基于59单元自适应光学系统的脉冲板条固体激光光束净化研究

谭毅^{1,2}, 杨平^{1,2*}, 董理治^{1,2}, 王帅^{1,2}, 陈善球^{1,2}, 刘文劲^{1,2}, 向文鼎^{1,2,3}, 许冰^{1,2}

1. 中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209;

2. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

*联系人, E-mail: pingyang2516@163.com

收稿日期: 2016-09-11; 接受日期: 2016-09-28; 网络出版日期: 2017-02-17

中国科学院国防创新基金(编号: CXJJ-16M208)和中国科学院卓越青年科学家基金资助项目

摘要 光束质量是激光器的关键技术指标之一, 利用自适应光学系统可以显著提升激光器的输出光束质量. 本文研究了一种脉冲板条固体激光近场光强分布特性, 利用哈特曼传感器测量了波前像差并进行了波前复原, 修正了衍射极限倍数 β 值的计算方法. 介绍了变形镜校正波前像差的理论模型, 仿真计算了59单元变形镜对测量波前的校正情况, 仿真计算校正后的远场峰值光强提高了3.2倍, 衍射极限倍数 β 值提高了近3倍, 校正效果明显. 搭建了脉冲板条固体激光光束净化实验平台, 开展了验证性实验研究, 实验结果表明, 利用59单元变形镜的自适应光学系统可以有效提升脉冲板条固体激光的输出光束质量, 远场峰值光强提高了3倍, 衍射极限倍数 β 值提高了约3倍, 与仿真分析结果基本一致. 本文的研究结论为后续将脉冲固体激光光束质量提升到近衍射极限水平提供了参考.

关键词 脉冲板条固体激光, 光束净化, 光束质量

PACS: 41.85.Gy, 42.15.Dp, 42.15.Fr

1 引言

同时获得高功率高光束质量激光束一直是激光技术的发展目标^[1-3]. 但由于受到热效应、非线性效应等因素的影响, 在提高激光器输出功率的同时, 光束质量会逐渐变差, 最终失去应用价值^[4]. 因此, 如何提高激光器输出光束质量一直是激光领域的研究热点. 科研人员于20世纪70年代提出了一种板条固体激光

器^[5], 它利用板条的特殊结构, 让光束在板条内以“Z”字形的方式传播, 能有效减小板条长度和厚度两个方向的温度梯度对波前的影响, 从而使波前畸变减小. 但是随着输出功率的增加, 波前畸变还是会不断扩大, 导致光束质量持续下降. 一种被国内外各类板条固体激光系统广泛采用的有效手段是在激光器外部加入自适应光学系统来实时补偿畸变波前, 提高输出激光光束质量^[6-12]. 2009年美国诺格公司报道了105 kW板

引用格式: 谭毅, 杨平, 董理治, 等. 基于59单元自适应光学系统的脉冲板条固体激光光束净化研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 084207
Tan Y, Yang P, Dong L Z, et al. Active beam cleanup of pulsed slab laser based on 59-unit adaptive optics system (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 084207, doi: 10.1360/SSPMA2016-00383

条固体激光系统,它通过7条15 kW板条固体激光链路相干合成实现,每条激光链路均使用自适应光学系统进行光束净化,净化后单链路激光光束质量因子(BQ)在300 s的出光时间内基本稳定在1.58左右^[6]. 2014年中国科学院光电技术研究所杨平等^[7]报道了1.3 kW脉冲固体激光光束净化实验,衍射极限倍数 β 值从校正前的13.1提高到了2.3. 另外,国防科技大学、中国工程物理研究院等单位也都在进行板条固体激光光束净化方面的研究^[8,9].

目前板条固体激光光束净化大多针对连续激光器,且光束近场不存在被分割成几部分的情况. 相对于连续激光器,脉冲激光器光束净化系统必须具备良好的时间同步性,确保每个脉冲被测量到;更为特殊的是,本文讨论的脉冲板条固体激光器输出激光束的近场分离成上下两部分,有关这类激光器的光束净化,国内外还少有文献报道. 本文首先介绍了一种脉冲板条固体激光光束净化实验系统,然后分析了脉冲板条固体激光的光束特性,在此基础上进行了自适应光学校正的仿真计算和讨论,最后介绍了该类激光器的光束净化实验验证过程,并分析了实验结果.

2 脉冲板条固体激光光束净化实验系统

脉冲板条固体激光光束净化实验系统原理如图1所示,系统由脉冲固体激光器、扩束整形装置和光束净化分系统三部分构成. 其中光束净化分系统包含变形镜、倾斜镜、复合传感器、波前控制器等. 脉冲板条固体激光器输出的激光束首先经过扩束整形系统,使激光束的近场尺寸与变形镜口径匹配,然后利用两块反射镜将激光束导入光束净化分系统. 在光束净化分系统内,激光束依次经过倾斜镜和变形镜,携带波前信息的少部分激光透过M3进入复合传感器,以探测波前像差,同时监测近场和远场状态. 控制策略选用直接斜率法. 计算机1和计算机2分别为监测计算机和控制计算机. 电控部分采用基于Linux的实时操作系统,控制系统从激光器获得脉冲触发信号,使自适应光学系统与激光器严格同步,确保每个脉冲的探测和校正.

光束净化分系统的波前校正器采用59单元连续表面分立驱动的压电变形镜,波前探测器为132个子孔径单元的夏克-哈特曼传感器,变形镜驱动器的空间分布,以及与哈特曼传感器子孔径的对应关系如图2所示.

示. 实验系统主要参数如表1所示.

图1 (网络版彩图)实验系统原理图

Figure 1 (Color online) Experimental setup.

图2 (网络版彩图)哈特曼传感器子孔径(红色线方孔)与变形镜驱动器(黑色正六边形)的空间对应关系图

Figure 2 (Color online) The relationship of HS sub-aperture (red square hole) and DM actuator (black regular hexagon).

表1 实验系统主要参数列表

Table 1 The parameters of experimental setup

器件名称	参数
激光器	波长1064 nm
	重复频率400 Hz
	口径50 mm×50 mm
变形镜	驱动器间距8 mm
	驱动器行程量±2 μm/±400 V
	有效子孔径数132
哈特曼传感器	采样频率400 Hz
	单个子孔径对应像素数24 pixel×24 pixel
	焦距2 m
远场监测系统	位深12位
	像素尺寸7.4 μm

3 脉冲板条固体激光光束特性

3.1 光束近场分布

由于脉冲板条固体激光器谐振腔的独特设计, 输出的激光束分离成上下两部分, 其近场分布示意图如图3(a)所示, 实际测量得到的近场光强分布如图3(b)所示. 在高度方向, 上部、中部和下部的尺寸分别为12, 7和16 mm, 激光束近场宽度为33 mm.

3.2 波像差特性

在开展光束净化实验之前, 先进行了脉冲板条固体激光波前像差的测量工作. 测量时, 将复合传感器对准激光器出口, 让激光束不经过任何镜片直接进入. 哈特曼波前探测器内置于复合传感器, 其相关参数如表1所示, 探测到的子孔径光斑阵列如图4所示, 子孔径内的十字叉标记了子光斑质心位置.

由于光斑分离成上下两部分, 因此在利用斜率数据复原波前时, 首先将上下两部分分别复原, 然后再拼接成激光束的整体波前. 由于每部分光斑为矩形孔径, 因此波前复原时选用在单位正方形内正交的Legendre多项式. 一维Legendre多项式的表达式如下:

$$L_n(x) = \sum_{l=0}^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} \frac{(-1)^l (2n-2l)!}{2^n l! (n-l)! (n-2l)!} x^{n-2l}, \quad (1)$$

其中, n 为Legendre多项式阶数.

累加上限的计算方法为

$$\left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor = \begin{cases} \frac{n}{2}, & n \text{ is even,} \\ \frac{n-1}{2}, & n \text{ is odd.} \end{cases} \quad (2)$$

Legendre多项式在 $[-1, 1]$ 区间满足如下关系:

$$\int_{-1}^1 L_m(x) L_n(x) dx = \begin{cases} 0, & (n \neq m), \\ \frac{2}{2n+1}, & (n = m). \end{cases} \quad (3)$$

为了使同阶模式乘积积分为1, 在Legendre多项式前乘以归一化因子, 得到如下模式表达式:

$$L'_n(x) = \sqrt{\frac{2n+1}{2}} L_n(x). \quad (4)$$

由于波前相位是二维空间分布, 在分析波前时, 将波面在 x 和 y 两个方向的空间变化独立考察, 因此, 基于Legendre多项式的波前二维模式表达式为

$$P_{\text{order}}(x, y) = L'_m(x) L'_n(y). \quad (5)$$

模式阶次order与 m 和 n 关系的数学表达式为

$$\text{order} = \frac{(m+n)(m+n+1)}{2} + m + 1. \quad (6)$$

具体对应关系如表2.

板条固体激光波前像差一般以低阶为主, 因此在利用模式复原算法复原波前时选用前25阶勒让德多项式并去除平移像差, 模式法复原波前的具体方法可参考文献[13], 此处不再赘述. 通过计算获得上、下两部分光斑的各阶模式系数, 分别用 $a_1, a_2, \dots, a_{25}$ 和 $b_1, b_2, \dots, b_{25}$ 表示. 设中间无光部分的相位为0, 若以近场光斑中心为坐标原点建立坐标系(如图3(a)), 那么激光束的整体波前相位可表示为

图3 (网络版彩图)脉冲板条固体激光光束近场分布. (a) 近场分布示意图; (b) 测量得到的近场分布图

Figure 3 (Color online) Near field of pulsed slab laser. (a) Sketch map; (b) measured result.

图4 (网络版彩图)波前测量哈特曼子孔径光斑阵列图

Figure 4 (Color online) The sub-aperture spot array of HS.

表2 模式阶数与 m 和 n 的关系表Table 2 The relationship of mode order and m and n

m	n				
	0	1	2	3	...
0	P_1	P_2	P_4	P_7	...
1	P_3	P_5	P_8	...	...
2	P_6	P_9	...	...	...
3	P_{10}	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...

$$\varphi_r(x, y) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{25} a_i P_i \left(\frac{x}{16.5}, \frac{y-11.5}{6} \right) - \bar{\varphi}_1, & (5.5 \leq y \leq 17.5), \\ 0, & (-1.5 \leq y \leq 5.5), \\ \sum_{j=1}^{25} b_j P_j \left(\frac{x}{16.5}, \frac{y+9.5}{8} \right) - \bar{\varphi}_2, & (-17.5 \leq y \leq -1.5), \end{cases} \quad (7)$$

式中 x 的取值范围均为 $[-16.5, 16.5]$, $\varphi_r(x, y)$ 为激光束波前相位, $\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2$ 分别为上下两部分光斑波像差的算术平均值, 即

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}_1 &= \frac{\int_{-16.5}^{16.5} \int_{5.5}^{17.5} \sum_{i=1}^{25} a_i P_i \left(\frac{x}{16.5}, \frac{y-11.5}{6} \right) dx dy}{33 \times 12}, \\ \bar{\varphi}_2 &= \frac{\int_{-16.5}^{16.5} \int_{-17.5}^{-1.5} \sum_{j=1}^{25} b_j P_j \left(\frac{x}{16.5}, \frac{y+9.5}{8} \right) dx dy}{33 \times 16}. \end{aligned} \quad (8)$$

根据前面介绍的理论基础, 通过数值计算, 得到复原波前像差如图5所示. 经计算, 波前像差的rms值为 0.31λ , PV值为 2.3λ . 从图5可以看出, 脉冲板条固体激光束的像差主要集中在高度方向, 像差形状类似于马鞍形, 宽度方向的像差较小且变化较平缓, 所以在后面的校正实验中应特别注意高度方向像差的校正. 由于高度方向用于波前复原的有效子孔径数目只有3排, 波前复原精度相对较差, 因此在光斑边缘出现了像差剧烈变化的情况.

3.3 光束质量评价

常用的光束质量评价指标有 M^2 因子、桶中功率、衍射极限倍数 β 因子、斯特列尔比等^[14,15], 可根据不同应用场合选用合适的指标. 在大部分激光领域, 主要关心远场能量集中度, 因此一般采用衍射极限倍数 β 因子来评价光束质量^[16], 其定义为

图5 (网络版彩图)复原波前像差图

Figure 5 (Color online) The aberrations distribution by wavefront reconstruction.

$$\beta = \frac{\theta}{\theta_0}, \quad (9)$$

式中 θ_0 为理想光束远场发散角, θ 为被测实际光束的远场发散角. 脉冲板条固体激光近场光强的特殊分布, 导致了两个方向的发散角不一致, 而且中央主瓣包含的能量也不是圆形光束对应的83.8%, 因此需要对 β 因子的定义作一些修正.

修正后的 β 因子计算公式为

$$\beta = \sqrt{\frac{\theta_x \cdot \theta_y}{\theta_{0x} \cdot \theta_{0y}}}, \quad (10)$$

其中, θ_{0x} 和 θ_{0y} 为图3(a)所示近场在无像差情况下对应远场在 x 方向和 y 方向一级暗环的发散角, θ_x 和 θ_y 满足如下两个关系式:

$$\frac{\theta_x}{\theta_y} = \frac{\theta_{0x}}{\theta_{0y}}, \quad (11)$$

$$\frac{\int_{-f\theta_x}^{f\theta_x} \int_{-f\theta_y}^{f\theta_y} I(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) dx dy} = \frac{\int_{-f\theta_{0x}}^{f\theta_{0x}} \int_{-f\theta_{0y}}^{f\theta_{0y}} I_0(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I_0(x, y) dx dy}, \quad (12)$$

式中, f 为系统焦距, $I(x, y)$ 为实际光束的远场光强

分布(某种激光束的远场分布如图6(b)所示), $I_0(x,y)$ 为图3(a)所示近场在无像差情况下对应的远场光强分布(如图6(a)所示), $I(x,y)$ 和 $I_0(x,y)$ 的坐标原点为相应光斑质心. 针对本文讨论的激光束, 可计算出(12)式的比值为60%. 式(12)用到了如下三角函数近似(当 θ 较小时):

$$\tan\theta \approx \theta. \quad (13)$$

若已知理想远场光强分布 $I_0(x,y)$ 、实际光强分布 $I(x,y)$ 和系统焦距 f , 就可通过式(10)–(12)计算出衍射极限倍数 β 因子. 图6给出了理想远场光强分布、某种实际远场光强分布、以及矩形桶的桶中功率变化曲线. 矩形桶的桶中功率的计算公式为

$$\text{PIB} = \frac{\int_{-\tau f \theta_{0x}}^{\tau f \theta_{0x}} \int_{-\tau f \theta_{0y}}^{\tau f \theta_{0y}} I'(x,y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I'(x,y) dx dy}, \quad (14)$$

式中, τ 为调节矩形桶大小的变量因子, $I'(x,y)$ 为远场光强分布, 坐标原点为光斑质心. PIB随变量因子 τ 的变化曲线如图6(c). 不难看出, 当PIB值等于60%时对应的 τ 值即为衍射极限倍数 β 因子, 即

$$\beta = \tau \Big|_{\text{PIB}=60\%}. \quad (15)$$

图6 (网络版彩图) β 值计算方法示例图. (a) 理论远场和基准矩形桶; (b) 实验远场和相似矩形桶; (c) PIB曲线

Figure 6 (Color online) Example of β computing. (a) Theoretic far field and basic rectangular bucket; (b) experimental far field and homothetic rectangular bucket; (c) the curve of PIB.

图6(a)和(b)所示矩形框的长宽分别为 $2f\theta_{0x}$, $2f\theta_{0y}$ 和 $2f\theta_x$, $2f\theta_y$, 矩形框内的能量占总能量的60%. 修正后的 β 因子依然大于等于1, 且数值越小, 能量集中度越高, 光束质量越好.

4 光束净化仿真分析与实验研究

4.1 理论基础

变形镜的单个驱动器对面型的影响可通过影响函数表示, 影响函数的定义为: 当变形镜仅由单一驱动器推动时, 镜面所产生的形状, 一般采用高斯模型描述^[17].

$$I_n(x,y) = \exp\left[(\ln\omega)\left(\frac{\sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_n)^2}}{b}\right)^\alpha\right], \quad (16)$$

式中, $I_n(x,y)$ 表示影响函数, x, y 为镜面坐标, x_n, y_n 为驱动器位置坐标, b 为驱动器间距, α 为高斯指数, ω 为交连值. 交连值定义为一个驱动器工作时, 相邻驱动器中心的变形量与工作驱动器中心最大变形量的比值.

本文讨论的自适应光学系统是基于连续表面分立驱动的压电变形镜, 一般认为采用这种变形镜的自适应光学系统是一个空间线性系统, 即在波前校正过程中, 从变形镜的单个影响函数到镜面面形, 再到对被校正波前的补偿都满足线性叠加原理. 因此, 变形镜产生的整体形变可表示为

$$M(x,y) = \sum_{n=1}^N A_n I_n(x,y), \quad (17)$$

式中, $M(x,y)$ 表示变形镜面形, N 为驱动器个数, A_n 为第 n 个驱动器的权重系数, 正比于施加于该驱动器的电压. 待校正波前 $\varphi(x,y)$ 一般由波前传感器测量得到, 变形镜的校正过程就是产生与 $\varphi(x,y)$ 共轭的面形, 即理想情况下 $M(x,y)$ 与 $\varphi(x,y)$ 应满足如下关系式:

$$\varphi(x,y) + M(x,y) = 0. \quad (18)$$

联立式(16)–(18), 通过最小二乘法可求解出驱动器的权重系数 A_n , 此时的 $M(x,y)$ 是最小二乘意义下对待校正波前的最佳拟合共轭面形. 校正的残余误差 $\varphi_e(x,y)$ 可通过式(19)求得

$$\varphi_e(x,y) = \varphi(x,y) - M(x,y). \quad (19)$$

4.2 仿真计算

在3.2节, 我们获得了脉冲板条固体激光的波前像差, 虽然高度方向的复原精度不高, 但依然在一定程度上反应了波像差的变化趋势. 因此, 利用4.1节的变形镜补偿原理来仿真计算对3.2节波像差的校正效果, 可以从理论上验证59单元自适应光学系统对该脉冲板条固体激光的补偿能力.

通过计算, 得到校正后的残余波前像差如图7所示. 残余像差的rms值为 0.12λ , 降低了60%, PV值为 1.5λ , 降低了30%, 整体波前像差和局部大像差均得到了一定补偿. 校正前后对应的远场光斑如图8所示, 校正后的光斑能量更加集中, 能量峰值提高了3.2倍. 利用3.3节定义的 β 值计算公式得到校正前后衍射极限倍数分别为7.8和2.8, 光束质量提升了近3倍. 仿真校正表明, 采用本文设计的自适应光学校正系统, 可以显著提高脉冲板条固体激光的输出光束质量.

4.3 实验验证及结果分析

根据第2节的系统原理图, 搭建了实验光路, 实验

图7 (网络版彩图) 仿真计算校正后的残余波前像差
Figure 7 (Color online) The residual aberration after correction by numerical analysis.

图8 (网络版彩图) 仿真计算校正前(a)后(b)的远场光斑图像
Figure 8 (Color online) Far field of before (a) and after (b) correction by numerical analysis.

系统的光束净化部分如图9所示. 实验系统的主要参数已于表1列出. 在闭环校正前, 首先测量了自适应光学系统的响应矩阵 $\mathbf{R}$, 确定变形镜驱动器与哈特曼传感器子孔径的对应关系. 闭环控制方法采用直接斜率法. 直接斜率法通过如下公式获取变形镜驱动器电压:

$$\mathbf{V} = \mathbf{R}^+ \cdot \mathbf{G}, \quad (20)$$

式中, $\mathbf{V}$ 为电压向量, $\mathbf{R}^+$ 为响应矩阵的广义逆矩阵, $\mathbf{G}$ 为哈特曼传感器测量得到的斜率向量. 式(20)的具体推导过程可参见文献[18].

根据哈特曼传感器斜率数据复原出校正后的残余波前像差如图10所示, 残余像差的PV值和rms值分别为 1.3λ 和 0.13λ , 与仿真计算结果基本一致. 远场监测系统采集到的校正前后远场光斑如图11所示, PIB曲线如图12所示. 图11和12显示, 峰值光强提高了3倍,

图9 (网络版彩图) 实验系统图
Figure 9 (Color online) The experimental setup.

图10 (网络版彩图) 实验校正后的波前像差
Figure 10 (Color online) The residual aberrations after correction by experiment.

图 11 (网络版彩图)实验校正前(a)后(b)远场光斑图
Figure 11 (Color online) Far field of before (a) and after (b) correction by experiment.

图 12 (网络版彩图)PIB曲线图
Figure 12 (Color online) The curve of PIB.

衍射极限倍数 β 值从校正前的6.5提高到校正后的2.2,提升了约3倍。虽然本文讨论的脉冲板条激光光束的近场为上下两部分的特殊分布,但校正结果已与诺格公司和杨平等人报道的近场连续分布的板条激光净化结果基本相当。实验获得的光束质量好于4.2节仿真计算结果,这是由于波前复原时高度方向的复原误差较大,校正前高度方向的实际波前像差好于图5所示的复原结果。

实验结果表明,采用59单元变形镜的自适应光学系统可以成倍提升脉冲板条固体激光的光束质量,但净化结果离衍射极限还有一定差距,其误差来源主要有两个方面:一是哈特曼探测精度不够,不能探测高空间频率的像差类型;二是变形镜驱动器的行程量和空间分布频率有限,无法补偿脉冲板条固体激光存在的局部大像差及高阶像差。

5 结论

分析了一种脉冲板条固体激光光束特性,发现其近场由上下两部份组成,针对这种近场光强分布修正了衍射极限倍数 β 因子的计算方法;利用哈特曼传感器测量了波前像差并进行了波前复原,测量结果表明脉冲板条固体激光波前像差主要存在于高度方向,宽度方向像差较小且变化平缓。根据变形镜校正波前像差的理论模型,仿真计算了59单元变形镜对测量波前的校正情况,仿真计算校正后的远场峰值光强提高了3.2倍,衍射极限倍数 β 值提高了近3倍,校正效果明显。搭建了脉冲板条固体激光光束净化实验平台,开展了验证性实验研究,实验结果表明,利用59单元变形镜的自适应光学系统可以显著提升脉冲板条固体激光的输出光束质量,远场峰值光强提高了3倍,衍射极限倍数 β 值提高了约3倍,与仿真校正结果基本一致。通过本文的研究和分析,已基本掌握了这类脉冲板条固体激光的波前像差特性,获得了与国内外水平相当的实验校正结果,为后续将光束质量提升到近衍射极限水平提供了参考。下一步将分析局部高阶像差的成分,设计更高空间分辨力的自适应光学系统,完成对该脉冲板条固体激光器近衍射极限输出的校正。

致谢 感谢中国科学院理化技术研究所郭亚丁、王宝山、李帅在实验过程中给予的配合与帮助。

参考文献

- Chen J B, Guo S F. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers (in Chinese). Chin J Lasers, 2013, 40: 0602006 [陈金宝, 郭少峰. 高能固态激光器技术路线分析. 中国激光, 2013, 40: 0602006]
- Michael J L, John J W. US army high energy laser (HEL) technology program. In: Proceedings of SPIE 8187, Technologies for Optical Countermeasures VIII. SPIE, 2011. 8187
- Glen P P, Michael A M, Matthew G. High energy laser weapons: Technology overview. In: Proceedings of SPIE 5414, Laser Technologies for Defense and Security. SPIE, 2004. 5414
- Peng Q J, Xu Z Y. Relationship between beam quality and power for solid state laser with high average power (in Chinese). High Power Laser

- Particle Beams, 2011, 23: 1707–1712 [彭钦军, 许祖彦. 高平均功率固体激光功率和光束质量关系研究进展. 强激光与粒子束, 2011, 23: 1707–1712]
- 5 William S M, Joseph P C. Multiple internal reflection face-pumped laser. US Patent, US 3633126, 1972
- 6 Stuart J M, Charles P A, Hagop I, et al. 100-kW coherently combined Nd: YAG MOPA laser array. In: Proceedings of Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (CD), Optical Society of America. San Jose, 2009. FThD2
- 7 Yang P, Wang S, Dong L Z, et al. Adaptive beam cleanup of a 1.3 kW pulsed slab amplifier. In: Proceedings of 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose: IEEE, 2014. JTu4A.125
- 8 Wang S H, Liang Y H, Ma H T, et al. Beam cleanup experiments for master oscillator power amplifier laser system by adaptive optics based on stochastic parallel gradient descent algorithm (in Chinese). Chin J Lasers, 2009, 36: 2763–2768 [王三宏, 梁永辉, 马浩统, 等. 随机并行梯度下降自适应光学对主振荡功率放大器激光系统的光束净化实验. 中国激光, 2009, 36: 2763–2768]
- 9 Xiang R J, Zhang K, Wu J, et al. Beam quality active control of a slab MOPA solid state laser. In: Proceedings of XX International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications 2014. Chengdu, 2014. 9255
- 10 Lei X, Wang S, Yan H, et al. Double-deformable-mirror adaptive optics system for laser beam cleanup using blind optimization. Opt Express, 2012, 20: 22143–22157
- 11 Lei X, Xu B, Yang P, et al. Beam cleanup of a 532-nm pulsed solid-state laser using a bimorph mirror. Chin Opt Lett, 2012, 10: 021401
- 12 Yang P, Ning Y, Lei X, et al. Enhancement of the beam quality of non-uniform output slab laser amplifier with a 39-actuator rectangular piezo-electric deformable mirror. Opt Express, 2010, 18: 7121–7130
- 13 Xiang R J. Study on Active Control of Beam Quality in High-Power Solid-State Slab Laser System (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Mianyang: China Academy Of Engineering Physics, 2014. 19–21 [向汝建. 高能固体板条激光器光束质量主动控制技术研究. 博士学位论文. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2014. 19–21]
- 14 Liu Z J, Zhou P, Xu X J. Study on universal standard for evaluating high energy beam quality (in Chinese). Chin J Lasers, 2009, 36: 773–778 [刘泽金, 周朴, 许晓军. 高能激光光束质量通用评价标准的探讨. 中国激光, 2009, 36: 773–778]
- 15 Siegman A E. How to (maybe) measure laser beam quality. In: Proceedings of Tutorial presentation at the Optical Society of America Annual Meeting. Long Beach, 1997. 1–18
- 16 Ross T S, Latham W P. Appropriate measures and consistent standard for high energy laser beam quality. J Directed Energy, 2006, 2: 22–58
- 17 Zhou R Z. Adaptive Optics (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 1996 [周仁忠. 自适应光学. 北京: 国防工业出版社, 1996]
- 18 Jiang W H, Li H G. Hartmann-shack wave-front sensing and wave-front control algorithm. SPIE, 1990, 1271: 82–93

Active beam cleanup of pulsed slab laser based on 59-unit adaptive optics system

TAN Yi^{1,2}, YANG Ping^{1,2*}, DONG LiZhi^{1,2}, WANG Shuai^{1,2}, CHEN ShanQiu^{1,2},
LIU WenJin^{1,2}, XIANG WenDing^{1,2,3} & XU Bing^{1,2}

¹ Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

² Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Beam quality is one of the key technical targets in the high-power laser system, and it can be dramatically improved by using adaptive optics. In this paper, a research on the near field distribution of the pulsed slab laser has been carried out. A Shack Hartmann wavefront sensor was used to measure the aberrations, and the wavefront reconstruction was accomplished afterwards. Because of the special near field distribution, the diffraction limited factor β has been revised for better describing beam quality. The theory model of the correction of aberrations with deformable mirror (DM) was introduced. Based on the theory model, the numerical analysis of the correction ability of DM with 59 actuators and correction of measured wavefront have been carried out, the result showed that the peak value of far field was improved 3.2 times, and the beam quality was increased 3 times. An experimental setup for beam cleanup of pulsed laser has been established. A demonstrated experiment was carried out on this platform. The result of the experiment indicated that the output beam quality of the pulsed slab laser can be validly improved by beam cleanup using adaptive optics system with 59-actuator DM. Specifically, the peak value of far field has been raised by 3 times, and the factor β has been increased by 3 times as well, which was mostly in accordance with the numerical analysis. The conclusion of this paper offered reference for the achievement of near diffraction limited beam quality in the future.

pulsed slab laser, beam cleanup, beam quality

PACS: 41.85.Gy, 42.15.Dp, 42.15.Fr

doi: [10.1360/SSPMA2016-00383](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00383)