

非稳腔薄片激光器腔内像差组合式主动校正技术

李国会^{1,2*}, 徐宏来^{1,2}, 吴晶^{1,2}, 杜应磊^{1,2}, 向汝建^{1,2}, 周志强^{1,2},
于益^{1,2}, 胡平^{1,2}, 向振佼^{1,2}, 张越^{1,2}

¹中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

²中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 介绍了非稳腔薄片激光器腔内像差产生的原因及特点,提出了采用离焦校正变形镜和二维变形镜组合的方式校正腔内像差的主动校正技术,在仿真和优化设计基础上,研制的离焦校正变形镜动态范围为 18.52 μm (峰谷值),二维变形镜镀膜后静态面形不大于 0.04 μm (均方根误差),单驱动器动态范围大于 6 μm (峰谷值),交连值在 30%~35%范围内。将两种变形镜放置于激光器腔内进行主动闭环校正,经过离焦校正后光束质量改善至 19.5,再经过二维变形镜校正后优化至 6.5,波前像差由 1.504 μm (均方根误差)减小至 0.185 μm (均方根误差),光束质量提高了 3 倍,均方根误差值提高了 8.1 倍。实验结果证明,组合式校正模式可以有效地改善非稳腔薄片激光器腔内像差,其技术路线是可行的。

关键词 激光器;非稳腔;动态范围;光束质量;闭环校正

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1001004

Active Correction of Intracavity Aberration Combination in Unstable Resonator Thin-Disk Laser

Li Guohui^{1,2*}, Xu Honglai^{1,2}, Wu Jing^{1,2}, Du Yinglei^{1,2}, Xiang Rujian^{1,2},
Zhou Zhiqiang^{1,2}, Yu Yi^{1,2}, Hu Ping^{1,2}, Xiang Zhenjiao^{1,2}, Zhang Yue^{1,2}

¹Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The causes and characteristics of the intracavity aberrations in unstable thin-disk laser are introduced. And an active correction technique is proposed to correct the aberration in the cavity by the combination of defocused and two-dimensional(2D)deformation mirrors. Based on the simulation and optimization design, the dynamic range of the defocus correction deformation mirror can reaches to 18.52 μm (peak-valley value). The static surface of the 2D mirror is less than 0.04 μm (root mean square error), the single driver dynamic range greater than 6 μm (peak-valley value), and the coupling coefficient is in the range of 30% to 35%. These two kinds of deformable mirrors are placed in the laser cavity for active closed-loop correction. The beam quality was improved to 19.5 after defocusing correction, and then improved to 6.5 after 2D deformable mirror correction. The wavefront aberration is reduced from 1.504 μm (root mean square error) to 0.185 μm (root mean square error). The beam quality increased by 3 times and the root mean square error increased by 8.1 times. Experimental results show that the combined correction mode can effectively improve the intracavity aberration in unstable thin-film laser, and its technical route is feasible.

Key words lasers; unstable resonator; dynamic range; beam quality; closed-loop correction

OCIS codes 140.3460; 080.1010

收稿日期: 2020-05-04; 修回日期: 2020-06-04; 录用日期: 2020-06-19

* E-mail: hitliguohui@163.com

1 引 言

非稳腔薄片激光器是一种由激光二极管泵浦的固体激光器,其增益介质具有长宽比大、散热路径短、温度呈准一维分布等特点^[1-2],在高效热管理措施下,可以获得较高的功率输出和较好的光束质量,故近年来获得了快速的发展,在工业、医疗和科研等领域得到了广泛的应用^[3-4]。Lawrence Livermore 国家实验室的热容激光器和 Boeing 公司的 Yb:YAG 薄片激光器均采用非稳定腔模式实现了平均功率 10 kW 以上的激光输出^[5-7],目前正在向 100 kW 级攻关。薄片激光器随着输出功率的提升,腔内高能量密度的光场会导致腔镜受热发生形变,该热畸变会严重降低激光器输出的光束质量并影响激光器的运行效率^[8-9],同时激光介质内部出现的热沉积以及热梯度将导致波前畸变的产生,同样会造成光束质量的退化^[10]。为了解决热畸变或热沉积问题,获得较好的光束质量,主要措施包括腔内被动像差补偿、腔镜主动冷却^[9]、优化冷却方式提高冷却效率、采取腔内自适应光学技术对腔内像差进行主动校正等^[11]。被动校正措施无法对像差进行实时控制,而激光器出光过程中,不同功率下产生不同像差,对于这种像差随时间变化较快的光学系统,采用自适应光学技术进行腔内主动补偿,是控制像差改善输出激光光束质量的不二选择。非稳腔内自适应主动校正理论研究始于 20 世纪 80 年代^[12-13],随后得到了逐步发展。2004 年 Lawrence Livermore 国家实验室采用腔内自适应校正将

10 kW 激光的光束质量控制到 3 倍衍射极限^[11,14]以内。本文针对自主研发的非稳腔薄片激光器腔内像差的特点,开展腔内主动校正技术研究,根据像差特点,针对性地研究了离焦变形镜校正激光器功率加载过程中产生的离焦像差,并分析了高分辨率变形镜校正激光介质热畸变及腔镜热变形产生的波前畸变,即采用离焦变形镜和二维变形镜组合的方式校正非稳腔激光器腔内像差,提高了输出激光的光束质量和能量集中度。

2 薄片激光器腔内像差特点

采用图 1 所示光路对单薄片畸变特性进行测试,测试时以薄片未泵浦时的静态像差为参考,主要测试薄片的动态波前畸变特性,便于后续分析与主动校正。采用固定泵浦电流,分步提高泵浦重复频率的方式测试动态波前畸变,并分析波面的像差模式。

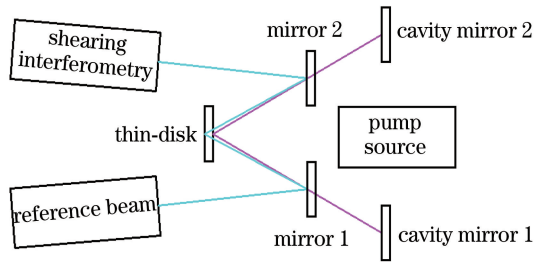


图 1 单薄片畸变特性测量示意图

Fig. 1 Schematic of the thin-disk distortion measurement

图 2 是未泵浦时薄片静态波前模式分析,图 3 是不同泵浦功率下的薄片畸变的模式分析和畸变量模式分析。

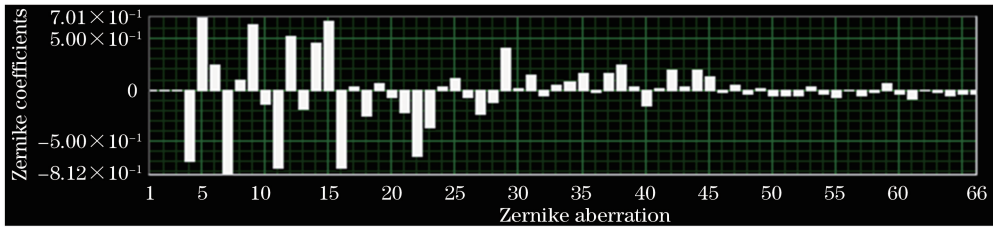


图 2 薄片静态波前模式分析

Fig. 2 Static wavefront mode analysis of the thin-disk

测试结果表明,薄片的静态波前像差中,高阶成分较多;动态波前畸变中,离焦量为最主要分量,在去除离焦后,单薄片动态波前畸变的峰谷(PV)值可降至原来的一半以下。此外,在除离焦外的低阶像差中, 0° 像散为重要成分之一。

多薄片串接之后,薄片激光器的像差构成与单薄片类似,主要成分为离焦像差,且幅值有所增大,其他各种低阶像差和高阶像差成分掺杂在一起,共

同构成薄片激光器腔内像差。像差在腔内传输过程中,会逐级放大,过大的像差制约了输出功率的提升。同时,腔内为实心光斑,而经过刮刀镜后为环状光斑,对于自适应闭环校正而言,实心光斑比环状光斑更有优势。鉴于薄片激光器的上述像差特点,提出了在激光器腔内采用离焦校正变形镜对激光器的离焦量进行主动校正,其残差采用二维变形镜校正,即腔内像差采用组合式主动校正技术,从而改善输

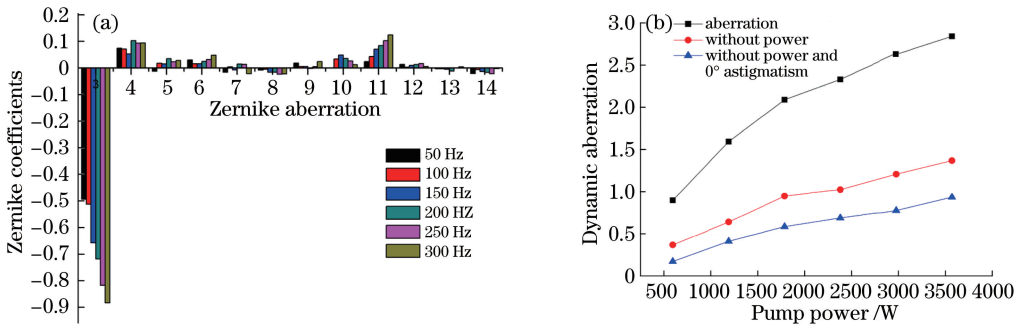


图 3 不同泵浦功率下模式分析。(a)畸变模式分析;(b)畸变量模式分析

Fig. 3 Mode analysis at different pump powers. (a) Distortion mode analysis; (b) distortion pattern analysis

出激光的光束质量。

3 离焦校正变形镜研制

离焦校正变形镜的有效使用口径为 $\Phi 60$ mm, 波前校正范围为 $\pm 15 \mu\text{m}$ 。镜面为圆形连续镜面, 材质为熔石英, 采用压电陶瓷作为驱动器, 循环冷却水作为冷却介质, 对镜面进行主动冷却, 减小镜面热畸变引入的额外像差。圆心处设置 1 个驱动器, 圆

周均匀分布 4 个驱动器, 玻璃镜片粘接在金属框上^[15]。图 4(a)是驱动器布局模型, 图 4(b)是仿真分析网格图。

离焦校正变形镜研制过程中需要对驱动器的驱动能力、镜片厚度、筋板厚度进行仿真, 并通过优化设计和多次迭代, 使仿真结果不仅满足设计输入, 同时, 尽量避免额外像差的输入, 减小二维变形镜的工作量。

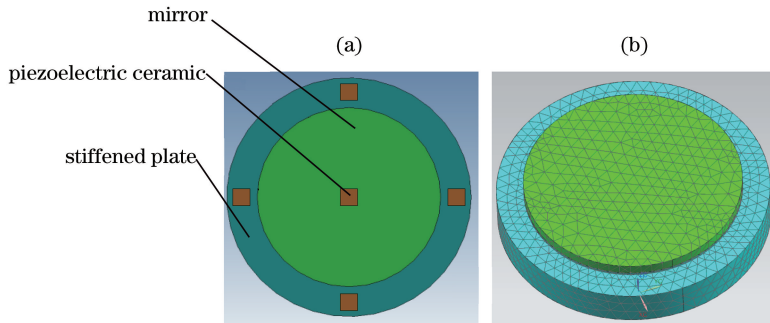


图 4 驱动器布局及仿真。(a)驱动器布局图;(b)仿真分析网格图

Fig. 4 Driver layout and simulation. (a) Driver layout diagram; (b) simulation analysis grid

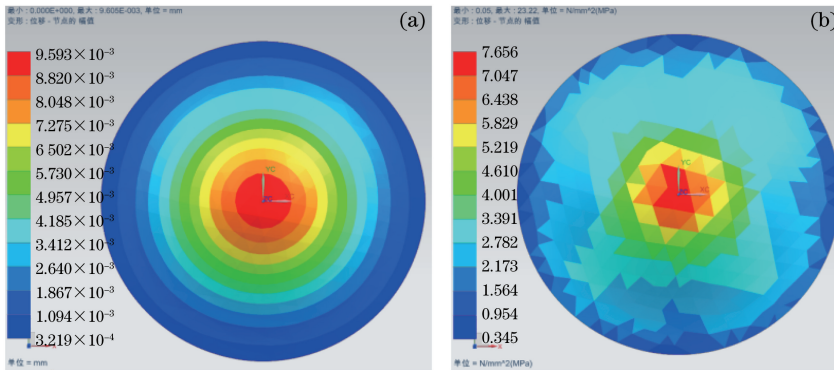


图 5 镜片产生的应力和应变。(a)应变;(b)应力

Fig. 5 Stress and strain caused by the lens. (a) Strain; (b) stress

在优化设计时, 根据驱动器的驱动能力和设计输入的技术指标仿真分析镜片厚度, 其形变量应满足校正量的需求; 随后仿真分析筋板的厚度, 重点考

察镜片产生的形变分量是否主要为离焦量, 从而确定筋板厚度。通过多轮仿真和优化设计, 确定了镜片厚度为 5 mm, 此时应变为 $9.59 \mu\text{m}$, 应力为

7.65 MPa,从动态范围来看,仿真结果为设计输入并留有余量。图 6(a)是面形响应曲线,图 6(b)是镜面圆周上产生的应变,在有效使用区域内,形变量是

同心圆环,其他像差可忽略不计。

在仿真基础上,开展了离焦校正变形镜设计与研制,图 7 是对研制的离焦变形镜进行性能测试。

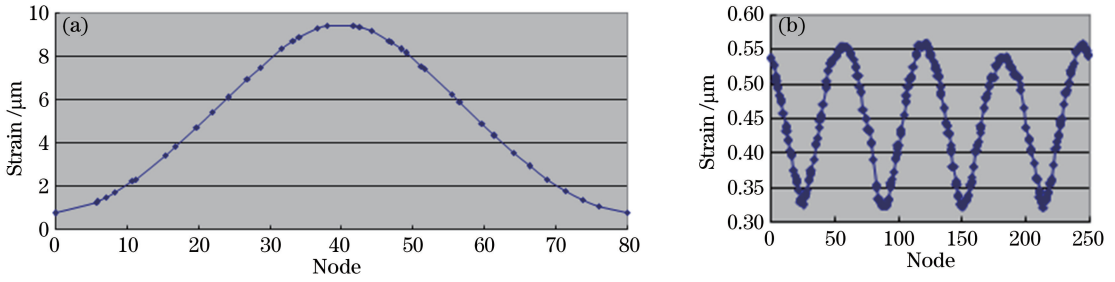


图 6 仿真结果。(a)面形响应曲线;(b)圆周上产生的应变

Fig. 6 Simulation results. (a) Surface response curve; (b) strain on the circumference

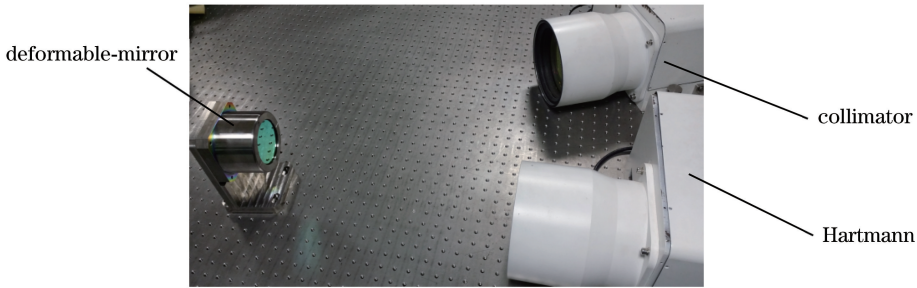


图 7 测试光路

Fig. 7 Testing optical path

根据离焦校正变形镜的使用特点,主要对变形镜的动态范围内进行测试,同时开展模式分析,判断离焦变形镜像差项的主要成分。给离焦变形镜中心处的驱动器加载电压,由哈特曼测试系统检测面形状态,并由分析软件进行 Zernike 模式分析。图 8

是 100 V 电压下的面形响应和 Zernike 模式系数。从图 8 可以看出,镜面形变量分别为 $9.26 \mu\text{m}$,其结果跟仿真分析基本一致,同时,从 Zernike 模式系数来看,主要像差是离焦像差。

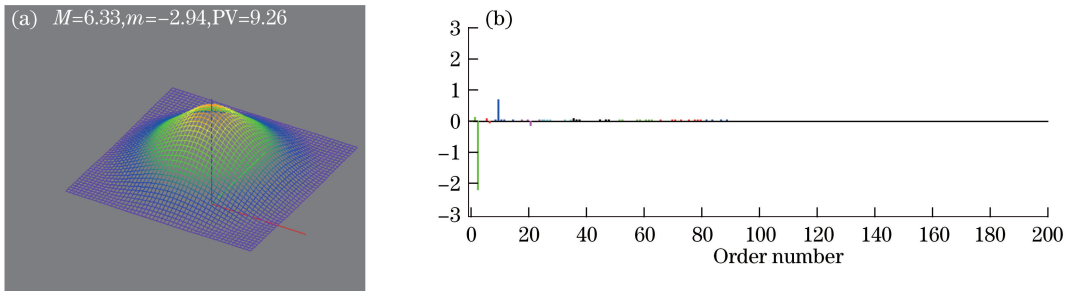


图 8 Zernike 模式分析。(a) 100 V 电压下的面形响应;(b) Zernike 模式系数

Fig. 8 Zernike pattern analysis. (a) Surface response with 100 V voltage; (b) Zernike model coefficient

4 二维变形镜研制

离焦校正后的残差由二维变形镜进行校正,残余像差 PV 值不大,但带有一定的高阶成分,因此,在设计二维变形镜时,需要综合考虑驱动器的排布、交连值的大小和动态范围等技术指标的匹配关系。

二维变形镜的输入指标为有效口径为 $\Phi 60 \text{ mm}$,动态范围大于 $3 \mu\text{m}$,驱动器间距不大于 8.5 mm 。图 9(a)是驱动器正六边形排布图;图 9(b)是对单个驱动器的驱动能力仿真结果,应变为 $4.01 \mu\text{m}$,同样留有余量;图 9(c)是交连值仿真结果,通过计算可知,交连值约为 34.8% 。

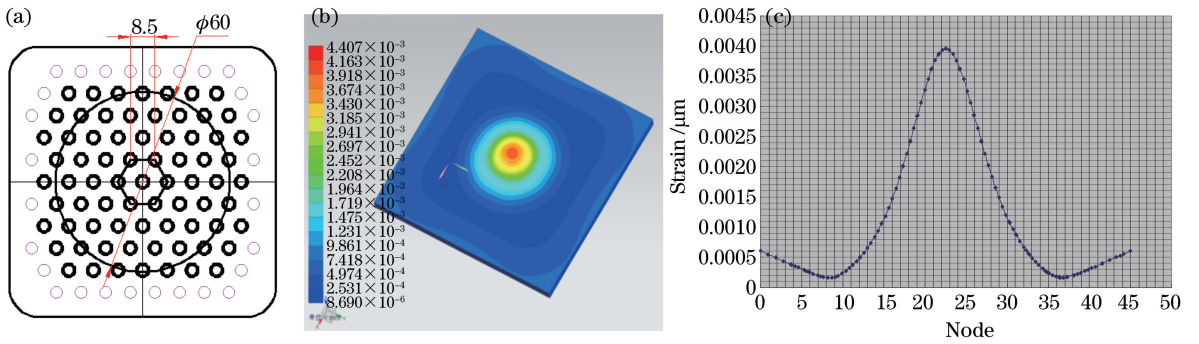


图 9 驱动器排布及仿真。(a)驱动器排布方式;(b)驱动器的驱动能力仿真;(c)交连值

Fig. 9 Driver layout and simulation. (a) Driver layout; (b) driver capability simulation; (c) coupling coefficient

在变形镜结构设计中,增加了镜面主动冷却结构,通过冷却水对变形镜背面进行冷却,以降低镜面的热沉积,从而减小镜面热畸变引入的额外像差。

通过优化设计、机械加工、装调以及抛光镀膜等工艺过程,研制出 67 单元变形镜实物,如图 10(a)

所示。图 10(b)是出光过程中镜面温升情况,可以看出,温升在 3 °C 以内。图 10(c)是冷却水加载后水压引起的镜面形变化量,可以看出,面形变化量约为 0.02 μm[均方根误差(RMS)],其值较小,可以忽略不计。

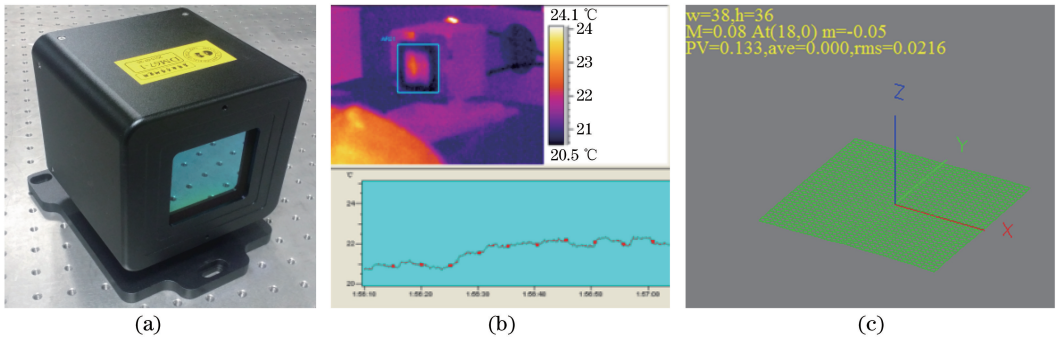


图 10 实验结果。(a)二维变形镜实物;(b)出光过程中镜面温升;(c)水压产生的面形变化量

Fig. 10 Experimental results. (a) 2D deformation mirror; (b) temperature rise during the light out process; (c) variation of the surface produced by the water pressure

在变形镜使用前,对其相关技术指标进行了测试。图 11(a)是变形镜的静态面形;图 11(b)是加载 +40 V 电压的 33 通道响应图。从图 11 可以看出,镀膜 32 天后变形镜的静态面形为 0.04 μm(RMS),

33 通道在 +40 V 电压下产生的波前为 3.13 μm,而交连值在 32.5%~37.9%之间。从指标上来看,二维变形镜的技术指标满足设计输入,且与仿真结果基本吻合。

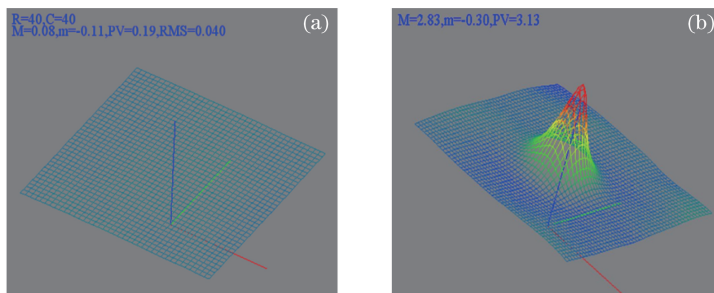


图 11 变形镜性能测试。(a)静态面形;(b)33 通道响应图

Fig. 11 Deformable mirror performance test. (a) Static surface; (b) response diagram for 33 channel

5 腔内像差组合校正集成实验

薄片激光器腔内像差主动校正系统由哈特曼波

前探测、现场可编程门阵列(FPGA)高速图像处理、嵌入式数字信号处理(DSP)波前重构、高压驱动器以及执行器件离焦校正变形镜和二维变形镜等器件共同

组成,部分组件之间通过交换机进行通信和指令下发。图 12 是薄片激光器腔内像差主动校正系统的组成。

将离焦校正变形镜(DM1)、二维变形镜(DM2)和哈特曼-夏克(H-S)探测器集成到激光器内部开

展主动校正实验,图 13 是光路图,图 14 是实验现场布局图。实验中主要考核多薄片串接条件下腔内离焦和高阶像差的闭环校正效果,特别是对非稳腔输出激光的功率和光束质量的改善情况。

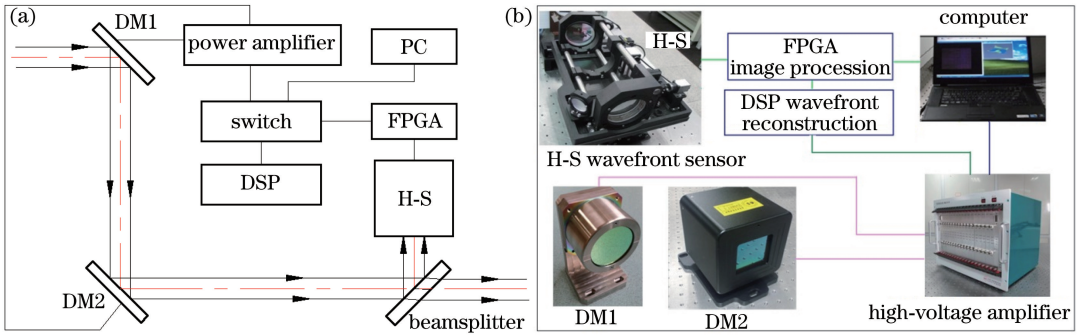


图 12 主动校正系统组成。(a)控制框图;(b)实物图

Fig. 12 Composition of active correction system. (a) Control block diagram; (b) physical objects

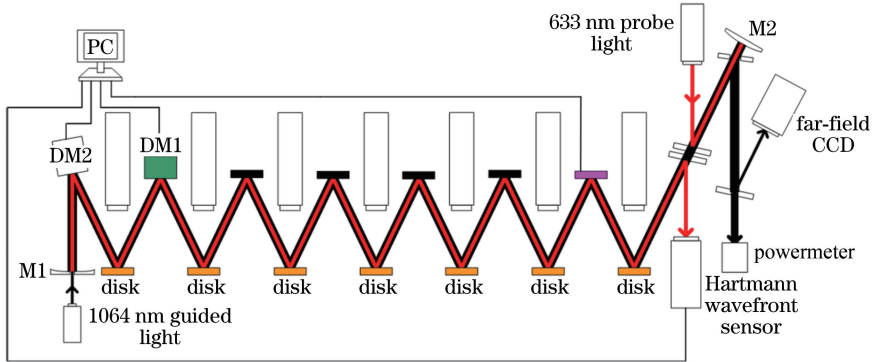


图 13 薄片激光器腔内主动校正实验光路图

Fig. 13 Optical path diagram of active correction test in the thin-disk laser cavity

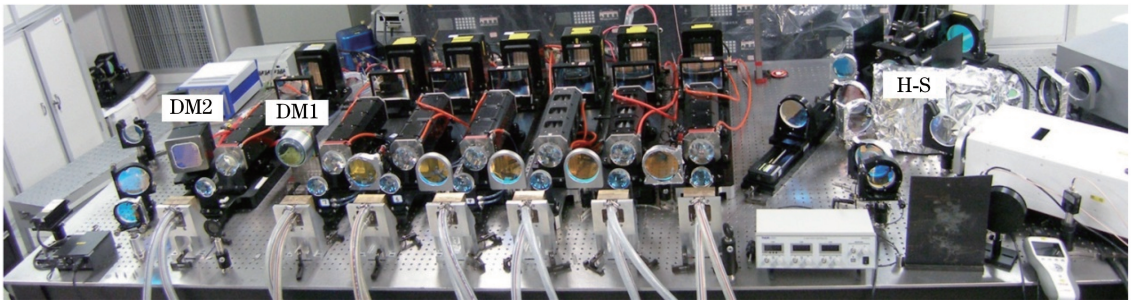


图 14 薄片激光器腔内像差主动校正布局图

Fig. 14 Layout of active aberration correction in the thin-disk laser cavity

离焦变形镜闭环校正薄片激光器腔内,离焦量随功率提升而变化,待激光器功率加载到位后,离焦变形镜校正后的残差由二维变形镜进行闭环校正。图 15 显示离焦校正过程中激光器输出功率逐步增大,可以看出,离焦校正对激光器功率提升具有较好的效果。

图 16(a)和(b)分别是离焦校正后残差对应的远场和波前畸变,图 16(c)和(d)分别是二维变形镜

在离焦校正基础上再次进行闭环校正后的远场和波前畸变。在离焦未补偿时,薄片的热致畸变中最主要的像差成分离焦改变了腔的放大率,降低了激光器交叠效率,使得激光器的单脉冲能量下降;当对离焦进行补偿后,腔参数向初始最优参数靠近,输出功率显著提高。从图 16 可以看出,二维变形镜校正前 PV 值为 $6.76 \mu\text{m}$,RMS 值为 $1.504 \mu\text{m}$,校正后 PV 值为 $1.44 \mu\text{m}$,RMS 值为 0.185 ,其中 PV 值提高了

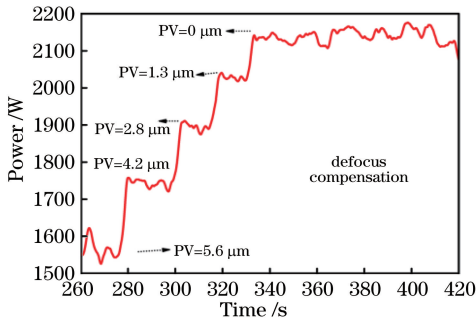


图 15 离焦补偿残差对输出功率的影响

Fig. 15 Effect of defocus compensation residuals on output power

4.7 倍, RMS 值提高了 8.1 倍。远场光束质量在未进行离焦校正时无法测试, 当进行离焦校正后, 光束质量改善到 19.5, 经过二维变形镜校正后, 光束质量改善到 6.5。从远场光斑来看, 其底盘明显缩小, 光斑中心出现“亮斑”, 极大程度地改善了光束质量, 提高了输出激光的能量集中度。从校正结果来看, 闭环残差中较多的高阶成分是影响光束质量的主要因素, 而 8.5 mm 驱动器间距又是导致高阶量的直接因素, 故在后续工作中, 将根据设计和研发能力, 计划研制分辨率为 6 mm 的变形镜, 有助于减小闭环残差, 提高输出激光的光束质量。

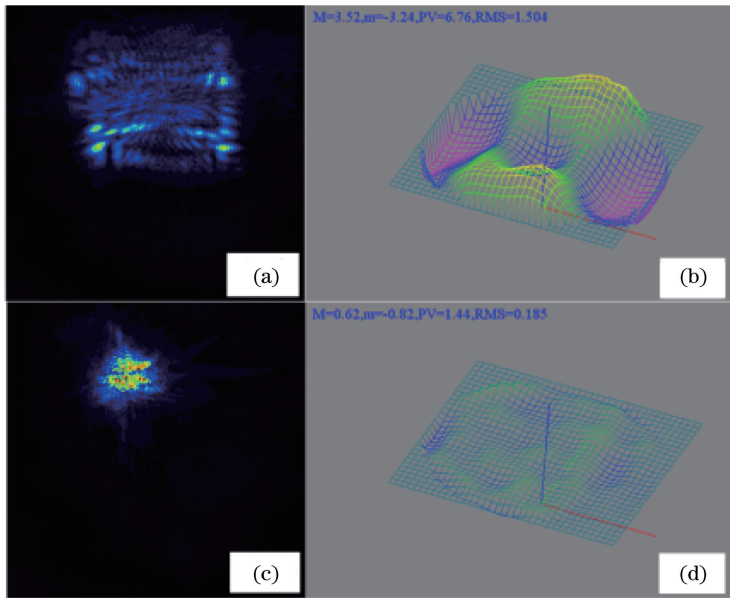


图 16 腔内主动校正结果。(a)离焦变形镜校正后远场分布;(b)离焦变形镜校正后波前畸变;
(c)两变形镜同时校正后的远场分布;(d)两变形镜同时校正后的波前畸变

Fig. 16 Results of the intracavity active correction. (a) Far field distribution by defocused deformation works; (b) wavefront distortion by defocused deformation works; (c) far field distribution after two deforming mirrors are corrected simultaneously; (d) wavefront distortion after two deforming mirrors are corrected simultaneously

6 结 论

本文测量并分析了单薄片激光器像差, 并根据像差特点选择采用离焦校正变形镜和二维变形镜组合的方式主动校正薄片激光器腔内像差。为此, 开展了离焦校正变形镜和二维变形镜技术研究, 研制成功的离焦校正变形镜单向动态范围为 $18.52 \mu\text{m}$ (PV), 二维变形镜镀膜后静态面形为 $0.04 \mu\text{m}$ (RMS), 单驱动器动态范围大于 $6 \mu\text{m}$ (PV)。参与了薄片激光器串接后的腔内主动校正, 离焦校正后光束质量由无法测试改善到 19.5, 经二维变形镜校正后, 光束质量提升到 6.5, 有效地改善了光束质量, 提高了输出激光的功率和能量集中度。

参 考 文 献

[1] Shang J L, Yu Y, An X C, et al. Influence and compensation of intra-cavity defocusing in unstable resonator Nd:YAG thin-disk laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0102005.
尚建力, 于益, 安向超, 等. 非稳腔 Nd:YAG 薄片激光器腔内离焦的影响和补偿 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102005.

[2] Ye Z B, Tu B, Wang K, et al. Design of direct-liquid-cooled thin-disk laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101012.
叶志斌, 涂波, 王柯, 等. 直接液体冷却薄片激光器设计 [J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101012.

[3] Wang K, Tu B, Shang J L, et al. Kilowatt-level

- immersed and direct-liquid-cooling Nd:YAG multi-disk laser resonator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0801002.
王珂, 涂波, 尚建力, 等. 千瓦级浸入式直接液冷 Nd:YAG 多薄片激光谐振腔[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0801002.
- [4] Guo J W, Jia K, Yang F, et al. Study of jet cooling on disk laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 011003.
郭嘉伟, 贾凯, 杨峰, 等. 薄片激光器喷流冷却技术[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 011003.
- [5] Avizonis P V, Bossert D J, Curtin M S, et al. Physics of high performance Yb:YAG thin disk lasers [C]//International Quantum Electronics Conference, 2009: CThA2.
- [6] Mandl A E, Klimek D E, Hayes R. Zig-zag laser with improved liquid cooling: US7433376 [P]. 2006-08-07.
- [7] LaFortune K N, Hurd R L, Brase J M, et al. Intracavity adaptive correction of a high-average-power solid state heat-capacity laser[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5708: 1-7.
- [8] Yan X W, Jiang X Y, Wang Z G, et al. Cryogenic liquid-cooled Yb:YAG bulk amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0901008.
严雄伟, 蒋新颖, 王振国, 等. 低温液冷块状 Yb:YAG 激光放大器[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0901008.
- [9] Peng Y F, Wu D Y, Zhang Y, et al. Simulation and structure design of a high power laser mirror with self-compensation of thermal distortion[J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 120-123.
彭玉峰, 吴定允, 张毅, 等. 高功率激光反射镜热畸变补偿结构设计及仿真[J]. 激光技术, 2012, 36(1): 120-123.
- [10] Liu L H, Tan B T, Mai C J. Structural parameter design and performance simulation of 241-element deformable mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 090101.
刘李辉, 谭碧涛, 麦灿基. 241 单元变形镜结构参数设计及性能仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 090101.
- [11] Du Y Y, Wang X J. Evolvement and intra-cavity compensation of defocus aberration in unstable resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0214002.
杜燕贻, 王小军. 离焦像差在非稳腔中的演化及腔内补偿[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0214002.
- [12] Oughstun K E. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations I: analysis[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71(7): 862-872.
- [13] Oughstun K E. Intracavity adaptive optic compensation of phase aberrations. II: passive cavity study for a small Neq resonator[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71(10): 1180-1192.
- [14] Jin Q W, Jiang J F, Tu B, et al. Theory analysis and experimental investigation of thermodynamic unstable resonator solid state laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0314002.
靳全伟, 蒋建锋, 涂波, 等. 非热稳定非稳腔固体激光理论分析与实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0314002.
- [15] Li G H, Xiang R J, Wu J, et al. Water-cooled defocus-correction deformable mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(8): 081001.
李国会, 向汝建, 吴晶, 等. 水冷式离焦变形镜技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(8): 081001.