



DOI: 10.12086/oe.2018.170539

中国科学院光电技术研究所固体板条激光器光束净化研究进展

董理治^{1,2}, 许冰^{1,2*}, 杨平^{1,2}, 陈善球^{1,2}, 刘文劲^{1,2}, 汤国茂^{1,2}, 谭毅^{1,2},
王帅^{1,2}, 何星^{1,2}, 赖柏衡^{1,2,3}, 于信^{1,2,3}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 高功率固体板条激光器的光束质量严重受限于增益介质热效应等多种因素。如何同时获得高平均功率和高光束质量是激光发展过程中面临的一个基本物理问题。自适应光学技术能够有效补偿固体板条激光系统输出光束的静态和动态像差, 是改善光束质量的有效手段。近年来中国科学院光电技术研究所掌握了低阶像差补偿器、加权优化波前复原方法、通用波前处理机等关键技术, 为国内多个固体板条激光系统研制了二十余套自适应光学光束净化系统, 显著改善了光束质量, 保障了上述激光系统的有效运用。

关键词: 自适应光学; 固体板条激光器; 光束质量

中图分类号: TN248

文献标志码: A

引用格式: 董理治, 许冰, 杨平, 等. 中国科学院光电技术研究所固体板条激光器光束净化研究进展[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170539

Recent progress of adaptive beam cleanup of solid-state slab lasers in Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences

Dong Lizhi^{1,2}, Xu Bing^{1,2*}, Yang Ping^{1,2}, Chen Shanqiu^{1,2}, Liu Wenjin^{1,2}, Tang Guomao^{1,2},
Tan Yi^{1,2}, Wang Shuai^{1,2}, He Xing^{1,2}, Lai Boheng^{1,2,3}, Yu Xin^{1,2,3}

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

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

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

Abstract: The beam qualities of high power solid-state slab lasers are severely limited by many factors such as thermal effects of the gain medium. Simultaneously achieving high beam quality and high average power remains a fundamental problem in the development of high power lasers. Adaptive optics systems are able to significantly improve beam qualities by compensating for the static and dynamic phase distortions of the laser beams. In recent years, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences has developed low-order aberration com-

收稿日期: 2017-10-12; 收到修改稿日期: 2017-11-27

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2); 国家自然科学基金资助项目(11704382); 中国科学院青年创新促进会项目

作者简介: 董理治(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事自适应光学与激光技术的研究。E-mail: lizhidong@ioe.ac.cn

通信作者: 许冰(1960-), 男, 硕士, 研究员, 主要从事自适应光学与激光技术的研究。E-mail: bingxu@ioe.ac.cn

pensators, weighted least-square wavefront reconstruction algorithms, and generic real-time wavefront processors for solid-state slab lasers. Based on these key components, over two dozens of adaptive optics systems are delivered to a variety of solid-state slab laser systems in China for beam cleanup. With effective operations of these adaptive optics systems, the beam qualities of the laser systems have all been well improved.

Keywords: adaptive optics; solid-state slab laser; beam quality

Citation: Dong L Z, Xu B, Yang P, *et al.* Recent progress of adaptive beam cleanup of solid-state slab lasers in Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170539

1 引言

固体激光因其体积小、重量轻、寿命长、效率高等诸多优点,在工业、医疗、科研等领域得到了广泛应用^[1]。如何同时获得高输出功率和高光束质量始终是固体激光发展中面临的重大问题。由于量子亏损等原因,固体激光器泵浦过程伴随产生大量废热,严重限制了光束质量和输出功率的提升^[2-3]。传统的圆棒激光器在高功率泵浦下存在严重的热致双折射效应和热透镜效应,难以同时获得高平均功率和高光束质量。为解决这一难题,Martin 等人于 1969 年首次提出了板条激光器的概念^[4],通过将增益介质由圆棒改变为矩形板条,显著改善了散热性能,推动了固体激光器光束质量和输出功率的又一次飞跃。美国 TRW 公司于 2002 年报道了输出功率为 5.4 kW 的 Nd:YAG 板条激光器,光束质量为 2.4 倍衍射极限^[5]。日本 Fanuc 公司于 2003 年报道了输出功率为 10.2 kW 的 Nd:YAG 板条激光器^[6]。美国 Northrop Grumman 公司于 2007 年报道了 14.8 kW 传导冷却端面泵浦板条(CCEPS)Nd:YAG 激光器^[7]。美国 Textron Defenses Systems 公司于 2010 年报道了单孔径输出功率超过 100 kW 的浸入式液冷板条固体激光器^[8-9]。虽然与圆棒激光器相比板条激光器的平均功率和光束质量与已经得到显著提升,但是增益介质热效应等因素仍然会引起光束波前畸变,降低了光束质量。自适应光学可以有效补偿板条激光系统的静态和动态像差,是改善光束质量的有效手段。Northrop Grumman 公司的 CCEPS 激光器中集成了自适应光学系统,在平均功率 14.8 kW 的输出下实现了校正后 BQ 为 1.24 的光束质量^[7]。Textron Defense Systems 公司的浸入式液冷固体板条激光器中也采用了自适应光学系统,在平均功率 30 kW 的输出下实现了校正后 3.3 倍衍射极限的光束质量,更高功率下的光束质量未见报道^[9]。

国内中国电子科技集团公司第十一研究所、中国

科学院理化技术研究所、中国科学院光电研究院等单位也开展了高功率固体板条激光器的研究,取得了一系列成果^[10-12]。中国科学院光电技术研究所从 2008 年起,掌握了低阶像差补偿器、加权优化波前复原算法、通用实时波前处理机等一系列关键技术,为上述单位的固体板条激光器先后研制了二十余套自适应光学系统,显著改善了光束质量。本文重点报道近年来中国科学院光电技术研究所的自适应光学系统在固体板条激光光束净化方面所取得的主要研究进展。

2 固体板条激光光束净化面临的问题与关键技术

2.1 固体板条激光光束净化面临的主要问题

首先,固体板条激光光束净化面临的主要问题是长宽比光束的低阶大像差校正问题。为保障良好的散热性能,板条激光器的增益介质的厚度通常仅为数毫米,宽度方向为数十毫米,所以输出光束也呈矩形,且长宽比较大(通常大于 5:1 甚至 10:1),然而多数应用场合需要正方形光束。此外,光束通常在板条窄方向沿之字形路径传输,该方向的像差可被有效补偿,光束质量较好;而板条宽方向的像差缺乏补偿机制,光束质量较差,导致像差成分以离焦和像散为主,幅值可达数十甚至上百个波长,远远超过变形镜的行程,因此有必要研究适用于板条激光器特点的低阶像差补偿方法。

其次,由于泵浦光均匀性以及板条增益介质热变形等因素影响,去除大幅值离焦和像散后固体板条激光器光束的波前残差体现出类似字母“M”的形状^[13]。补偿该像差的主要难点在于光束边缘部分波前斜率较大,常常超出了变形镜的空间拟合能力,因此有必要专门研究这类像差的补偿方法。

最后,不同板条激光器输出光束的尺寸和轮廓形状不同,工作体制(连续/脉冲)不同,要求自适应光学

系统的波前处理机具备高度的通用性和灵活性，能够根据激光器特点对处理机的参数和算法进行现场调整。传统基于 FPGA 和 DSP 的实时处理机开发时间长，调试困难，不能良好适应固体板条激光器光束净化要求，因此有必要研制通用型实时波前处理机。

2.2 固体板条激光光束净化的关键技术

2.2.1 低阶像差补偿技术

为解决固体板条激光器大长宽比光束的低阶大像差的校正问题，研制了基于几何光学原理的低阶像差补偿器。该系统通过柱面透镜和球面透镜的组合，在板条两个方向各自构建一组伽利略望远镜。通过改变透镜组的间隔，可以准直对应方向的发散光束，实现对低阶像差的补偿；通过改变透镜组的等效焦距，可以改变望远镜的放大率，实现对应方向光束尺寸的变换。图 1 给出了为中国科学院光电研究院高功率纳秒激光器研制的低阶像差补偿器光学结构^[14]。定义 x 轴为板条窄方向， y 轴为板条宽方向， z 轴为光束传输方向。按光路顺序，该补偿器包括 1 片 x 方向平凹柱透镜、一片平凹球面透镜、一片平凸透球面镜以及一片 x 方向平凸柱面透镜。每片透镜均安装在电动平移台上，可沿光轴方向前后移动。首先利用光学设计软件，在典型入射光束参数和出射光束尺寸要求下，对透镜的曲率半径和厚度进行优化设计。为在不同输入光束参数下实现对低阶像差的有效补偿和光束尺寸的变换，必须进一步明确输出光束参数与输入光束以及光学系统参数之间的关系。将光束的离焦和像散转化为

两个方向光束发散角，通过光线追迹方法，建立了输出光束的尺寸、发散角与输入光束尺寸、发散角以及各片透镜位置之间的关系，具体过程参见文献^[14-15]。实际运用时，首先设定最终输出光束尺寸和发散角(通常要求准直)要求，对固体板条激光器输出光束的尺寸和发散角进行测量后，可求解出各透镜的位置，根据计算结果调整各片透镜位置后即实现了对光束低阶像差的补偿和尺寸的变换。

通过上述装置可将固体板条激光器输出的大长宽比矩形光束转化为应用要求尺寸的近似正方形光束，并将光束中包含的大部分离焦和像散去除，便于后续变形镜进一步校正。

2.2.2 加权最小二乘波前复原方法

自适应光学系统通过夏克—哈特曼波前传感器测量得到光束的波前斜率后，还需要通过波前复原算法进一步求解变形镜的驱动电压。通常采用最小二乘法进行波前复原，波前斜率矩阵 S 和变形镜驱动电压向量 V 之间的关系可表示为^[16]

$$S = GV, \quad (1)$$

其中： G 是变形镜的影响函数矩阵。由于上式是矛盾方程组，最小二乘意义下 V 的最优解 V' 为

$$V' = G^+ S, \quad (2)$$

其中“+”代表广义逆。上述方法的直接目标是使校正后的波前斜率均方根值最小。常规自适应光学系统中待校正光束像差成分以低阶为主，采用最小二乘法可获得良好的校正效果。然而板条激光器中“M”型像差对

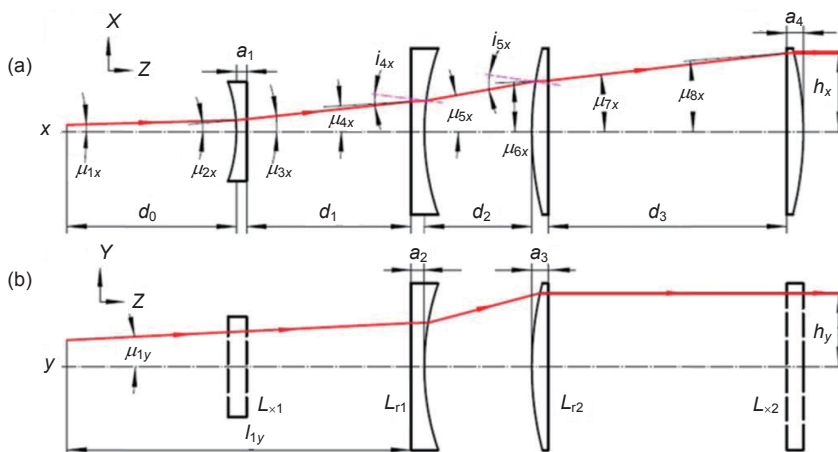


图 1 中国科学院光电研究院高功率纳秒激光器研制的低阶像差补偿器光学结构^[14]。(a) 板条窄方向；(b) 板条宽方向

Fig. 1 Schematic of the low-order aberration compensator designed for the high-power nanosecond laser system developed by Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences^[14]. (a) Zigzag direction; (b) Non-zigzag direction

应较大的波前斜率,往往超过变形镜的空间拟合能力。常规最小二乘法会导致向难以校正的大幅值波前斜率分配较高的权重,降低了对波前斜率较小部分的校正效果。分析表明,以远场近衍射极限区域内集中能量比例作为评价标准时,光束波前斜率较小部分贡献较大,而波前斜率较大部分贡献较小。由于光束净化的直接目标是在上述区域内集中尽可能多的能量,因而在变形镜拟合能力不足的条件应使变形镜主要补偿波前斜率较小的部分。为此提出了加权最小二乘波前复原方法,采用常规最小二乘波前复原方法做初始校正,随后向残差的斜率分配不同的权重,对于超越变形镜拟合能力的波前斜率给出小于 1 的权重,其余斜率的权重仍设为 1,得到优化后的电压 V'' [17]:

$$V'' = G^+WS, \quad (3)$$

其中 W 是为各子孔径斜率赋予权重的对角矩阵。

基于该算法提升了自适应光学系统对于固体板条激光器特有像差的校正能力,进一步改善了校正后的光束质量。

2.2.3 基于 CPU 和实时操作系统的通用实时波前处理机

为适应板条固体激光系统对于自适应光学系统灵活多变的需求,采用多核 CPU 结合实时 Linux 操作系统的方案,研制了通用型实时波前处理机。为保证激光器在 kHz 级重复频率下工作时自适应光学系统能对每个脉冲进行有效校正,需要将波前处理机的处理时间控制在数百微秒以内。处理时间包含波前传感器图像传输时间、计算时间及任务调度等导致的延迟。为减少传输时间,采用自行开发程序的 PCI Express ×4 光纤采集卡,具有约 800 MB/s 的传输速度,其外部接口采用高速串行的 Aurora 协议,实现对图像信息的接

收和电压信号的发送。为减少计算时间,采用向量指令优化及多核心并行运算对波前复原运算进行加速。为降低延迟,在实时操作系统中将实时处理任务设定为最高优先级的任务,采用固定优先级调度算法,保证任务的实时性;在硬件上采用中断触发的模式,保证硬件到软件的及时响应,实现任务调度的低延迟处理[18]。基于上述技术,在单台计算机上同时集成了实时处理及监控任务,突破了传统的 CPU 与 GPU 的方案无法在一台计算机上同时集成监控及实时处理任务的局限,在 59 单元自适应光学系统中成功实现了 4000 Hz 采样率下长时间稳定运行,并具有进一步提升采样率和单元数的能力。图 2 给出了该处理机的软件界面。

与基于 FPGA/DSP 的常规实时波前处理机架构相比,该架构性能更高,而且变更子孔径数和波前复原算法等消耗的编译时间可降低 1~2 个数量级,在多个板条固体激光光束净化系统中体现出了高度的灵活性与通用性。

3 固体板条激光光束净化典型结果

3.1 高功率纳秒板条激光器光束净化

为满足厘米级空间碎片高精度测距以及反场箍缩磁约束聚变实验装置高温等离子体诊断的应用需要,中国科学院光电研究院研制了高功率纳秒板条 Nd:YAG 激光系统,实现了 5 J/6.6 ns/200 Hz 的输出[12]。上述应用对于光束质量具有严格的要求,为此中国科学院光电技术研究所为该激光器研制了由 4 片式低阶像差补偿器以及 59 单元变形镜系统组成的混合式自适应光学系统,如图 3、图 4 所示。首先通过 1 号多功能波前传感器(H-S 1)测量输出光束的尺寸和像差特性,解算出低阶像差补偿器每片透镜的位置,完成低

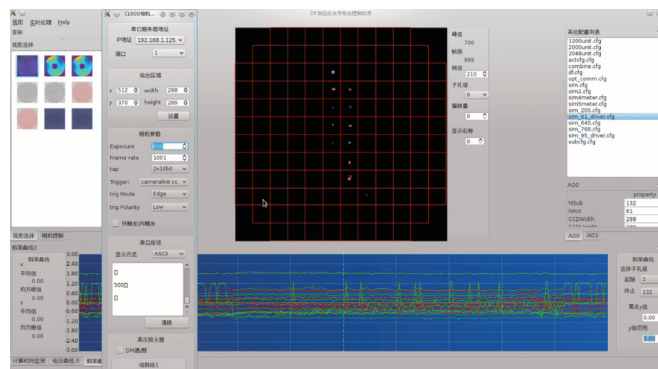


图 2 通用实时波前处理机软件界面

Fig. 2 Software interface of the generic real-time wavefront processor

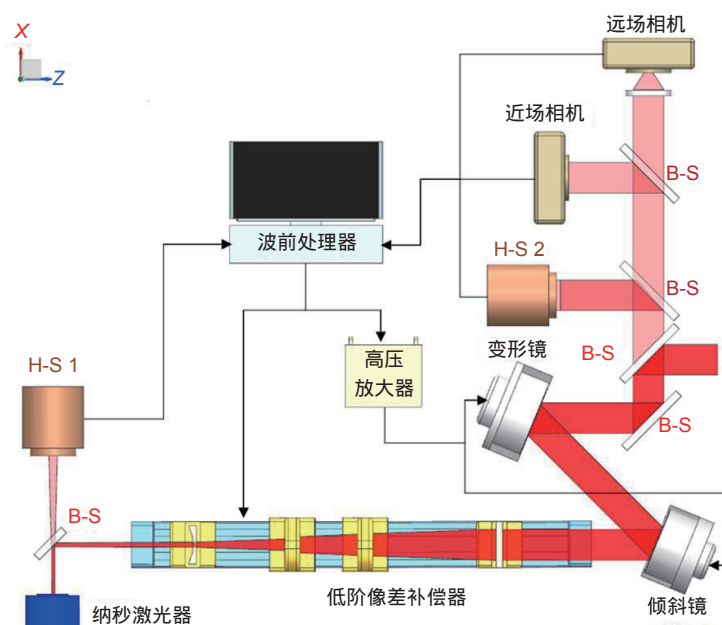


图 3 5 J/6.6 ns/200 Hz 板条激光器研制的混合式自适应光学系统
Fig. 3 The hybrid adaptive optics system developed for the 5 J/6.6 ns/200 Hz slab laser system

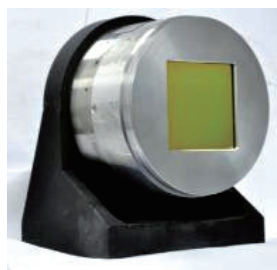


图 4 混合式光束净化系统中采用的 59 单元压电陶瓷驱动器变形镜
Fig. 4 The 59-actuator piezo electric deformable mirror used in the hybrid adaptive optic system

阶像差的补偿和光束尺寸变换。随后由 59 单元压电陶瓷驱动器变形镜自适应光学系统对光束的像差进行进一步校正。

该激光器输出的光束尺寸约为 $7\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ ，波前畸变 PV 值为 $26.47\text{ }\mu\text{m}$ ，光束质量为 $\beta=18.42$ 。经过低阶像差补偿器校正后，光束尺寸变换为约 $44\text{ mm} \times 42\text{ mm}$ ，波前畸变 PV 值降低为 $1.91\text{ }\mu\text{m}$ ，光束质量提升到 $\beta=2.86$ 。校正低阶像差后的残差具有板条激光器典型的字母“M”形分布，光束边缘波前斜率显著大于其他部分。经过 59 单元变形镜进一步校正后，光束波前畸变 PV 值降低至 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ ，光束质量进一步提升至 $\beta=1.64$ ，达到了高重复频率、高功率纳秒激光器光束质量的国际先进水平^[12, 14]。相关实验结果如图 5 所示。

3.2 CCEPS 激光器光束净化

中国科学院光电技术研究所的自适应光学系统成功应用于中国电子科技集团公司第十一研究所研制的

多台 kW 级 CW CCEPS 激光系统中。由于较高的泵浦功率水平^[10]，该激光器增益介质的热效应显著增长，导致补偿低阶像差后残余像差存在局部剧烈起伏，如图 6 所示。

采用常规最小二乘复原方法控制变形镜进行校正后，光束质量 $\beta=2.5$ 。采用前文所述的加权最小二乘波前复原方法后，通过降低光束边缘部分波前斜率所占权重，光束质量进一步提升到 $\beta=2.0$ 。相关结果如图 7^[17]所示。

3.3 浸入式液冷板条激光器光束净化

浸入式液冷板条激光器采用将板条增益介质直接浸入流动冷却液散热的先进热管理方式，可以在有限空间内显著增加增益介质体积，极大提高了激光系统的功率重量比和功率体积比，近年来受到了广泛关注。由于光束在冷却液和增益介质之间交替传输，冷却液的流场与温度场分布也会引入像差，较常规固体板条

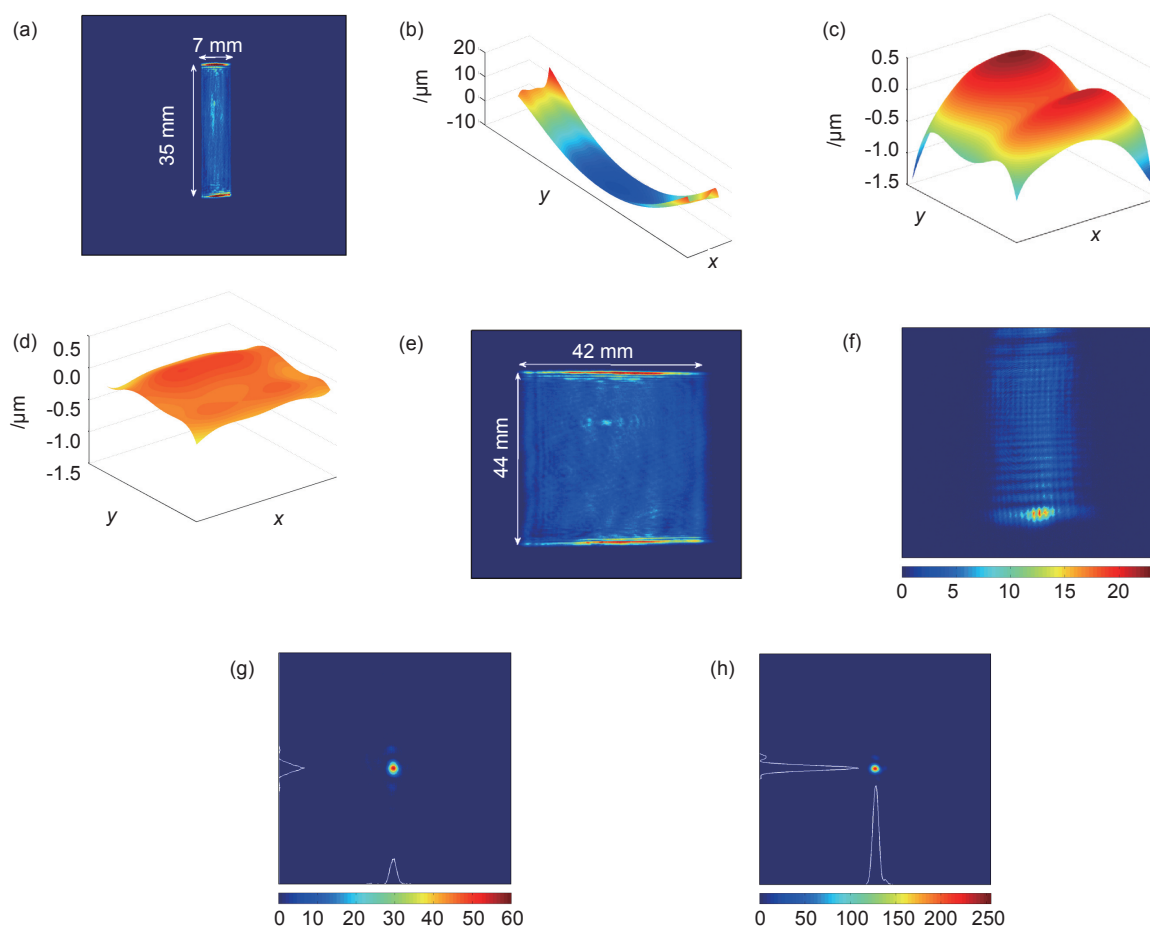


图5 对5 J/6.6 ns/200 Hz Nd:YAG 板条激光器的光束净化结果。(a) 光束初始近场强度分布, 光束尺寸约为7 mm×35 mm; (b) 光束初始波前畸变分布, PV=26.47 μm, RMS=6.12 μm; (c) 低阶像差补偿器校正后的光束波前畸变, PV=1.91 μm, RMS=0.29 μm; (d) 59 单元变形镜校正后残差, PV=0.45 μm, RMS=0.09 μm; (e) 低阶像差校正器校正后的光束近场强度分布, 光束尺寸约为42 mm×44 mm; (f) 初始光束远场强度分布, 光束质量 $\beta=18.42$; (g) 低阶像差校正器校正后的光束远场强度分布, 光束质量 $\beta=2.86$; (h) 59 单元变形镜校正后的光束远场强度分布, 光束质量 $\beta=1.64$

Fig. 5 Results of beam cleanup of the 5 J/6.6 ns/200 Hz Nd:YAG slab laser system. (a) Initial Intensity distribution of the output beam, the approximate size of the beam is 7 mm×35 mm; (b) Initial wavefront of the output beam, PV=26.47 μm, RMS=6.12 μm; (c) Wavefront after corrected by the low-order aberration compensator, PV=1.91 μm, RMS=0.29 μm; (d) Residual wavefront after corrected by the 59-actuator deformable mirror, PV=0.45 μm, RMS=0.09 μm; (e) Intensity distribution of the beam after compensated by the low-order aberration compensator, the approximate size of the beam is 42 mm×44 mm; (f) Far-field intensity distribution of the initial beam, $\beta=18.42$; (g) Far-field intensity distribution of the beam after corrected by the low-order aberration compensator, $\beta=2.86$; (h) Far-field intensity distribution of the beam after corrected by the 59-actuator deformable mirror, $\beta=1.64$.

激光器更加复杂。中国科学院光电技术研究所为中国电子科技集团公司第十一研究所的 QCW 浸入式液冷板条激光器提供了自适应光学系统^[19]。该激光器重复频率为 1000 Hz, 自适应光学系统采用触发采集的工作方式, 采样率与激光器重复频率一致, 保证每个激光脉冲都得到有效探测和校正。图 8 给出了对 kW 级 QCW 浸入式液冷 Nd:YAG 板条激光器的光束净化结果^[20]。经过低阶像差补偿器和变形镜两级校正后, 最

高光束质量达到了 $\beta=1.7$ 验证了自适应光学系统对于浸入式液冷激光器流体像差的校正能力。

3.4 其他激光器光束净化

除上述激光器外, 中国科学院光电技术研究所还为中国科学院理化技术研究所^[21]和中国科学院大连化学物理研究所等单位的多种固体激光器提供了自适应光学系统, 取得了良好的光束质量提升效果。

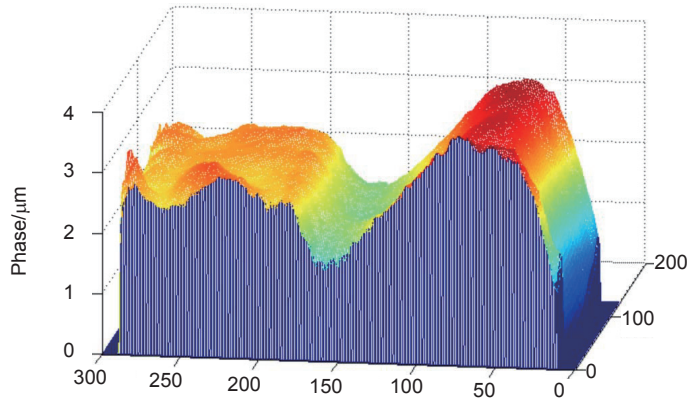


图 6 补偿低阶像差后的 kW 级 CCEPS 激光器光束波前畸变

Fig. 6 Wavefront of the output beam from the kW-class CCEPS laser system after low-order aberration compensation

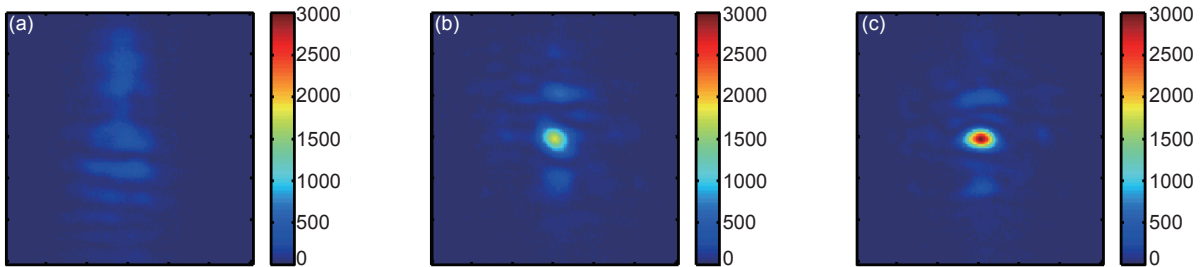


图 7 对 CW CCEPS Nd:YAG 板条激光器的光束净化结果^[17]。(a) 低阶像差补偿器校正后远场强度分布；(b) 基于常规最小二乘波前复原方法校正后的远场强度分布，光束质量 $\beta=2.5$ ；(c) 基于加权最小二乘波前复原方法校正后的远场强度分布，光束质量 $\beta=2.0$

Fig. 7 Results of beam cleanup of a CW CCEPS Nd:YAG slab laser system^[17]. (a) Far-field intensity distribution of the output beam after corrected by the low-order aberration corrector; (b) Far-field intensity distribution of the beam after correction by the deformable mirror based on the conventional least-square wavefront reconstruction method, $\beta=2.5$; (c) Far-field intensity distribution of the beam after correction by the deformable mirror based on the weighted least-square wavefront reconstruction method, $\beta=2.0$

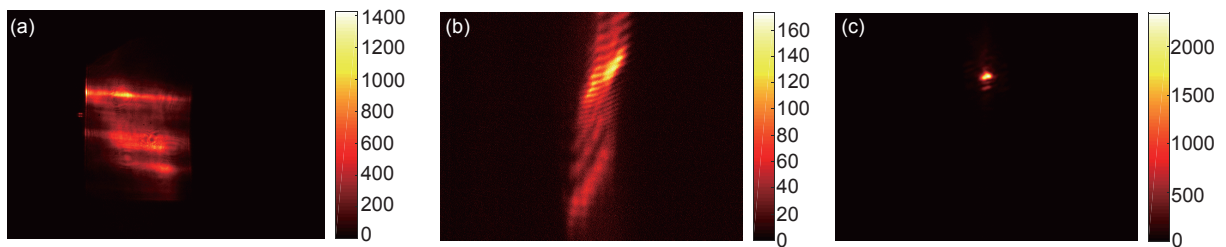


图 8 对中国电子科技集团公司第十一研究所 kW 级 QCW 浸入式液冷 Nd:YAG 板条激光器的光束净化结果^[20]。(a) 低阶像差补偿后的光束近场强度分布；(b) 低阶像差补偿后的远场强度分布；(c) 变形镜校正后的远场强度分布，光束质量 $\beta=1.7$

Fig. 8 Results of beam cleanup of a kW-class QCW direct liquid-cooled Nd:YAG slab laser system developed by CETC 11^[20]. (a) Intensity distribution of the output beam after corrected by the low-order aberration corrector; (b) Far-field intensity distribution of the beam after corrected by the low-order aberration corrector; (c) Far-field intensity distribution of the beam after corrected by the deformable mirror, $\beta=1.7$

4 结论

为解决高功率板条激光器光束质量随输出功率非线性下降的问题,中国科学院光电技术研究所掌握了大长宽比光束低阶大像差矫正、光束边缘波前斜率加权处理以及通用实时波前处理机研制技术,为国内多型固体板条激光系统研制了二十余套自适应光学系统,显著改善了系统的光束质量,有力保障了各激光系统的有效运用,未来将继续服务于我国固体激光事业的发展。

致谢

感谢中国科学院光电研究院、中国科学院理化技术研究所、中国科学院大连化学物理研究所、中国电子科技集团公司第十一研究所等单位对本文所述工作的大力支持。本文工作开展过程中,作者与唐晓军研究员、刘万发研究员、邱基斯研究员、郭亚丁副研究员、王超高级工程师、刘磊高级工程师、王钢高级工程师、康治军副研究员、王文涛工程师、刘洋工程师等人进行了广泛的讨论,在此表示衷心感谢。此外雷翔博士、晏虎博士、陈小君博士、王勋博士、胡柯博士、赵旺博士、向文鼎博士、徐志强博士、田中州博士对本文工作也做出了重要贡献。

参考文献

- [1] Li J M. Development, trend and application of high average power diode pumped lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(7): 16–29.
李晋闽. 高平均功率全固态激光器发展现状、趋势及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(7): 16–29.
- [2] Zhou S H, Zhao H, Tang X J. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(7): 1605–1618.
周寿桓, 赵鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605–1618.
- [3] Peng Q J, Xu Z Y. Relationship between beam quality and power for solid state laser with high average power[J]. *High Power Lasers and Particle Beams*, 2011, **23**(7): 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[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(7): 1707–1712.
- [4] Martin W S, Chernoch J P. Multiple internal reflection face-pumped laser: U.S. Patent 3633126[P]. 1972-01-04.
- [5] Machan J P, Long W H, Jr Zamel J, et al. 5.4 kW diode-pumped, 2.4x diffraction-limited Nd:YAG laser for material processing [C]//*Advanced Solid State Laser* 2002, 2002.
- [6] Nishikawa Y. Slab-shaped 10-kW all-solid-state laser[J]. *The Review of Laser Engineering*, 2003, **31**(8): 513–518.
- [7] Redmond S, McNaught S, Zamel J, et al. 15 kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser[C]//*Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2007.
- [8] Textron defense systems achieves more than 100 kilowatts with J-HPSSL high-power laser[EB/OL]. (2010-02-18). <http://www.defense-aerospace.com/articles-view/release/3/112461/textron-laser-achieves-over-100-kilowatts.html>.
- [9] Klimek D E, Mandl A. Nd:YAG ceramic ThinZag® high-power laser development[M]//Injeyan H, Goodno G D. *High-Power Laser Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [10] Wang C, Tang X J, Xu L J, et al. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(11): 2807–2809.
王超, 唐晓军, 徐蓁婧, 等. 输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2807–2809.
- [11] Chen Z Z, Xu Y T, Guo Y D, et al. 8.2 kW high beam quality quasi-continuous-wave face-pumped Nd:YAG slab amplifier[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(16): 5011–5015.
- [12] Fan Z W, Qiu J S, Kang Z J, et al. High beam quality 5 J, 200 Hz Nd:YAG laser system[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**: e17004.
- [13] Tang B, Zhou T J, Wang D, et al. Optical distortions in end-pumped zigzag slab lasers[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(10): 2693–2702.
- [14] Yu X, Dong L Z, Lai B H, et al. Adaptive aberration correction of a 5 J/6.6 ns/200 Hz solid-state Nd:YAG laser[J]. *Optics Letters*, 2017, **42**(14): 2730–2733.
- [15] Yu X, Dong L Z, Lai B H, et al. Automatic low-order aberration correction based on geometrical optics for slab lasers[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(6): 1730–1739.
- [16] Jiang W H, Li H G. Hartmann-shack wavefront sensing and wavefront control algorithm[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, **1271**: 82–93.
- [17] Chen S Q, Dong L Z, Chen X J, et al. Adaptive slab laser beam quality improvement using a weighted least-squares reconstruction algorithm[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(11): 3077–3083.
- [18] Chen S Q, Zhao E Y, Xu B, et al. A compact Multi-core CPU based adaptive optics real-time controller[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9280**: 928012.
- [19] Wang Z, Liu Y, Liu L, et al. Laser diode side-pumped Nd:YAG thin slab laser based on MOPA[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(4): 364–368.
王喆, 刘洋, 刘磊, 等. LD 侧泵 Nd:YAG 薄板条 MOPA 激光器[J]. *激光与红外*, 2015, **45**(4): 364–368.
- [20] Dong L Z, Chen S Q, Chen X J, et al. Adaptive compensation of a direct liquid-cooled solid-state MOPA system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9982**: 99820H.
- [21] Tan Y, Yang P, Dong L Z, et al. Active beam cleanup of pulsed slab laser based on 59-unit adaptive optics system[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, **47**(8): 084207.
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[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, **47**(8): 084207.

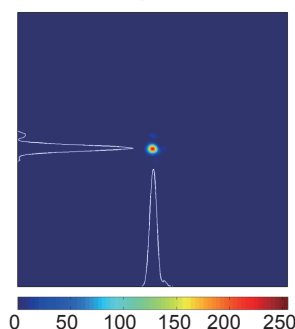
Recent progress of adaptive beam cleanup of solid-state slab lasers in Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences

Dong Lizhi^{1,2}, Xu Bing^{1,2*}, Yang Ping^{1,2}, Chen Shanqiu^{1,2}, Liu Wenjin^{1,2}, Tang Guomao^{1,2},
Tan Yi^{1,2}, Wang Shuai^{1,2}, He Xing^{1,2}, Lai Boheng^{1,2,3}, Yu Xin^{1,2,3}

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

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

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



Far-field intensity distribution of the 5 J/6.6 ns/200 Hz solid-state slab laser system after corrected by the hybrid adaptive optics system

Overview: The solid-state slab laser is a promising architecture for power scaling. However, the beam qualities of high power solid-state slab lasers are severely limited by many factors such as thermal effects of the gain medium. Simultaneously achieving high beam quality and high average output power remains a fundamental problem in the development of high power solid-state slab lasers. Adaptive optics systems are able to significantly improve beam qualities by compensating for both static and dynamic phase distortions of the beams. Compared to adaptive optics systems for other types of laser systems, solid-state slab lasers specifically demand large-amplitude low-order aberration compensations of laser beams with high aspect ratio, advanced manipulations of large local phase gradients, and extra flexible real-time wavefront controllers. In recent years, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences has successfully developed low-order aberration compensators based on geometric optics, weighted least-square wavefront reconstruction algorithms, and generic real-time wavefront processors implemented with x86 CPUs and real-time operating systems. Based on these state of the art techniques and components, we have developed several types of hybrid adaptive optical system for solid-state slab laser systems, which contains low-order aberration compensators based on several cylindrical and spherical lenses mounted on a motorized rail, and uncooled piezo electric deformable mirror adaptive optical systems. We have offered an adaptive optics system to a 5 J/6.6 ns/200 Hz Nd:YAG solid-state slab laser system developed by Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, and achieved beam quality of $\beta=1.64$ after correction. We have also developed adaptive optics systems for a continuous wave Nd:YAG conduction-cooled, end-pumped slab laser systems of the No.11 Institute, China Electronics Technology Group Corporation. After Correction, the beam quality was improved to $\beta=2.0$. To guarantee high beam quality of the quasi-continuous wave Nd:YAG direct liquid cooled slab laser, we integrated an adaptive optics system into the laser system, and beam quality of $\beta=1.7$ was achieved. Besides, we have also developed adaptive optics systems for many different solid-state slab laser systems, and significant beam quality improvements were obtained. In the past decade, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences have delivered over two dozens of adaptive optics systems for beam cleanup. With effective operations of these adaptive optics systems, the beam qualities of the laser systems have all been well improved. We will continue to develop adaptive optics for various types of laser systems in the future.

Citation: Dong L Z, Xu B, Yang P, *et al.* Recent progress of adaptive beam cleanup of solid-state slab lasers in Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 170539

Supported by National Key Scientific Equipment Development Project of China (ZDYZ2013-2), National Natural Science Foundation of China (11704382) and Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences
*E-mail: bingxu@ioe.ac.cn