

基于公差分析的高功率激光装置组合透镜设计

王 方 栗敬钦 刘兰琴 林东晖 王文义 莫 磊 景 峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心高温高密度等离子体物理国家实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要 从某高功率固体激光装置的实际需求出发, 优化设计了能够满足装置需求的组合透镜组, 并基于公差分析给出了各组组合透镜加工装配的公差要求, 为组合透镜在高功率固体激光装置中的工程应用提供了有力的支持。组合透镜在高功率固体激光装置中的应用对降低装置工程造价和提高光路的稳定性有较大意义。

关键词 光学设计; 高功率固体激光装置; 公差分析; 组合透镜

中图分类号 TN202 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0354

Double Lens Design Based on Tolerance Analysis in High-Power Solid-State Laser Facility

Wang Fang Su Jingqin Liu Lanqin Lin Donghui Wang Wenyi Mo Lei Jing Feng

(National Key Laboratory of Laser Fusion, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Based on analysis the high power solid-state laser facility's optical system, the double lenses were design which fitted the requirement. The tolerance of double lenses were given through tolerance analysis. These conclusions provide guidance to use double lens in the high power solid laser facility. The application of double lens in the facility is meanful to reduce the building cost and improve the stability of facility.

Key words optical design; high-power solid-state laser facility; tolerance analysis; double lens

1 引 言

目前高功率固体激光装置一般采用内腔离轴四程放大^[1~3]。为了满足惯性约束聚变(ICF)打靶的需要, 对光束质量, 特别是对光束远场焦斑的能量集中度有很高的要求^[4,5]。其光学系统是一种特殊的聚焦光学系统, 与一般的成像光学系统相比, 其特殊性主要表现在以下几个方面: 仅有一个视场; 窄带光传输, 可以不考虑色差; 元件尺寸较大, 加工、装调难度较大等。因此, 在国内已建造的此类装置的透镜一般采用单透镜设计^[6~8]。

本文从缩短光路长度, 进而减少建造成本^[9]及提高光路稳定性^[10]出发, 光路中非离轴使用的注入透镜和反转器缩束透镜^[11]则可以考虑使用组合透镜。本文根据装置的实际, 以注入组合透镜为例, 对各类公差对组合透镜的性能影响作出了详细分析,

为组合透镜在高功率固体激光装置中的工程应用提供了有力的支持。

2 光路原理

本文研究的对象是采用钕玻璃内腔四程放大的高功率固体激光装置, 装置的光路示意图如图 1 所示。

装置的注入光束(Input beam)通过腔内空间滤波器(SF. 1)滤波后由腔内放大器(Amp. 1)和(一程)。然后, 光束经腔镜(CM)反射回 Amp. 1 和助推放大器(Amp. 2)被再次放大(二程)。经两次放大后光束被导入光束反转器(Beam reverser), 光束反转器内插入一小口径等离子体电光开关(PC)。然后, 光束被反射返回 Amp. 2 和 Amp. 1 被第三次放大(三程 pass. 3)。被放大的光束经腔镜反射回

基金项目: 国家 863 计划和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2007B08005)资助课题。

作者简介: 王 方(1979—), 男, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事强激光技术和光学设计等方面的研究。

E-mail: wang.f.zju@gmail.com

导师简介: 栗敬钦(1973—), 男, 博士后, 副研究员, 主要从事强激光技术和衍射光学等方面的研究。

E-mail: sujingqin@hotmail.com

Amp. 1 被第四次放大后,经过 SF1 滤波后传输到 Amp. 2,经 Amp. 2 放大后通过传输空间滤波器(SF. 2)滤波后输出(四程 pass. 4)。

根据装置要求,在注入光路及反转器光路中使用组合透镜模块。注入光路如图 2(a)所示,从预放输出光束经过二次光阑整形后依次通过 IM3、IM2、

IM1 反射导入注入组合透镜模块 L0,会聚光束由 IM0 反射导入腔内空间滤波器滤波;反转器光路如图 2(b)所示,主放大二程光由 BM1、BM2 反射后导入反转器组合透镜模块 L5,再通过反转器角反射器 BM3/BM4/BM5 反射后导入反转器组合透镜模块 L6,然后经过 BM6、BM7 反射导回传输空间滤波器。

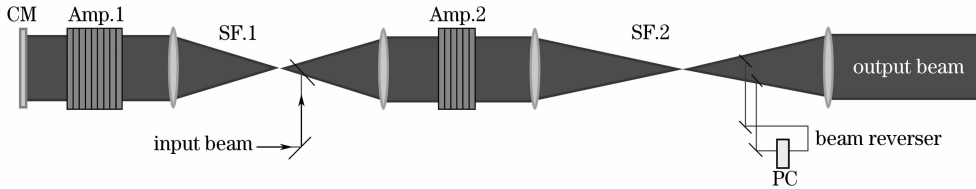


图 1 内腔四程放大装置光路示意图

Fig. 1 The schematic of multi-pass amplifying facility

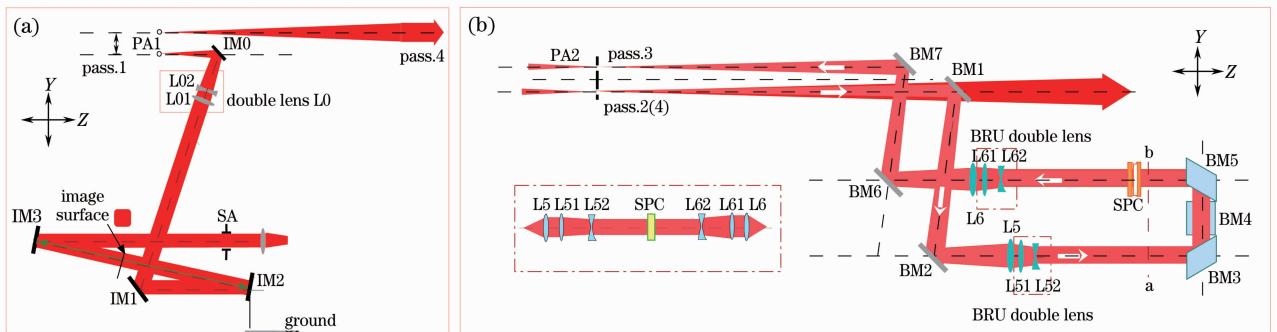


图 2 注入组合透镜模块及反转器组合透镜模块所在光路示意图

Fig. 2 The schematic of double lens in beam input unit and beam reverse unit

3 组合透镜设计

3.1 组合透镜设计原则

某高功率固体激光装置主放大系统注入光路如图 2(a)所示。由于预留空间长度无法满足注入单透镜和结构模块化设计需要,因此必须通过将注入透镜 L0 设计为组合透镜使得透镜到焦点的距离缩短,且能扩大透镜到光阑的位置距离以满足结构的模块化设计需要。

在 L0 组合透镜的设计中需考虑:一、透镜出射面到焦点的发散角应与单透镜的发散角一致,到焦点的后工作距保持不变,透镜间距可变,但其前光阑的位置要以满足结构的模块化设计需要来确定。二、由于组合透镜的焦距较短,加工、安装误差的影响很敏感,为了降低其冗余度,在设计中可放宽优化条件。

在主放大系统光束反转器光路[如图 2(b)所示]设计中,同样由于结构的模块化设计需要,透镜 L5、L6 的焦距较长,为满足像传递要求反转器模块长度将超过 15 m,反转器中所有小口径光学元件尺寸将随之增大,对节约成本及保证模块稳定性的角

度非常不利。因此需要采用组合缩束透镜(BRU double lens)来缩短反转器长度,并使反转器内光束口径较小,缓解对小口径光学元件口径的尺寸压力。

3.2 组合透镜公差要求

由于装置采用模块整体装校的方式进行安装,为保证注入模块和反转器模块的功能实现,要求组合透镜的公差不能过紧,而且能够较均匀的分配在各个元件上。综合考虑系统内模块的功能要求和可行性,分配得到注入组合透镜模块和反转器组合透镜模块的公差要求如表 1 所示。

表 1 组合透镜模块公差要求

Table 1 Tolerance demand of double lens unit

	$\Delta\theta_x / \text{mrad}$	$\Delta\theta_y / \text{mrad}$	$\Delta X / \text{mm}$	$\Delta Y / \text{mm}$	$\Delta Z / \text{mm}$
L0	0.15	0.15	0.5	0.5	1
L5/L51/L52	0.15	0.15	0.5	0.5	2
L6/L61/L62	0.15	0.15	0.5	0.5	2

在组合透镜设计过程中,除设定输出波前畸变、后工作距和像面位置等作为优化的边界条件外,对于优化设计得到的结果必须进行公差分析,当公差分析结果与表 1 所示有所违背时,必须对透镜参数进行重新

设计以满足表 1 的公差要求。设计流程如图 3 所示。

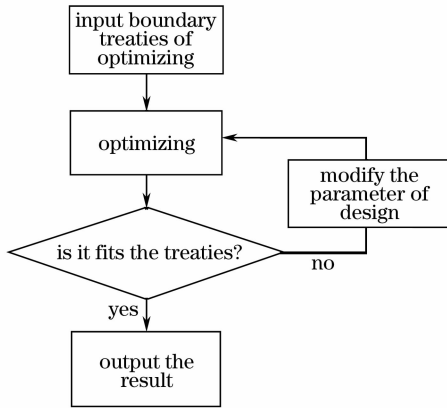


图 3 组合透镜设计流程

Fig. 3 Flow chart of double lens design in the facility

3.3 组合透镜设计结果

经过优化设计,满足符合公差要求的组合透镜。注入组合透镜模块 L0(L01/L02)、反转器组合透镜模块 L5(L5/L51/L52)和反转器组合透镜模块 L6(L6/L61/L62)输出波前及远场如图 4 所示。三个模块的波前和远场大小值均较小,满足应用需求。

注入组合透镜 L01/L02 的在无公差影响时的波前 $P-V$ 值为 0.2λ , x_{RMS} 值为 0.06λ (扣除离焦, $\lambda = 1053 \text{ nm}$),公差分析的结果如表 2 所示,在此公差下,最

表 2 注入组合透镜加工装配公差要求

Table 2 Tolerance demand of input combinational-lens module L0 unit

Tolerance type	Surface	Change	X_{RMS} wave-front error		Back intercept variation /mm
			Plus (λ)	Minus (λ)	
Light rings	L01_1	0.35	-0.0008	0.0008	-0.542704
	L01_2	0.35	0.0007	-0.0007	0.512217
	L02_1	0.5	-0.0002	0.0002	-0.483934
	L02_2	0.5	0.0004	-0.0004	0.433637
Radius error	L01_1	0.01 mm	0.001	-0.001	0.708247
	L01_2	0.5 mm	-0.0009	0.0009	-0.639763
	L02_1	0.01 mm	0.0003	-0.0003	0.549601
	L02_2	0.003 mm	-0.0007	0.0007	-0.719224
Thickness error	L01	0.02 mm	-0.0007	0.0007	-0.478989
	S2	0.01 mm	-0.0007	0.0007	-0.465877
	L02	0.05 mm	-0.0005	0.0005	-0.486041
Index error	L01	0.0001	-0.0035	0.0035	-2.822263
	L02	0.0001	0.0005	-0.0005	0.845561
Irregularity of light rings	L01_1	0.2	0.0007	0.0009	-0.149501
	L01_2	0.2	0.0009	0.0006	0.146252
	L02_1	0.2	0.0003	0.0003	-0.094013
	L02_2	0.2	0.0002	0.0003	0.076616
Wedge error	L01	0.01mm	0.0028	0.0028	0
	L02	0.07mm	0.0097	0.0097	0
Lens off-axis	L01	0.02mm	0.0028	0.0028	0
	L02	0.02mm	0.0028	0.0028	0
	L02	0.02mm	0.0028	0.0028	0
Lens tilt	L01	0.005rad	0.0019	0.0019	0
	L02	0.001rad	0.0085	0.0085	0

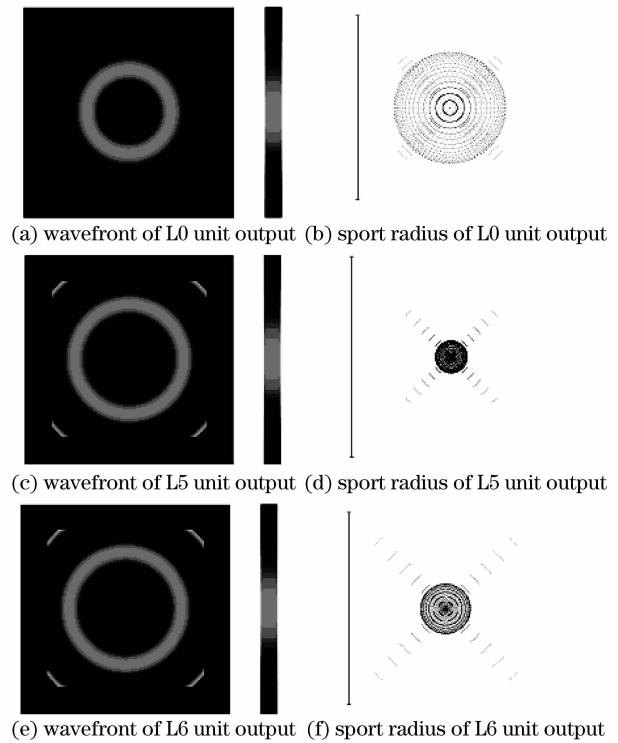


图 4 三组组合透镜模块设计结果

Fig. 4 Design result of three combinational-lens modules possible wavefront change RMS value of 0.026λ (如图 5),离焦补偿为 4 mm。

表 3 反转器组合透镜模块 L5 加工装配公差要求
Table 3 Tolerance demand of combinational-lens module for reverser L5 unit

Tolerance type	Surface	Change	X_{RMS} wave-front error		Back intercept variation /mm
			Plus (λ)	Minus (λ)	
Light rings	L52_2	0.25	0	0	-4.290814
	L52_1	0.25	0	0	4.380398
	L51_2	0.15	0	0	-18.744082
	L51_1	0.15	0	0	19.647356
	L5_2	0.25	0	0	-4.306856
	L5_1	0.25	0	0	4.306688
Radius error	L52_2	0.1mm	0	0	2.536887
	L52_1	0.1mm	0	0	-7.002581
	L51_2	0.2mm	0	0	1.397931
	L51_1	0.01mm	0	0	-2.575886
	L5_2	1mm	0	0	1.676115
	L5_1	1mm	0	0	-0.012072
Thickness error	L52	0.5mm	0	0	-4.266527
	L52-L51	0.05mm	0	0	-4.555445
	L51	0.1mm	0	0	-8.665941
	L51-L5	0.5mm	0	0	0
	L5	0.5mm	0	0	-0.281944
Index error	L52	0.0001	0	0	13.605745
	L51	0.0001	0	0	-18.557183
	L5	0.0004	0	0	-7.808524
Irregularity of light rings	L52_2	0.2	0.0014	0.0014	-1.716051
	L52_1	0.2	0.0014	0.0014	1.751385
	L51_2	0.1	0.0052	0.0052	-6.247752
	L51_1	0.1	0.0055	0.0055	6.538480
	L5_2	0.2	0.0014	0.0014	-1.722724
	L5_1	0.2	0.0014	0.0014	1.722675
	L52_1	0.2	0.0014	0.0014	1.751385
	L51_2	0.1	0.0052	0.0052	-6.247752
	L51_1	0.1	0.0055	0.0055	6.538480
	L5_2	0.2	0.0014	0.0014	-1.722724
L5_1	0.2	0.0014	0.0014	1.722675	
Wedge error	L52	0.1mm	0.0003	0.0003	0
	L51	0.1mm	0.0009	0.0009	0
	L5	0.1mm	0	0	0
	L51	0.1mm	0.0009	0.0009	0
	L5	0.1mm	0	0	0
Lens off-axis	L52	0.5mm	0.0008	0.0008	0
	L51	0.5mm	0.0008	0.0008	0
	L5	0.5mm	0	0	0
	L51	0.5mm	0.0008	0.0008	0
	L5	0.5mm	0	0	0
Lens tilt	L52	0.005rad	0.003	0.003	0
	L51	0.005rad	0.0019	0.0019	0
	L5	0.005rad	0	0	0
	L51	0.005rad	0.0019	0.0019	0
	L5	0.005rad	0	0	0

表 4 反转器组合透镜模块 L6 加工装配公差要求

Table 4 Tolerance demand of combinational-lens module for reverser L6 unit

Tolerance type	Surface	Change	X_{RMS} wave-front error		Back intercept variation /mm
			Plus (λ)	Minus (λ)	
Light rings	L62_2	0.25	0	0	-3.161128
	L62_1	0.25	0	0	3.2270006
	L61_2	0.15	0	0	-13.809190
	L61_1	0.15	0	0	14.474266
	L6_1	0.25	0	0	-3.173052
	L6_2	0.25	0	0	3.172899
Radius error	L62_2	0.1mm	0	0	1.868975
	L62_1	0.1mm	0	0	-5.158749
	L61_2	0.2mm	0	0	1.029887
	L61_1	0.01mm	0	0	-1.897663
	L6_1	1mm	0	0	1.484578
	L6_2	1mm	0	0	-0.034636
Thickness error	L62	0.5mm	0	0	-3.143233
	L62-L61	0.05mm	0	0	-3.355949
	L61	0.1mm	0	0	-6.384160
	L61-L6	0.5mm	0	0	0
	L6	0.5mm	0	0	-0.249720
Index error	L62	0.0001	0	0	10.023571
	L61	0.0001	0	0	-13.6715
	L6	0.0004	0	0	-6.701491
Irregularity of light rings	L62_2	0.2	0.0013	0.0013	-1.264258
	L62_1	0.2	0.0013	0.0013	1.290257
	L61_2	0.1	0.0049	0.0049	-4.602869
	L61_1	0.1	0.0051	0.0051	4.817259
	L6_1	0.2	0.0013	0.0013	-1.269205
	L6_2	0.2	0.0013	0.0013	1.269159
	L62_1	0.2	0.0013	0.0013	1.290257
	L61_2	0.1	0.0049	0.0049	-4.602869
	L61_1	0.1	0.0051	0.0051	4.817259
	L6_1	0.2	0.0013	0.0013	-1.269205
	L6_2	0.2	0.0013	0.0013	1.269159
Wedge error	L62	0.1mm	0.0003	0.0003	0
	L61	0.1mm	0.0008	0.0008	0
	L6	0.1mm	0	0	0
	L61	0.1mm	0.0008	0.0008	0
	L6	0.1mm	0	0	0
Lens off-axis	L62	0.5mm	0.0007	0.0007	0
	L61	0.5mm	0.0007	0.0007	0
	L6	0.5mm	0	0	0
	L61	0.5mm	0.0007	0.0007	0
	L6	0.5mm	0	0	0
Lens tilt	L62	0.005rad	0.0028	0.0028	0
	L61	0.005rad	0.0018	0.0018	0
	L6	0.005rad	0	0	0
	L61	0.005rad	0.0018	0.0018	0
	L6	0.005rad	0	0	0

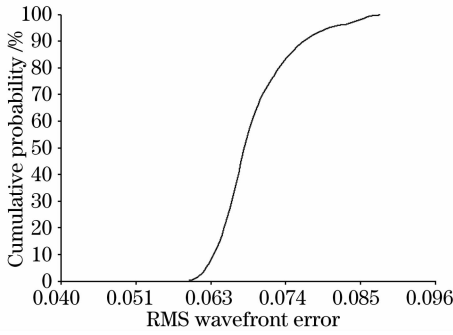


图 5 根据公差值注入组合透镜模块对应波前 RMS 值的变化概率

Fig. 5 RMS wavefront change probability of input combinational-lens module L0 unit

由于注入组合透镜模块离焦量(ΔZ)的装配要求是小于 1 mm,而在公差表中主要引入离焦量的公差项是玻璃材料的折射率公差,在无法提高折射率公差的情况下,必须在装配过程中通过调节 L01、L02 透镜的间距对离焦量进行控制。透镜间距变化量与后工作距变化量的关系如图 6 所示,由图 6 可知它们之间是线性关系,如果能够控制透镜间距在 $10 \mu\text{m}$ 量级变化,就应该可以控制后工作距的误差在 1 mm 内。

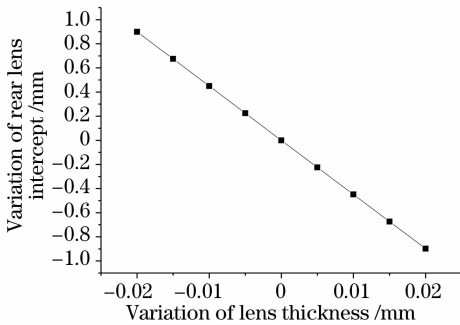


图 6 透镜间距变化量与后截距变化量的关系

Fig. 6 The relation of variable parameter between back intercept and spacing variation

反转器组合透镜模块 L5(L5/L51/L52)在无公差影响时的波前 P-V 值为 0.013λ , x_{RMS} 值小于 0.003λ (扣除离焦, $\lambda=1053 \text{ nm}$),公差分析的结果如表 3 所示,在此公差下,最可能的波前变化 x_{RMS} 值为 0.097λ (如图 7),离焦补偿为 48 mm。

反转器组合透镜模块 L6(L6/L61/L62)在无公差影响时的波前 P-V 值为 0.013λ , x_{RMS} 值小于 0.003λ (扣除离焦, $\lambda=1053 \text{ nm}$),公差分析的结果如表 4 所示,在此公差下,最可能的波前变化 x_{RMS} 值为 0.097λ (如图 8),离焦补偿为 35 mm。

由于反转器 L5/L51/L52 组合透镜模块离焦量的装配要求是小于 2 mm,而在公差表中主要引入离焦量

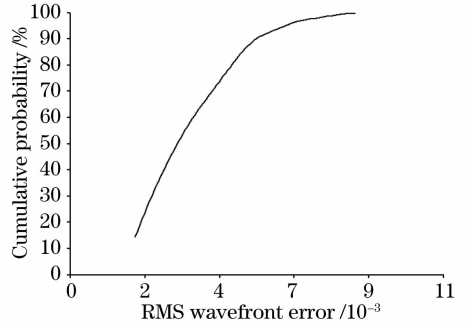


图 7 根据公差值反转器 L5/L51/L52 透镜模块对应波前 RMS 值的变化概率

Fig. 7 RMS wavefront probability of L5 unit

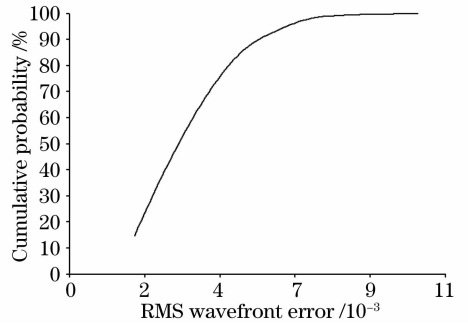


图 8 根据公差值反转器 L6/L61/L62 透镜模块对应波前 RMS 值的变化概率

Fig. 8 RMS wavefront variation probability of L6 unit

的公差项是玻璃材料的折射率公差,在无法提高折射率公差的情况下,必须在装配过程中通过调节透镜间距对离焦量进行控制。L51/L5 透镜间距变化对后截距的影响非常小,因此只能调节 L51 和 L52 的透镜间距。反转器 L6/L61/L62 组合透镜模块同样存在这个问题,需要通过调节 L61 和 L62 的透镜间距来满足离焦量的要求。

变化量与后工作距变化量的关系如图 9 所示,从图中可知它们之间是线性关系,如果能够控制透镜间距在 $10 \mu\text{m}$ 量级变化,就应该可以控制后工作距的误

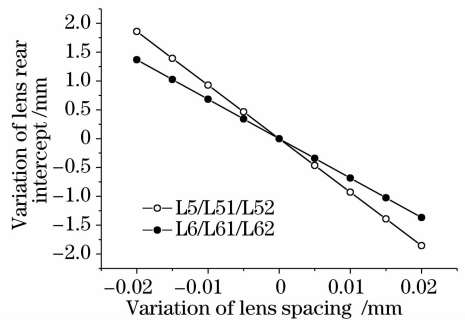


图 9 透镜间距变化量与后截距变化量的关系

Fig. 9 The relation of back intercept variation and lens spacing variation

差在 2 mm 内。

4 结 论

本文基于公差分析对用于高功率固体激光装置的组合透镜进行了设计,得到的结果能够满足装置的需求。得到的透镜参数及公差分析结果将对此类组合透镜的加工装配提供指导,为组合透镜在高功率固体激光装置中的应用提供理论支持。组合透镜在高功率固体激光装置中的应用将对降低装置工程造价和提高光路的稳定性有较大意义。

参 考 文 献

- 1 Wang Fang, Zhu Qihua, Jiang Dongbin *et al.*. Optimization of optical design of the master amplifier in multi-pass off-axis amplification system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10): 5277~5282
王 方,朱启华,蒋东宾等. 多程放大系统主放大级光学优化设计[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10): 5277~5282
- 2 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Research progress of laser drivers for inertial fusion energy [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 55~62
於海武,徐美健,段文涛等. 惯性聚变能源激光驱动器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9): 55~62
- 3 Peng Hansheng, Zhang Xiaomin, Fan Dianyuan *et al.*. Status of high-power solid-state lasers and engineering science [J]. *Engineering Science*, 2001, **3**(3): 1~8
彭瀚生,张小民,范滇元等. 高功率固体激光装置的发展与工程科学问题[J]. *中国工程科学*, 2001, **3**(3): 1~8
- 4 Shen Weimin, Wu Quanying, Xue mingqiu. Optical design of far field beam diagnosis system in Shen Guang III intense laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 965~969
沈为民,吴泉英,薛鸣球. 神光III强激光光束远场诊断系统光学设计[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 965~969
- 5 Zhang Rui, Zhang Xiaomin, Su Jingqin *et al.*. Static phase control elements for interial confinement fusion drivers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 311~315
张 锐,张小民,粟敬钦等. 用于惯性约束聚变驱动器的静态相位控制元件[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 311~315
- 6 Feng Guoying, Chen Jianguo, Ma Zairu *et al.*. Locating the near axial ghosts in the high power laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 632~635
冯国英,陈建国,马再如等. 高功率激光系统中近轴鬼像点的寻找[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 632~635
- 7 Liu Hongjie, Liu Lanqin, Su Jingqin *et al.*. Lens design based on ghost image and aberration analysis in high-power laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 976~980
刘红婕,刘兰琴,苏景琴等. 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 976~980
- 8 Wang Fang, Zhu Qihua, Jiang Dongbin *et al.*. Analysis of system aberration influenced by the lens tilt in a multi-pass amplifier[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**STBZ(3): 333~336
王 方,朱启华,蒋东宾等. 多程放大系统中透镜倾斜对系统像差的影响分析[J]. *激光技术*, 2007, **31**(3): 333~336
- 9 Zhou Hai, Jiang Xuejun, Zhu Qihua *et al.*. Optimization of spatial filter matrix[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(3): 407~441
周 海,蒋学军,朱启华等. 空间滤波器阵列结构优化设计[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(3): 407~441
- 10 Zhu Qihua, Zhang Xiaomin, Jing Feng *et al.*. Study of the layout stability of multi-pass amplification system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(6): 653~656
朱启华,张小民,景 峰等. 多程放大系统总体光路的稳定性研究[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(6): 653~656
- 11 Wang Fang, Zhu Qihua, Xu Bing *et al.*. Pilot study of optical design in off-axis and multi-pass amplification systems[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**STBZ(12): 1843~1846
王 方,朱启华,徐 冰等. 离轴多程放大系统中光学设计的初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(12): 1843~1846