

百瓦级环形非稳腔板条激光器腔内校正

王勋^{1,2,3}, 赖柏衡^{1,2}, 董理治^{1,2**}, 杨平^{1,2*}, 陈善球^{1,2}, 王帅^{1,2}, 许冰^{1,2}

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 提出一种环形非稳腔结构, 该结构将传统驻波非稳腔腔内的非共轭像差校正转换为共轭像差校正。搭建了百瓦级环形非稳腔 Nd:YAG 板条激光器, 采用 59 单元自适应光学系统对腔内像差进行校正。利用 980 nm 参考光束和 Shack-Hartmann 波前传感器测量腔内像差, 采用加权最小二乘法复原波前像差, 最后用倾斜镜和变形镜进行校正。最终在低抽运功率下将输出功率从 105.8 W 提高到 113.1 W, 光束质量 β 因子从 6.98 优化到 2.33。该研究为环形非稳腔应用于高功率固体激光器并获取高输出光束质量提供了一种技术途径。

关键词 激光光学; 环形非稳腔; Nd:YAG; 板条激光器; 自适应光学

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0801001

Intra-Cavity Aberration Compensation in 100 W-Order Unstable Ring Slab Lasers

Wang Xun^{1,2,3}, Lai Boheng^{1,2}, Dong Lizhi^{1,2**}, Yang Ping^{1,2*},
Chen Shanqiu^{1,2}, Wang Shuai^{1,2}, Xu Bing^{1,2}

¹Key Laboratory on 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 We propose an unstable ring resonator to transform the nonconjugation correction of intra-cavity aberrations in the traditional standing-wave unstable resonator into conjugation compensation. A 100 W-order Nd:YAG slab laser with the unstable ring resonator is constructed, with a 59-element adaptive optics system compensating the intra-cavity aberrations. A 980 nm reference beam and a Shack-Hartmann wave-front sensor are employed to measure the intra-cavity aberrations. Then the weighted least square method is applied to reconstruct the aberrations. The tip/tilt mirror and deformable mirror are used to correct the aberrations. With the aberrations compensated by an adaptive optics system, the output power increases from 105.8 W to 113.1 W and the beam quality factor improves from 6.98 to 2.33 under a relatively low pump power. The study provides a technical approach for high power solid-state unstable ring lasers to achieve high beam quality.

Key words laser optics; unstable ring resonator; Nd:YAG; slab laser; adaptive optics

OCIS codes 140.3410; 140.3560; 140.3580; 010.1080

1 引言

高功率、高光束质量和高效率一直是固体激光器追求的目标^[1]。如何处理固体激光器出光过程中产生的废热是固体激光器面临的关键问题。采用板条增益介质,一方面可以通过增大冷却截面显著提

高散热性能,使得输出功率理论上仅限于材料的应力断裂极限^[2];另一方面可以采用“之”字型的传输光路补偿板条内温度梯度引起的热效应^[3-6],这些优点使得板条固体激光器成为功率定标放大的重要途径。为了实现良好的光束质量,非稳腔结构是重要手段^[7-10],劳伦斯利弗莫尔国家实验室的热容激光

收稿日期: 2019-02-28; 修回日期: 2019-03-01; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61875203, 61805251, 1171101412, 11704382, 11811530290)

* E-mail: Pingyang2516@163.com; ** E-mail: lizhidong@ioe.ac.cn

器^[11]、波音公司的薄片激光器^[12]、通用原子公司的浸入式液冷激光器^[10]均采用了该结构。随着抽运功率和腔内模块数目增加,腔内急剧增长的像差畸变要求采用腔内自适应光学对其进行主动补偿,以实现高光束质量输出^[13]。然而传统驻波非稳腔往返光路不同:往,是平行光路;返,是发散光路。非平行光路的存在,使变形镜和倾斜镜面型不共轭于增益介质像差,要求更为复杂的算法(松弛迭代算法^[13]、几何近似法^[14])对自适应光学系统进行控制,而且难以得到准确解;同时,非平行光路中的增益介质造成的光程差,可能形成小尺寸透镜效应,导致局部稳腔出现,不利于高平均功率和高光束质量激光输出^[4]。

为此,本文提出环形非稳腔结构解决非共轭校正问题,可将传统驻波非稳腔中的非共轭像差转化为共轭像差后进行校正。板条置于环形非稳腔平行光路中,这种巧妙的结构会带来以下优点^[15-20]:1)变形镜和倾斜镜的面型共轭于增益介质像差,可采用共轭的传统自适应光学进行校正,不需要复杂算法;2)置于平行光路中的板条,其光程差不会导致破坏性的热透

镜效应。本文搭建了百瓦级环形非稳腔 Nd:YAG 板条激光器。利用 980 nm 参考光束和 Shack-Hartmann 波前传感器实时测量腔内像差,并结合加权最小二乘法复原波前,采用倾斜镜和变形镜对其进行共轭校正。实验结果表明,该方案不仅可提高激光输出功率,还将光束质量提高了 2 倍以上。

2 腔内像差探测及校正原理

2.1 腔内像差测量

校正环形非稳腔腔内像差前,需掌握激光实时像差特性。采用参考光束和 Shack-Hartmann 波前传感器对整个环形腔像差进行实时测量,光路如图 1 所示。从腔镜 M1 处引入一束口径为 80 mm 的 980 nm 准直参考光束,使其沿激光输出的反方向传播,依次经过透镜 2、M2、限孔光阑、透镜 1、板条和 M3,最后从 M4 出射进入波前传感器。测量过程如下:未出光时,对 Hartmann 子孔径进行精确标定;出光过程中,波前传感器实时测量参考光束波前斜率,采用加权最小二乘法复原波前,利用变形镜(DM)和倾斜镜(TTM)进行校正^[21]。

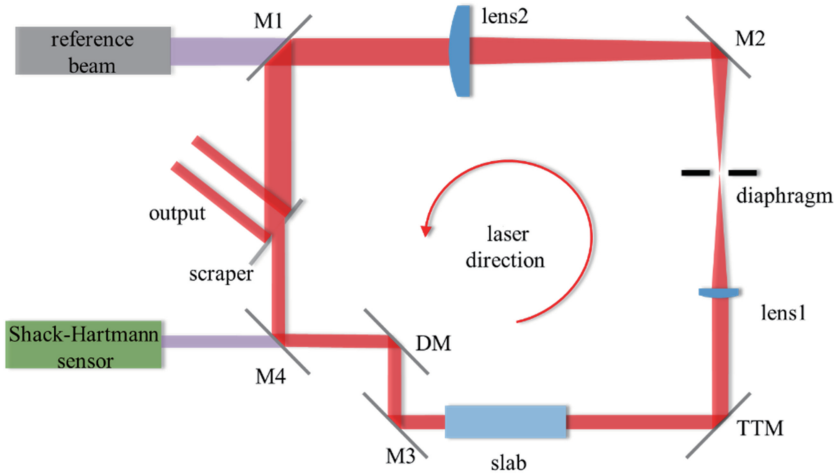


图 1 环形非稳腔腔内像差探测光路

Fig. 1 Optical path to detect the intra-cavity aberrations in an unstable ring resonator

2.2 腔内像差校正

自适应光学系统通过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复原波前,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^[22]

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

式中: G 为变形镜的响应函数矩阵。最小二乘法下 V 的最优解 V' 为

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

式中:“+”表示广义逆运算。上述方法的直接目标是使校正后波前斜率均方根最小。

传统自适应光学系统中,待校正波前像差成分主要以低阶为主,通常采用最小二乘法能获得很好的校正效果。而板条固体激光器的上下边缘由于端面效应的存在^[3],最终造成 M 型分布的板条像差畸变,超过变形镜拟合能力。常规最小二乘法会导致难以校正的大幅值波前斜率权重高而易校正的小幅值波前斜率权重低,影响校正结果。实验发现,若采用常规最小二乘法复原腔内像差,环形腔输出光束

质量的改善不明显;若优先校正波前斜率较小的部分,光束质量将得到明显优化。

为此,本文采用加权最小二乘法复原波前^[21]。首先采用常规最小二乘波前复原方法进行初始校正,随后对残差斜率分配不同权重,对超越变形镜拟合能力的波前斜率给出小于1的权重,其余斜率权重仍为1,优化后电压 V'' 为^[23]

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

式中: W 为各子孔径斜率赋予权重的对角矩阵。通过对各子孔径的残差斜率进行权重分配,可重点校正波前斜率小的部分,弱校正或不校正波前斜率大的部分,最终在远场衍射极限区域内集中更多能量。

3 实验装置

环形非稳腔腔内像差校正实验装置如图2所示,其中像差主要来源于Nd:YAG板条。板条尺寸

为150.2 mm×30 mm×2.5 mm(长×宽×厚),楔角45°,采用传导冷却、半导体激光器(LD)端面抽运结构。板条中心区域Nd掺杂浓度为0.6%,长度120 mm,两端为无掺杂YAG晶体。板条中激光沿Z字型传播,可有效减小厚度方向的热效应。环形腔由三个平面反射镜(M1、M2和M4)、一个倾斜镜(TTM,行程量1.8 mrad)、一个连续表面变形镜(DM,59单元,行程量5 μm)、透镜1(焦距400 mm)、透镜2(焦距600 mm)和一个刮刀镜(中心矩形孔尺寸30 mm×3.6 mm)组成。透镜1和透镜2共焦,环形腔几何放大率为1.5。限孔光阑置于其焦点,可抑制倒向波,提高正向波输出功率^[24]。刮刀镜输出的光束被整形为40 mm×45 mm矩形光斑,经分光镜(BSM)分为两束:功率较低的一束被透镜3(焦距0.9 m)会聚到相机(Baumer TXG04)中,实时记录输出光束远场光强分布;功率较高的一束直接导入功率计(PM)中。

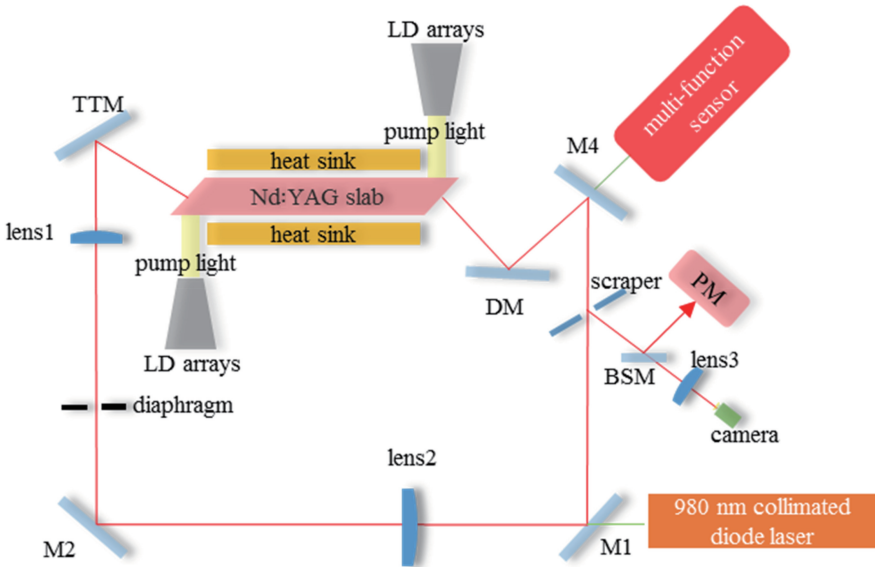


图2 环形非稳腔腔内像差自适应光学补偿实验装置

Fig. 2 Experimental setup of intra-cavity aberration adaptive optics compensation in the unstable ring resonator

实验过程中980 nm半导体激光器经光纤耦合输出后,被准直为80 mm口径的参考光束,将其从M1引入,沿着环形腔顺时针传输,依次经过透镜2、M2、限孔光阑、透镜1、倾斜镜、Nd:YAG板条和变形镜,最后透过M4进入复合传感器。复合传感器由Shack-Hartmann波前传感器、近场相机(Baumer TXG02)和远场相机(Baumer TXG03)组成,不仅可为环形腔光路调节提供参考,而且可实时测量腔内像差。波前传感器采样频率700 Hz,分析发现腔内像差变化频率90%以上低于10 Hz,整个自适应光学系统误差抑制带宽约为30 Hz。因此腔

内像差从时间带宽上可得到有效校正。

当变形镜面型与腔内像差严格共轭时可达理想校正效果,此时采用Fox-Li数值迭代法^[25-26]计算得到的输出光束远场强度分布如图3所示,光束质量因子(β)为1.05倍衍射极限。

4 分析与讨论

图4所示为环形非稳腔腔内像差校正前后的功率曲线。腔内像差校正后,输出功率得到明显提高,抽运功率为2263 W时,输出功率从105.8 W增加到113.1 W。上述实验结果是在激光器阈值抽运功

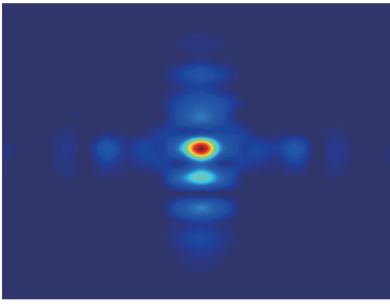


图 3 腔内像差得到理想校正后的输出光束远场强度分布
Fig. 3 Far-field intensity distribution of output beam with intra-cavity aberrations corrected perfectly

率附近取得的,因而光光效率计算结果偏低^[27]。由图 4 可知,其对应的斜效率为 22.4%。

图 5 所示为抽运功率为 2263 W 时腔内像差校正前后参考光束的远场光强分布。像差使参考光束的远场变为弥散光斑,经校正后弥散光斑消失,远场会聚为一个亮斑,光束质量明显提高,说明腔内像差得到有效校正。

图 6 所示为抽运功率为 2263 W 时 980 nm 参考光束的质心位置校正前后的分布情况。实验过程中,先对无抽运的参考光束进行精确标定,将其质心作为后续校正的基准位置。从图中可以看出,校正后质心基本回到标定位置附近,且质心分布有效半径从校正前 34 μrad 减小为校正后 12 μrad ,缩小一半以上。腔内像差的校正使得参考光束更加稳定、集中。

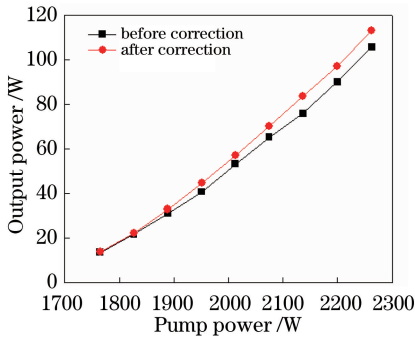


图 4 腔内像差校正前后输出功率曲线变化
Fig. 4 Output power before and after intra-cavity aberration correction

抽运功率为 2263 W 时,用加权最小二乘法复原腔内像差,像差校正前后的输出光束远场光强分布如图 7 所示,光束质量 β 因子从 6.98 优化到 2.33。图 8 所示为输出光束远场质心分布,校正前有效半径为 117 μrad ,校正后为 10 μrad ,有效半径缩小 90% 以上,这说明腔内像差校正后输出光束指向更稳定、集中。图 9(a)为腔内像差校正前的

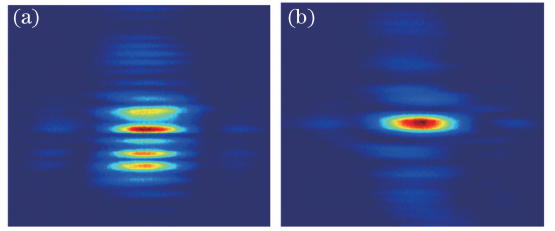


图 5 980 nm 参考光束的远场光强分布。
(a)校正前;(b)校正后

Fig. 5 Far-field intensity distributions of 980 nm reference beam. (a) Before correction; (b) after correction

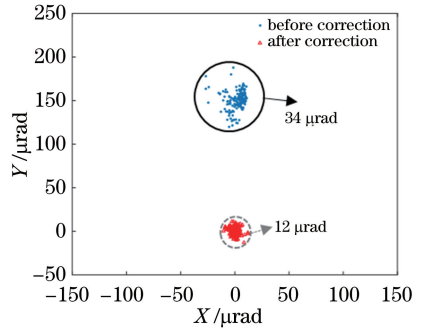


图 6 抽运功率为 2263 W 时校正前后 980 nm 参考光束的远场光斑质心位置
Fig. 6 Far-field centroid distribution of 980 nm reference beam under 2263 W pump power

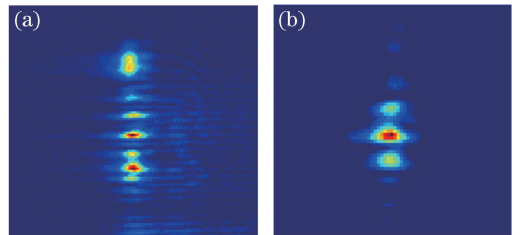


图 7 输出光束的远场光强分布。
(a)校正前, $\beta=6.98$; (b)校正后, $\beta=2.33$

Fig. 7 Far-field intensity distributions of output beam. (a) Before correction, $\beta=6.98$; (b) after correction, $\beta=2.33$

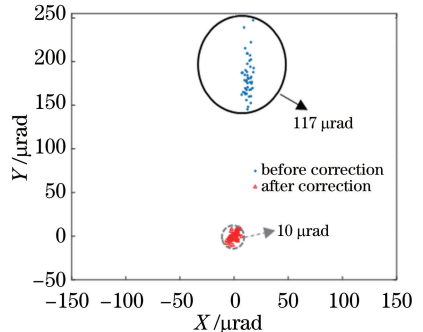


图 8 抽运功率为 2263 W 时输出光束的远场光斑质心分布
Fig. 8 Far-field centroid distribution of output beam under 2263 W pump power

分布,边缘像差大,中间像差小,均方根(RMS)为 $0.75\ \mu\text{m}$;图9(b)为腔内像差校正后的残差分布,除4个角落像差较大外,其他位置像差都明显减小,RMS为 $0.28\ \mu\text{m}$;图9(c)反映了Legendre多项式系数的变化情况,像差主要集中于前15项Legendre多项式中。校正后第6项、第9项和第

12项的像差系数绝对值明显减小。以上结果表明腔内自适应光学对环形非稳腔腔内像差实现了有效校正,并有效改善了激光的光束质量。图10所示为利用Ocean Optics光谱仪(HR4000)测得的输出光束光谱图,其中心波长为 $1064.9\ \text{nm}$,半峰全宽为 $0.28\ \text{nm}$ 。

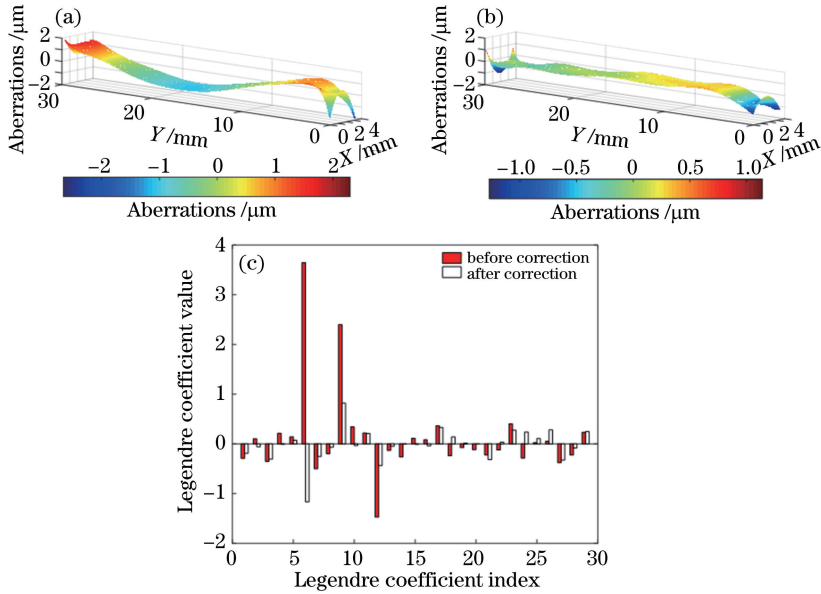


图9 腔内典型像差。(a)校正前,RMS为 $0.75\ \mu\text{m}$; (b)校正后,RMS为 $0.28\ \mu\text{m}$; (c)校正前后Legendre多项式系数
Fig. 9 Intra-cavity aberrations. (a) Before correction, RMS is $0.75\ \mu\text{m}$; (b) after correction, RMS is $0.28\ \mu\text{m}$; (c) coefficients of Legendre polynomial expansion before and after correction

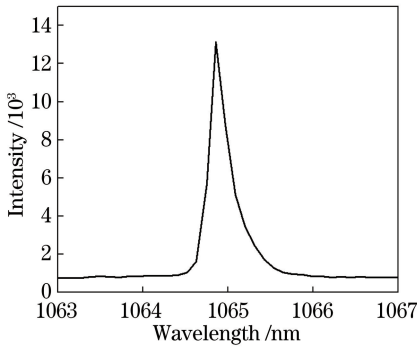


图10 输出光束光谱
Fig. 10 Spectrum of output beam

5 结 论

提出利用环形非稳腔将传统驻波非稳腔腔内像差非共轭校正问题转换为共轭问题;通过引入 $980\ \text{nm}$ 参考光束和Shack-Hartmann波前传感器对腔内像差进行实时测量;当板条固体激光器中存在超越变形镜拟合能力的像差时,采用加权最小二乘法复原波前,使变形镜主要补偿波前斜率较小的部分。最终将输出功率从 $105.8\ \text{W}$ 提高到 $113.1\ \text{W}$,

并将输出光束质量 β 因子从 6.98 优化到 2.33 。该研究为固体激光器实现高功率、高光束质量提供了一种新的技术路线。

致谢 感谢中国科学院理化技术研究所对本文所述工作的大力支持。本文工作开展过程中,作者与王小军研究员、郭亚丁副研究员、孟帅博士进行了广泛的讨论,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

[1] Zhou S H, Yan J X, Feng G Y. DPSSL with high-average-power fine-beam-quality [M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2016: 1-15. 周寿桓, 阎吉祥, 冯国英. 高平均功率高光束质量全固态激光器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 1-15.

[2] Tulloch W M, Rutherford T S, Gustafson E K, *et al.* A 100 W edge-pumped Nd:YAG conduction-cooled slab laser[C] // Advanced Solid State Lasers, January 31-February 3, 1999, Boston, Massachusetts. Washington, D. C.: OSA, 2001: MA4.

- [3] 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.
- [4] Injeyan H, Goodno G D. High-power laser handbook [M]. New York: Mc Graw Hill Companies, 2011: 1-77, 176-222.
- [5] Wang J T, Tong L X, Xu L, *et al.* 5 kW end-pumped Nd:YAG slab lasers and beam quality improvement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0101003.
王君涛, 童立新, 徐浏, 等. 5 kW Nd:YAG 端面抽运板条激光器及其光束质量提升[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0101003.
- [6] Ji L T, Zou Y, Li Z T, *et al.* Improvement of gain medium thermal effect in Nd:YAG grazing incidence slab laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1101005.
季林涛, 邹岩, 李之通, 等. 改善 Nd:YAG 掠入射板条激光器增益介质热效应的研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1101005.
- [7] 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.
- [8] Liu Z J, Zhou P, Xu X J. 100 kW level LD pumped coherent laser array system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(1): 011402.
刘泽金, 周朴, 许晓军. 对百千瓦级全固态激光相干阵列系统的分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(1): 011402.
- [9] 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.
- [10] Chen J B, Guo S F. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0602006.
陈金宝, 郭少锋. 高能固态激光器技术路线分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602006.
- [11] Ren G G, Huang Y N. Diode pumped solid-state laser stride forward 100 kW[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(8): 617-622.
任国光, 黄裕年. 二极管抽运固体激光器迈向 100 kW[J]. *激光与红外*, 2006, 36(8): 617-622.
- [12] Avizonis P V, Bossert D J, Curtin M S, *et al.* Physics of high performance Yb:YAG thin disk lasers [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, May 31-June 5, 2009, Baltimore, Maryland, United States. Washington, D. C.: OSA, 2009: CThA2.
- [13] Su H. Study on coupling dynamics in high-power solid state lasers with unstable cavity[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2015: 1-9.
苏华. 非稳腔式高能固体激光器中的耦合动力学研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015: 1-19.
- [14] 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.
- [15] Freiberg R J, Chenausky P P, Buczek C J. CO₂ unstable confocal ring resonators[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1972, 8(6): 555-556.
- [16] Freiberg R J, Chenausky P P, Buczek C J. Unstable asymmetric traveling-wave resonators for high-power laser applications [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, 9(6): 716-717.
- [17] Freiberg R J, Chenausky P P, Buczek C J. Unidirectional unstable ring lasers [J]. *Applied Optics*, 1973, 12(6): 1140-1144.
- [18] Latham W P. Analysis of reverse wave suppression in multiline chemical lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 642: 28-35.
- [19] Siegman A E. Lasers[M]. Mill Valley, California: University Science Books, 1986: 899-901.
- [20] Oughstun K E, Slaymaker P A, Bush K A. Intracavity spatial filtering in unstable ring resonator geometries: part I-passive cavity mode theory [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19(10): 1558-1577.
- [21] 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.
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.
- [22] Jiang W H, Li H G. Hartmann-Shack wavefront sensing and wavefront control algorithm [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1271: 82-94.
- [23] 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.
- [24] Wang X, Lai B H, Dong L Z, *et al.* A 1350 W Nd:YAG unstable ring laser with efficient reverse wave suppression [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 82-85.

- [25] Fox A G, Li T Y. Resonant modes in a maser interferometer [J]. The Bell System Technical Journal, 1961, 40(2): 453-488.
- [26] Fox A G, Li T Y. Modes in a maser interferometer with curved and tilted mirrors[J]. Proceedings of the IEEE, 1963, 51(1): 80-89.
- [27] Chen Y Q, Wang J H. Laser principle [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992: 313-319.
- 陈钰清, 王静环. 激光原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992: 313-319.