束系统设计

1.1 光学系统参数要求

本文设计的激光扩束系统工作于近红外到远红外光谱波段中。多波段高能激光器发散角均小于系统对激光光束质量的要求,工作激光光束最大直径为 28 mm,束最大漂移量为 7%。扩束系统倍率设计为 3.5 倍,系统波像差优于 0.25λ ($\lambda=0.632\ 8\ \mu\text{m}$),光学系统具有很好的稳定性,并具有高抗激光损伤阈值、高反射率、热变形小等特点。

1.2 结构类型

激光扩束系统主要分为透射式扩束系统和反射式扩束系统^[9-10]。透射式扩束系统是由一个或多个透镜组成,根据不同的目镜类型可分为伽利略望远镜扩束系统和开普勒望远镜扩束系统(图 1)。反射式扩束系统是由两个共焦抛物面反射镜组成,根据小离轴抛物面反射镜采用凸面反射镜和凹面反射镜的不同,可分为无焦格里格利扩束系统和无焦卡塞格林扩束系统(图 2)。

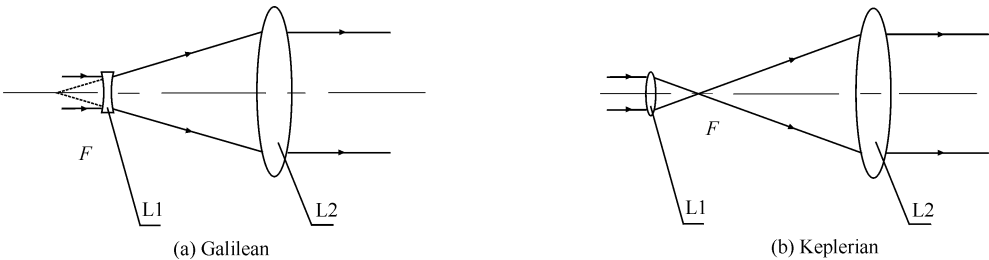


Fig. 1 Expand system of Galilean telescope and Keplerian telescope

图 1 伽利略和开普勒望远镜扩束系统

^{*} 收稿日期:2010-11-20; 修订日期:2011-04-13

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿基金项目(057X22C050)

作者简介:王恒坤(1977—),男,助理研究员,硕士,从事光电对抗方面相关研究;whengkun@tom.com。

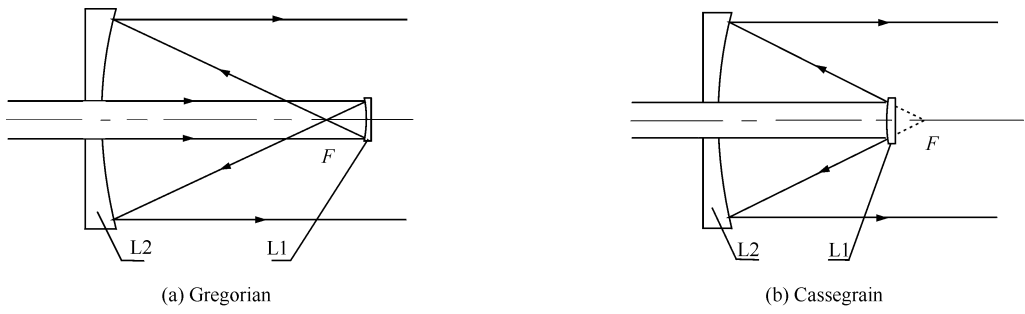


图 2 无焦格里格利和焦卡塞格林扩束系统

图 2 无焦格里格利和焦卡塞格林扩束系统

由于高功率激光发射系统的激光发射功率很高,为避免在扩束系统内产生实际的激光会聚点,致使周围空气击穿,可选用伽利略式扩束系统或无焦卡塞格林式扩束系统。后者同前者相比,具有大口径、无色差、传输效率高等优点。本文设计采用次镜为凸抛物面、主镜为凹抛物面的无焦卡塞格林系统,该系统还具有压缩光学系统空间尺寸的优点。

1.3 光学系统设计

根据激光扩束系统的扩束倍率和系统波像差的参数要求及选用的系统结构类型,运用 ZEMAX 光学设计模拟软件进行优化设计、分析,并估测光学系统的成像质量。光学系统设计方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}} \tag{1}$$

式中: z 是光线与反射镜表面交点沿光轴方向的坐标; r 是光线与反射镜表面交点与中心轴间的距离; K 是光学系统的非球面系数。由于扩束系统主次镜面均采用抛物面, K 取 -1 ,式(1)简化为

$$z = \frac{1}{2}cr^2 \tag{2}$$

该光学系统的系统图如图 3 所示,系统的调制传递函数曲线如图 4 所示。主次反射镜实物如图 5 所示。由于两块抛物反射镜共焦,由几何光学可知,该结构形式的光学系统对于光轴上的目标将理想成像,但是离轴的光学系统对于装调公差的要求较为严格。要达到系统波相差小于 0.25λ ,需满足以下装调条件:主镜固定,调整次镜在 z 轴(入射光轴)方向的移动量,使主镜与次镜的空气间隔误差 Δz 小于 0.01 mm ,在 x,y 轴方向偏心量小于 0.02 mm ,同时绕 x,y,z 三轴旋转分量小于 $15''$ 。

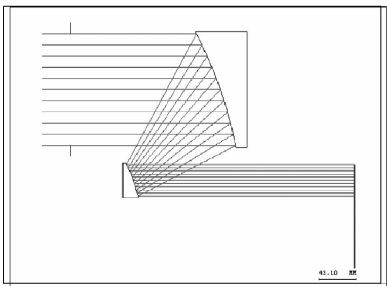


图 3 光学系统图

图 3 光学系统图

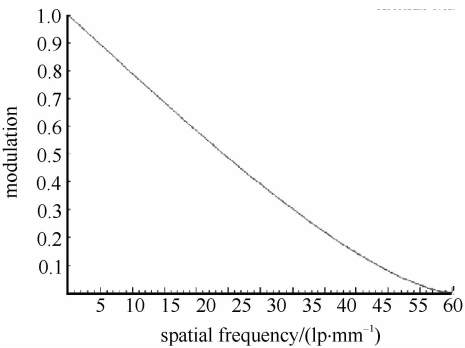


图 4 调制传递函数曲线

图 4 调制传递函数曲线



图 5 主次反射镜实物图

图 5 主次反射镜实物图

1.4 反射镜基底材料

由于反射镜在高能激光下工作,除需考虑激光反射镜基底材料的抗强激光损伤能力外,还需要选择对激光吸收少并且热导率高的材料作为基底,以避免反射镜被激光损伤或因吸收能量发热而引起的镜面变形。

在设计和制作高功率激光反射镜时主要考虑了以下几点:其一是材料的综合热性能比值,即材料的线膨胀系数与热传导率的比值;其二是材料的微观结构、缺陷及晶向等因素;其三是材料加工工艺。作为高能激光反射镜应用材料,硅、钼和无氧铜比较适合。表 1 是这 3 种材料的热性能参数。由表 1 可知,在吸收相同热能且反射镜尺寸相同的前提下,综合热性能比值 $S(S=\alpha/\lambda)$ 越小,反射镜表面的热形变就越小。在重点考虑反射镜

表面热形变和抗强激光损伤情况下,无氧铜材料作为高能激光反射镜基底是比较理想的。无氧铜抗激光损伤能力极强,即使在局部有损伤及缺陷情况下也可以正常工作。

表 1 材料的热性能参数

Table 1 Thermal parameters of material

base material	thermal conductivity /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	coefficient of linear expansion α/10 ⁻⁶ K ⁻¹	synthesis performance ratio S/(μm·W ⁻¹)
copper	0.919	20.0	21.763
molybdenum	0.341	5.0	14.663
silicon	0.201	2.4	11.940

1.5 反射镜膜系设计

由于反射镜工作波段很宽,并且还应有较高的激光损伤阈值,因此采用金增强的膜系设计。膜系反射率曲线如图 6 所示,从图中可以看出,对各波段激光的反射率均可达到 98% 以上。

2 性能指标检测实验

2.1 系统扩束倍率检测

使用 ZYGO 干涉仪发出平行光,在扩束系统入瞳处放置直径 $D_0=22\text{ mm}$ 的光阑,出口处放置一靶板。平行光束通过扩束系统照射在靶板上,在靶板上测量出光斑直径 D_i 。从而得出系统的扩束倍率 $\eta=D_i/D_0$,3 次测量 D_i 分别为 77.2、78.4 和 77.6 mm。经取扩束后光斑大小的平均值,计算得出系统扩束倍率为 3.53,满足设计要求。

2.2 系统成像质量检测

检测采用光学干涉法。干涉仪发出平行光束,经 45° 导光镜、扩束系统次镜和主镜,至口径为 200 mm 平面标准反光镜,光束从原路返回到干涉仪,形成干涉图样,被干涉仪捕获。其中平面标准反光镜面形精度 RMS 优于 $\lambda/40$ 。光束干涉图如图 7 所示。从图中看到系统波像差为 0.206λ ($\lambda=0.632\text{ }\mu\text{m}$),满足设计指标波像差小于 0.25λ 的要求。

3 结 论

本文设计了多波段高功率激光扩束系统。研究表明,从近红外到远红外多波段的高功率激光发射系统中,采用次镜为凸抛物面、主镜为凹抛物面的离轴抛物面扩束系统结构类型能满足高能激光发射系统要求。采用金属无氧铜作为主次镜的基底材料,同时表面蒸镀金增强反射膜系,可以有效地提高光学元件的耐多波段激光损伤能力,并且材料表面的热变形小,对激光发射系统的出光质量影响很小。对扩束系统性能实际检测表明,系统波像差为 0.206λ ($\lambda=0.632\text{ }\mu\text{m}$),扩束倍率为 3.53,均满足系统要求。

参考文献:

[1] 邵帅,高云国,郭劲. 高功率激光发射系统的一级扩束设计[J]. 激光与红外,2010,40(4): 744-747. (Shao Shuai,Gao Yunguo,Guo Jin. Design of the first step beam expander for the high power laser. *Laser and Infrared*,2010,40(4):744-747)

[2] 邓建明,凌宁. 高功率激光反射镜的几个关键技术[J]. 强激光与粒子束,1998,10(4):518-522. (Deng Jianming, Ling Ning. Several key manufacture technologies of mirror in high power system. *High Power Laser and Particle Beams*,1998,10(4): 518-522)

[3] 郝沛明,王鹏,王占山. 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计[J]. 中国激光,2003,30(6): 494-496. (Hao Peiming, Wang Peng, Wang Zhanshan. Lens design for high power and wide-aperture beam expander. *Chinese Journal of Lasers*,2003,30(6):494-496)

[4] 彭玉峰,程祖海. 强激光反射镜基体材料的热畸变特性有限元分析[J]. 强激光与粒子束,2005,17(1):5-8. (Peng Yufeng,Cheng Zuhai. Fi-

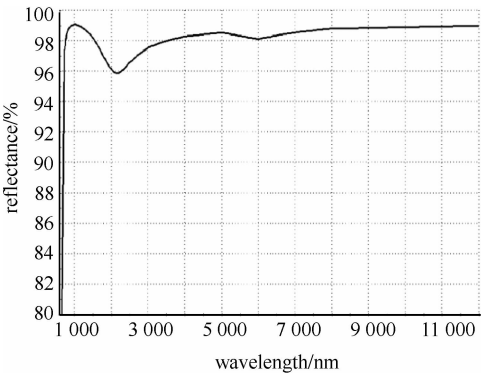


Fig. 6 Theoretical index of reflection for golden enhanced mirror

图 6 膜系反射率曲线

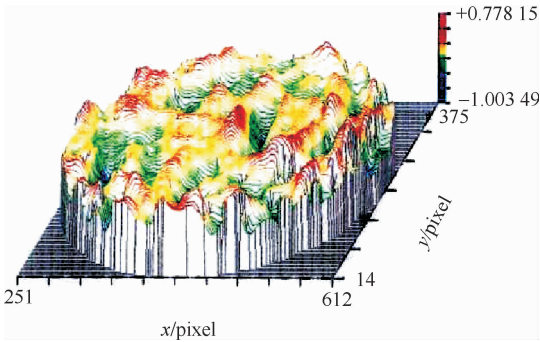


Fig. 7 Diagram of optical beam interference

图 7 光干干涉图

- nite element analyses of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(1): 5-8)
- [5] Cassteens J, Rashed A, Plummer R, et al. Silicon carbide high performance optics;a cost effective, flexible fabrication process[C]//Proc of SPIE. 2001, **4451**: 458-460.
- [6] Taylor J R. Specification and testing facilities for optical components used in high average power visible laser system[C]//Proc of SPIE. 1989, **1047**: 250-255.
- [7] 卜轶坤, 赵丽, 郑权, 等. 高损伤阈值激光反射镜的设计方法[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(2): 184-188. (Bu Yikun, Zhao Li, Zheng Quan, et al. Design method of high damage threshold laser mirror. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 184-188)
- [8] 吴周令, 范正修. 膜系结构对薄膜损伤阈值的影响[J]. 光学学报, 1989, **9**(9): 830-836. (Wu Zhouling, Fan Zhengxiu. Damage threshold dependence of multilayer laser mirrors on coating design. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(9): 830-836)
- [9] 郝沛明, 孔祥蕾. 两镜系统扩束器的研究[J]. 量子电子学报, 2001, **18**(2): 180-183. (Hao Peiming, Kong Xianglei. Research of beam expander with a two-mirror system. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(2): 180-183)
- [10] 李春霞, 杨茂华, 王鹏, 等. 反射型扩束式场镜的设计[J]. 光学学报, 1997, **17**(7): 950-952. (Li Chunxia, Yang Maohua, Wang Peng, et al. Design of reflective broadening band field lens. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(7): 950-952)

Multi-band expand system for high-power lasers

Wang Hengkun, Wang Bing, Zhuang Xinyu, Guo Ruhai, Ma Jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The advantages and disadvantages of transmission and reflection expand system are analyzed for high-power laser. The secondary mirror is selected in the form of convex paraboloid and the primary mirror in the form of concave paraboloid, which the whole system is Cassegrain system without focus. The parameters of optical system are designed by ZEMAX software based on the expanding ratio and wave aberration. The base material and coating of mirror is analyzed for high-power laser and the copper is selected as the substrate. Then the optimal design is conducted for the coating of mirrors, which the reflectivity is above 98% for the near-infrared to far-infrared waveband. The designed optical system is measured by the interferometer with the smoothness of mirror RMS better than $\lambda/40$ as the benchmark mirror. The experimental results show that the measured expand ratio 3.53 and wave aberration 0.206λ ($\lambda=0.6328\mu\text{m}$) of this expand system can meet the requirement of multi-band high-power laser.

Key words: multi-band; expand system; base material; copper; coating; synthesis performance ratio