

doi: 10.3788/lop47.041203

板条激光器光束质量评价及提高光束质量的方法

胡诗杰^{1,2} 吴 健¹¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ²电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 针对板条激光器输出光束形态为条形的特点,分析了各种光束质量评价方法对板条激光器输出光束质量评价的适用性,并选出了一种最适合板条激光光束质量的评价方法。高功率板条激光器要输出高光束质量的光束,可以在板条激光器的设计阶段采用相关技术来提高输出光束质量,对输出后有像差的光束可经整形后,采用自适应光学技术来提高光束质量。

关键词 板条激光器; 光束质量; 评价方法; 自适应光学

中图分类号 O436 OCIS 140.3480 140.5560 文献标识码 A

Evaluation and Improvement of Beam Quality of Slab Laser

Hu Shijie^{1,2} Wu Jian¹

¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu, Sichuan 610209, China
²University of Electronics Science and Technology of China, School of Optoelectronic Information,
 Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract Several evaluation methods for laser beam quality were reviewed, their applicability for the outline characteristic of slab laser was analyzed and an evaluation method for slab laser was chosen. To get good beam quality of slab laser, a correlative technique can be used to improve beam quality of slab laser while the laser is designed. When the shape of the rectangle beam of slab laser is changed, the adaptive optics technique can be used to improve beam quality. For output beam of the practical slab laser, good quality beam can be got after adaptive optics is used.

Key words slab laser; beam quality; evaluation method; adaptive optics

1 引 言

随着激光技术的不断发展,高平均功率固体激光器以其峰值功率高、结构紧凑等特点,在工业(如工业激光材料加工、切割、热处理、打标)、科学研究、军用(如测距、激光雷达、光电对抗)和空间通信等领域都有广泛应用。普通固体激光器激光工作物质的几何形状为圆棒状,温度梯度的方向与光传播方向垂直,在热负荷条件下运转时,将产生严重的热透镜效应和热光畸变效应,严重影响激光器的输出功率和光束质量。1969年美国通用电器公司提出板条激光器的概念,他们使用面抽运的板条状几何结构,通过合理设计的“之”字形光路^[1],消除一阶热聚焦^[2]、应力双折射^[3]和退偏效应,从而得到比棒状工作物质作为固体激光器更高的平均输出功率和更好的光束质量。这种激光器在工作时,温度梯度发生在板条厚度方向上(板条宽度方向上的两侧面被热绝缘),而光在厚度方向的两侧面(即抽运面)上发生全内反射,呈锯齿形光路在两抽运面之间传播,光传播方向近似与温度梯度方向平行,利用激光介质的对称性和“之”字型光路消除一阶热效应,从而减小激光束的热透镜效应和热光畸变效应,因此得以输出更高的平均输出功率和更好的光束质量的激光。尽管如此,这种激光器在高功率抽运下,由于板条固体激光器工作介质宽、厚度比较大,

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-10

基金项目: 国家 863 计划 802 资助课题。

作者简介: 胡诗杰(1973—),男,硕士,副研究员,主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: seakeyhu@yahoo.com.cn

仍然存在有一定的热透镜效应,在板条宽度方向的光束质量较差^[4,5]。

由于板条激光器输出条形光束,准确衡量这种输出光束的光束质量是激光生产中必须考虑的问题。本文将针对条形激光光束的特点,分析各种评价方法对条形光束质量评价优势和缺陷,优选一种适合条形光束的光束质量评价方法。然后分析几种提高板条激光光束质量的方法,阐述了自适应光学技术是提高板条激光器输出光束质量的有效方法。

2 光束质量评价方法

激光光束质量的评价应该从最能反映光束特征、最具有物理内涵的特征量来表征光束质量。在实际工作中,除了用波前相位误差来描述激光输出光束的光学质量外,还需要对成像的光束质量做出一个直观评价,以反映激光光束最终效果,于是人们定义了各种光束质量指标。特别是在激光束应用系统中,除了对输出功率(能量)、效率和稳定性有要求外,光束质量是最终衡量系统效能的重要质量指标。

常用的光束质量指标有:聚焦光斑尺寸、远场发散角、衍射极限倍数 β 和斯特列尔比(Strehl ratio)、 M^2 因子、靶面上的功率或环围能量比等。各种光束质量指标是针对不同应用目的来定义的,反映的光束质量的侧重点也不同,可以根据需要选择。

2.1 聚焦光斑尺寸

指光束经聚焦系统后,焦平面上光斑的大小。聚焦光斑尺寸作为衡量光束质量的标准简便直观,一般而言,焦斑的大小除了与光束本身特性有关外,还与聚焦系统的特性有关。聚焦光斑尺寸越小,光束远场发散角越大,准直距离也越短。因此,只用聚焦光斑尺寸一个参数作为光束质量判据是不够的。

2.2 远场发散角

远场发散角决定激光光束可以传输多远距离而不显著发散开来,与可聚焦多少能量有关,是激光许多实际应用中常作为判断光束质量的参数。设激光沿 z 轴传输,束宽为 $\omega(z)$ 。定义远场发散角 $\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} [\omega(z)/z]$,由于 θ 可以通过扩束或聚焦改变,因此作为光束质量判据时束宽必须取一定值才有意义。

2.3 衍射极限倍数

衍射极限倍数 β 定义为实际聚焦光斑尺寸 r 与衍射极限光斑尺寸 r_0 的比值: $\beta = r/r_0$ 。确定 β 因子的关键在于理想光束的确定。在实用中, β 因子以理想光束作为参照标准,参考光束有多种选取方法,对于同一实际光束,选取不同的参考光束会得到不同的 β 值,这样就给 β 因子的测定带来了不确定性,因此必须统一和规范参考光束的选择。一般来讲,被测光束如果是圆形实心光束,则参考光束选择为圆心实心均匀光束,如果被测光束为圆形空心光束,则参考光束选择为圆形空心均匀光束。

2.4 斯特列尔比和环围能量

斯特列尔比 S_R 指实际远场光斑峰值光强与理想无波像差的光斑峰值光强的比值,也称为峰值斯特列尔比。对于一些应用,也常用实际光斑中 r_0 范围内的环围能量与理想光斑 r_0 内的能量之比代替 S_R 作为光束质量的表征,也称为环围斯特列尔比^[6]。斯特列尔比在大气光学和自适应光学研究中应用十分普遍,有时也绘出以光束半径为横坐标,圆形区域内归一化的能量为纵坐标的曲线,称为环围能量曲线。从曲线可以看出衍射极限倍数、斯特列尔比等指标参数。环围能量曲线比较容易从测量的真实远场获得。

2.5 M^2 因子和 K 因子

根据国际标准化度量局的定义, M^2 因子的定义为实际光束的空间束宽积与理想高斯光束的空间束宽积的比值^[7]: $M^2 = \frac{\pi\omega\theta}{4\lambda}$,式中 ω 为光束的束腰直径即光斑宽度 $\omega(z)$ 的极小值, λ 为波长。 M^2 因子的倒

数称为光束传输 K 因子, 有 $K = \frac{4\lambda}{\pi\omega\theta}$ 。由于 M^2 与可用于描述激光光束质量的诸多参数如远场发散角、聚焦光斑尺寸等相比较, 它可以更为严格和全面地表征激光光束质量。由于束腰直径与远场发散角的乘积是一个不变量^[8], 所以对理想高斯光束有 $\omega\theta = 4\lambda/\pi$ 。因此, 使用 M^2 比仅使用聚焦光斑尺寸或发散角衡量光束质量更为全面一些。

3 提高光束质量的方法

假定板条激光器的输出光束为图 1 所示的条形光斑, 并且假定这种条形光斑近场为均匀分布的平面波, 它对应的远场光斑如图 2 所示。从图 2 可以看出, 这种远场光斑为条形远场光斑, 其能量并不像圆形或者方形光斑那样集中, 所以对这种条形远场光斑光束质量的评价, 一般不采用衍射极限倍数、斯特列尔比、环围能量或者桶中功率比来评价。

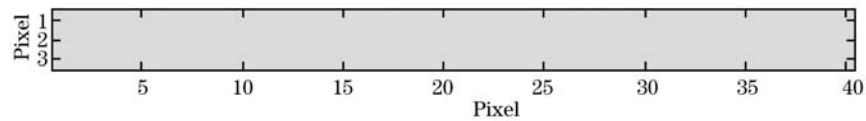


图 1 板条激光器输出的条形光斑

Fig.1 Output rectangle beam of slab laser

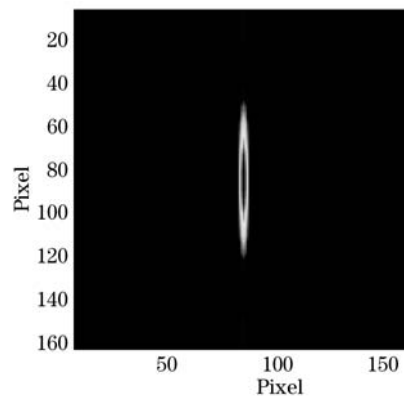


图 2 图 1 中的条形光斑对应的远场光斑

Fig.2 Farfield spot of the rectangle beam in Fig.1

在西格曼的 M^2 理论中, 其理想光束取的是基模高斯光束, 对于单模板条激光器输出光束, 同样遵循基模高斯光束的输出特征, 在输出光束的长度方向, 其光斑尺寸相对较大, 在输出光束的宽度方向, 其光斑尺寸相对较小, 发散角在两个方向也不一样。所以, 板条激光器两个方向的光束质量可以用 M^2 表示为

$$M_x^2 = \frac{\pi}{\lambda} \omega_x \theta_x, \quad M_y^2 = \frac{\pi}{\lambda} \omega_y \theta_y. \quad (1)$$

因此, 对于板条激光器输出条形光束来说, M^2 可以较全面地衡量板条激光输出光束的光束质量。

但是, 在实际应用中, 图 2 所示的条形远场光斑由于不能很好地集中能量, 当需要集中其能量时, 可以通过整形并扩束的方式来改变它的形状, 以满足远场光斑能量集中的要求。整形后的形状可以为图 3 所示的方形光束, 此时, 它对应的远场光斑如图 4 所示。这种远场光斑能量集中程度较高, 其光束质量评价可以采用衍射极限倍数、斯特列尔比、环围能量或者桶中功率比等。

要获得高质量的高功率板条激光器的输出光束, 除了在板条激光器的设计阶段采取必要措施提高光束质量外, 在激光输出后, 还可以采用自适应光学技术对其像差进行补偿。在激光器的设计阶段, 可以提高光束质量的方法有: 用软边光阑限束代替硬边光阑限束^[9]、采用高填充因子和双程非共线放大技术抑制放大器的自发辐射、采用喷射性技术抑制晶体板条的热致畸变、采用高质量的光学元件抑制热致畸变等技术,

同时在机械装调阶段, 采取相关技术措施抑制机械应力形变对光学元件造成的输出光束波前畸变。在激光输出后, 高功率板条固体激光器仍然会因为板条激光器本身固有的特性残留有像差, 而这些像差可以采用自适应光学技术得到补偿。

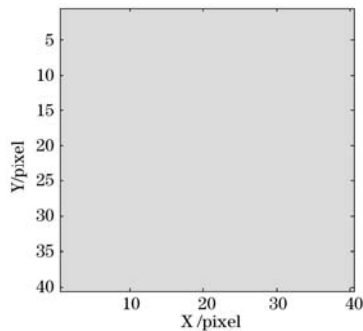


图 3 方形光束
Fig.3 Square beam

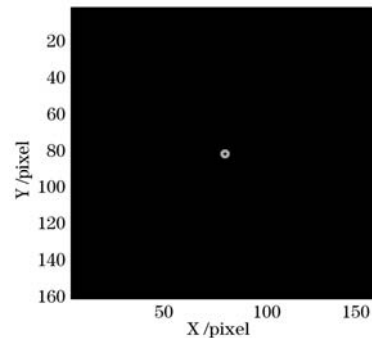


图 4 图 3 中方形光斑对应的远场光斑
Fig.4 Farfield spot of the square beam in Fig.3

4 自适应光学提高板条激光光束质量

对于高功率板条固体激光器来说, 不管对板条激光器的抽运、冷却方式、激光介质或者光学谐振腔采取怎样的优化设计, 其在输出过程中仍然有热透镜效应存在, 并存在其他像差。其在宽度方向和厚度方向, 特别是宽度方向仍然存在着像差, 所以, 采用自适应光学技术抑制输出激光光束的像差, 提高板条激光光束质量是板条激光输出后必须采用的技术。对于自适应光学技术对板条激光器输出光束的校正, 据文献[10]报道, 美国雷神公司对图 5 所示的条形输出激光经整形后, 变为方形光斑, 然后采用自适应光学技术获得了较好的校正效果。图 5 是板条激光器在输出 4.2 kW 时的条形光斑干涉图, 它的波前畸变的峰谷(PV)大约为 $2 \mu\text{m}$ 。这种条形光斑是图 6 所示的 200 W 的主振荡(MO)激光经四级双程放大后的光斑, 为了在输出后获得良好光束质量的激光, 采用了自适应光学技术对其校正。条形光斑在进入自适应光学系统校正前, 为了满足自适应光学技术的校正要求, 需要整形为方形光斑。为了补偿整形后的光束像差, 自适应光学系统中变形反射镜产生相应的形变补偿如图 7(a)所示的波前畸变(OPD 表示光程差), 校正后的残余误差如图 7(b)所示。未校正前的畸变波前对应的远场光斑如图 7(c)所示, 图 7(d)所示的是自适应光学技术校正后的远场光斑。从图 7(b), 7(d)可以看出, 自适应光学技术校正后, 畸变波前得到了很好的补偿, 同时也得到了较好的远场光束质量。所以要获得功率较高、光束质量好的激光输出, 除了在激光器的设计阶段采取必要措施外, 采用自适应光学技术对其输出光束进行校正是必然的选择。

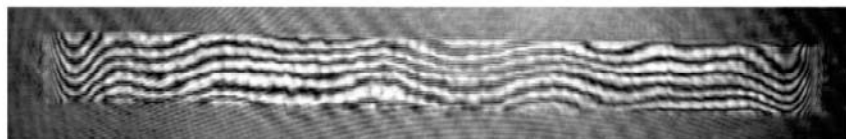


图 5 4.2 kW 板条激光器输出的条形光斑干涉图, 其波前畸变的 PV 大约 $2 \mu\text{m}$

Fig.5 Interferogram of the spot of zigzag slab laser emitting 4.2 kW. Peak-to-valley (PV) wavefront distortion is approximately $2 \mu\text{m}$

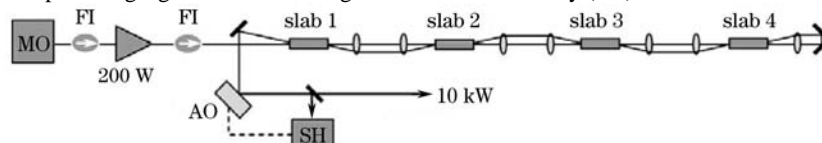


图 6 四个功率放大器的板条主振荡功率放大器 (MOPA) 结构

Fig.6 MOPA configuration with four power amplifier slabs

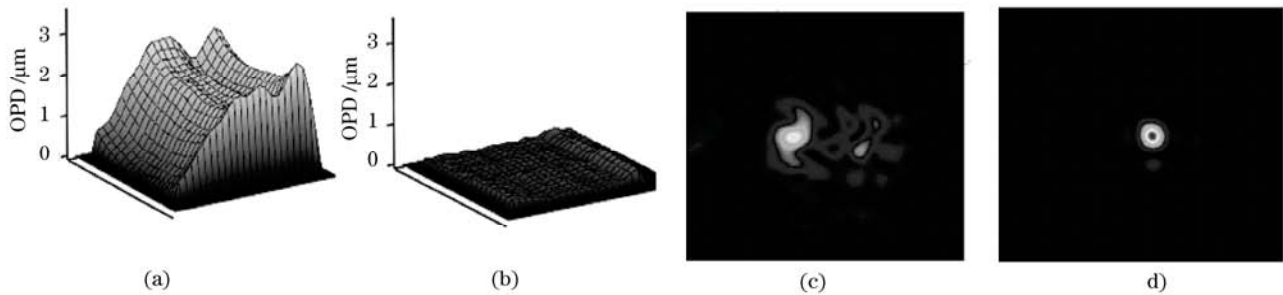


图 7 板条激光器校正前的输出波前、远场光斑与校正后的残余波前、远场光斑。(a) 整形后的开环方形畸变波前；(b) 自适应光学技术校正后的残余误差；(c) 开环远场光斑；(d) 闭环远场光斑

Fig.7 Slab MOPA wavefronts (top) and far-field intensity profiles (bottom). (a) square wavefront with aberration;(b) residual wavefront after adaptive optics correct;(c) open-loop farfield;(d) close-loop farfield

5 结 论

针对板条激光器输出光束形态为条形状的特点，分析了各种光束质量评价方法对板条激光器输出光束质量评价的适用性，并选出了一种最适合板条激光器输出时的光束质量评价方法；当板条激光器输出光束在需要能量集中应用时，可以首先采用扩束并准直的方式，然后通过成像系统对其聚焦，此时的光束质量评价可以采用衍射极限倍数、环围能量、桶中功率比等进行评价。如要提高高功率板条激光器输出高光束质量，可以在板条激光器的设计阶段采用相关技术来提高输出光束质量，对输出后的有像差的光束经整形后，采用自适应光学技术来提高板条激光器光束质量。

参 考 文 献

- 1 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser-part I:Theory[J]. *IEEE J. Quantum Electron.* 1984, **QE-20**(3): 289~300
- 2 T. J. Kane, R. C. Eckardt, R. L. Byer. Reduced thermal focusing and birefringence in zig-zag slab geometry crystalline lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.* 1983, **QE-19**(9): 1351~1354
- 3 K. Kuba, T. Yamamoto, S. Yagi *et al.*. Improvement of slab-laser beam divergence by using an off-axis unstable-stable resonator[J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(2): 121~123
- 4 Zhang Lingling, Meng Junqing, Huang Yan *et al.*. Recent advances in high-power solid-state slab lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 33~35
张玲玲, 孟俊清, 黄燕等. 高功率板条激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 33~35
- 5 Wang Zhimin, Xu Jianqiu, Chen Weibiao. Progress of high-power solid-state slab lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(2): 48~53
王志敏, 徐建秋, 陈卫标. 新一代大功率固体板条激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(2): 48~53
- 6 Du Xiangwan. Factors for evaluation beam quality of a real high power laser on the target surface in far field[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(4): 327~332
杜祥琬. 实际高能激光远场靶面上光束质量的评价因素[J]. *中国激光*, 1997, **A 24**(4): 327~332
- 7 A. E. Siegman. New developments in laser resonators[C]. *SPIE*, 1990, **1224**: 2~14
- 8 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1999. 65~66
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 65~66
- 9 Lü Baida, Feng Guoying, Kong Fanlong *et al.*. Experimental comparison of the output beam quality of the Nd: glass slab laser with VRM[J]. *Laser Technology*, 1998, **22**(5): 276~279
吕百达, 冯国英, 孔繁龙等. 板条激光器VRM光腔输出激光光束质量实验比较[J]. *激光技术*, 1998, **22**(5): 276~279
- 10 Gregory D. Goodno, Charles P. Asman, Jesse Anderegg *et al.*. Brightness-scaling potential of actively phase-locked solid-state laser arrays[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 460~471