

板条激光模块热致波前畸变自校正设计

刘 亮^{1,2,3}, 王姗姗⁴, 黄秀军¹, 徐红艳¹, 宋镇江¹, 石德乐¹

¹ 山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264670;

² 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

³ 海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001;

⁴ 烟台工贸技师学院, 山东 烟台 264001

摘要 为了解决板条激光器输出激光光束质量不高的问题,建立了激光在板条激光模块中沿“之”字形光路传输时的热致波前畸变模型。对热致波前畸变的分布特点进行了研究,并提出了一种减小热致波前畸变的方法。数值仿真结果表明,通过合理的光路设计,优化激光以同一角度两次进入板条介质时的位置偏移量,可以达到减小板条厚度方向上热致波前畸变的目的。

关键词 激光光学; 热效应; 激光放大器; 波前畸变; 自校正

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111407

Self-Correction Design for Thermal-Induced Wavefront-Distortion in Slab Laser Module

Liu Liang^{1,2,3}, Wang Shanshan⁴, Huang Xiujun¹, Xu Hongyan¹, Song Zhenjiang¹, Shi Dele¹

¹ Shandong Institute of Space Electronic Technology, Yantai, Shandong 264670, China;

² College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³ Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China;

⁴ Yantai Industry and Trade Technician College, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract In order to solve the problem of poor output beam quality of slab lasers, we establish a thermal-induced wavefront-distortion model of the lasers transfer along zigzag in slab laser module. Distribution characteristics of thermal-induced wavefront-distortion are studied and a method for reducing thermal-induced wavefront-distortion is proposed. Numerical simulation results show that the position offsets of laser beam propagating through the slab medium twice at the same angle can be optimized to eliminate the thermal-induced wavefront-distortion in thickness direction of slab with the help of reasonable optical path design.

Key words laser optics; thermal effect; laser amplifier; wavefront-distortion; self-correction

OCIS codes 140.6810; 140.3280

1 引言

自 20 世纪 60 年代美国科学家梅曼研制出世界上第一台激光器以来,激光以其优异的性能在工业、科

收稿日期: 2017-05-16; **收到修改稿日期:** 2017-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61205206)、航天科技集团第五研究院创新基金

作者简介: 刘 亮(1981—),男,博士后,讲师,主要从事固体激光器热管理技术、光电对抗技术方面的研究。

E-mail: ll06b@126.com

导师简介: 石德乐(1971—),男,博士,研究员,主要从事航天光电产品设计方面的研究。

E-mail: sh_dl@163.com(通信联系人)

研、医疗、军事等领域获得了广泛应用。在高效及高功率激光领域,获得高光束质量的高功率激光一直是科研人员追求的目标。然而,在高功率条件下,固体激光介质中会产生热聚焦、热致双折射及热退偏效应,导致激光器的输出功率下降,光束质量退化。研究人员提出了多种热管理技术与措施,如:尽可能减少进入工作介质的无用热量^[1-3];用最有效、不良影响最小的方法导出无用热量^[4-5];减小热效应造成的不良影响^[6-9];采用热容工作模式^[10]。其中,光束质量主动控制技术^[6,11]通过对光束波前畸变的实时准确测量,能够实时、精确地补偿相位畸变,提高输出光束的远场光束质量,在高功率激光系统中应用广泛。然而,受限于变形镜空间分辨率和自适应光学(AO)系统的带宽,仅通过主动控制技术难以获得高光束质量的激光输出。

板条激光器于1969年由美国通用公司推出,美国诺格公司^[12-13]、达信公司^[14-15]的100 kW级固体激光器均采用板条激光介质。国内多家单位开展了板条激光器的相关理论和实验研究工作。例如:周寿桓等^[16]于2009年采用自行设计的传导冷却端面抽运Nd:YAG板条(CCEPS)模块,获得了11.4 kW的激光输出;刘刚等^[17]采用计算流体力学方法对CCEPS激光器的多种水冷设计方案分别进行了流固耦合传热数值模拟;刘亮等^[18-19]建立了CCEPS模块热效应模型,对“之”字形光路消除热致波前畸变的能力进行了分析;Yang等^[20]采用基于随机并行梯度下降算法的变形镜对板条放大器的输出激光进行了光束净化;徐鏊婧等^[21]对静态波前畸变量、输出功率为百瓦量级和千瓦量级的波前畸变量进行了数据分析,对实验光路提出了改进意见;Tang等^[22]建立了CCEPS热效应仿真模型,对温度场分布、退偏损耗及端面变形进行了仿真计算,并通过实验对模型进行了验证;李密等^[23]对双掺杂浓度板条激光技术开展了理论设计和实验研究,通过分段掺杂提高单个激光板条的平均储能密度,总储能提高了39%。

近年来,基于板条介质的固体激光器在输出功率上有了很大提高,但是受到变形镜空间分辨率、响应带宽等因素的影响,光束质量普遍较差。要解决这一问题,必须要对板条激光模块的热效应问题进行深入研究。

本文建立了板条激光器热致波前畸变数值分析模型,研究后发现,入射激光进入板条介质位置的变化会导致波前畸变的波形变化,据此提出了一种波前畸变自校正方法,这对高功率板条激光器/放大器的设计具有一定意义。

2 热效应模型

2.1 温度场

图1为二维矩形复合板条激光介质的结构示意图。复合板由三部分构成,中间段为掺杂激光晶体,两端为未掺杂激光晶体。通过键合技术将未掺杂激光晶体黏接在掺杂激光晶体的两端。板条厚度为 t ,宽度为 ω ,掺杂段长度为 L_d ,两端未掺杂段长度均为 L_u ,总长度为 L ,抽运光沿 z 轴从板条两端抽运,掺杂介质对抽运光的吸收系数为 α ,光热转化效率为 η ,由此产生的热分布为 $Q(z)$,板条上下表面为散热面,换热系数为 h ,冷却液温度为 T_c ,介质的热导率为 k 。根据傅里叶定律可知介质内部的稳态热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T(x, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, z)}{\partial z^2} = -\frac{Q(z)}{k}, \quad (1)$$

式中 T 为温度。设板条激光介质每一端的抽运功率均为 P_0 ,则有:

$$Q(z) = \begin{cases} \frac{\alpha\eta P_0}{\omega t} [e^{-\alpha(L_d/2-z)} + e^{-\alpha(L_d/2+z)}], & -L_d/2 \leq z \leq L_d/2 \\ 0, & -L/2 \leq z < -L_d/2 \text{ or } L_d/2 < z \leq L/2 \end{cases}. \quad (2)$$

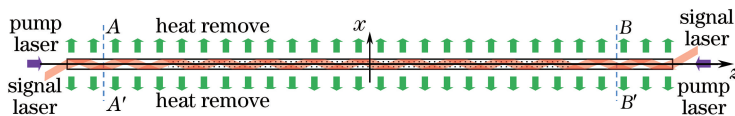


图1 二维矩形复合板条结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of two-dimensional rectangular compound slab

边界条件为

$$-k \frac{\partial T(x, z)}{\partial z} \Big|_{z=L/2} = 0, \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T(x, z)}{\partial z} \Big|_{z=-L/2} = 0, \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T(x, z)}{\partial x} \Big|_{x=-t/2} = -h [T(-t/2, z) - T_c], \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T(x, z)}{\partial x} \Big|_{x=t/2} = h [T(t/2, z) - T_c]. \quad (6)$$

结合边界条件(3)~(6)式即可求解得到稳态温度场分布,可以采用文献[19]所述的半解析法进行求解,也可以采用有限元法进行求解。本课题组采用有限元法进行计算。

2.2 热致波前畸变

如图2所示,假设平面波从 Z_1 平面出发,经过折射率为 n 、长度为 L_m 的介质后传输至 Z_2 平面, Z_1 平面到介质左端面的距离为 L_1 , Z_2 平面到介质右端面的距离为 L_2 。当介质受热或有力作用时,其折射率和长度分别变为 n' 和 L'_m 。此时, Z_1 平面到介质左端面的距离变为 L'_1 , Z_2 平面到介质右端面的距离变为 L'_2 ,激光由 Z_1 平面传输至 Z_2 平面时光程变化的径向分布即为波前畸变,可表示为

$$d_{\text{OPD}}(x) = [\Delta n - (\Delta n)_{\text{min}}] L_m + (n - 1) [\Delta L - (\Delta L)_{\text{min}}], \quad (7)$$

式中 Δn 为折射率的变化, ΔL 为介质轴向长度的变化;等号右侧第一项表示由折射率的变化导致的波前畸变,包括热光效应和弹光效应;第二项表示由介质形变导致的波前畸变^[24]。

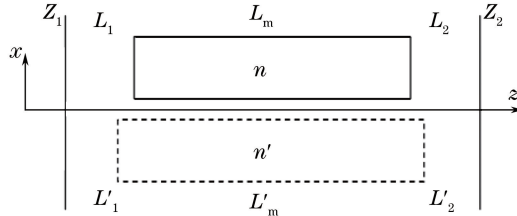


图2 光束传输示意图

Fig. 2 Schematic of beam propagation

热致波前畸变的计算方法可参考文献[18]。对于Nd:YAG晶体,热光效应对热透镜焦距的贡献率最大,且远大于弹光效应和端面变形的影响^[18,24]。因此,下面的分析中仅对热光效应导致的波前畸变进行计算。热光效应导致的折射率变化 Δn 可表示为

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T, \quad (8)$$

式中 dn/dt 为热光系数, ΔT 为温度变化。

3 数值分析与讨论

以图1所示Nd:YAG复合板条为例建立有限元模型,分析热致波前畸变的规律特点。假设板条厚度为0.2 cm,网格数为20;板条宽度为1 cm;掺杂段长度为8 cm,网格数为50;两端未掺杂段长度为2 cm,网格数为50。表1列出了计算中使用到的物性参数。

表1 计算参数

Table 1 Parameters used in calculation

Property	Value
Pump power P_0 /W	1000
Absorption coefficient α / cm^{-1}	0.3
Photo-thermal conversion efficiency η	0.272
Thermal conduction coefficient k /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	14
Thin film convection coefficient h /($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	10
Temperature of coolant T_c /K	293
Refractive index n	1.82
Thermo-optical coefficient dn/dT / K^{-1}	7.3×10^{-6}

图 3 为通过 ANSYS 软件计算得到的温度场分布。从图 3 中可以看出:板条介质两端的未掺杂段由于不吸收抽运光,温度基本没有升高;在热传导的作用下,仅在键合区附近一定区域内($<2\text{ mm}$)存在较大温升。可见,激光在板条介质两端距离键合位置较远处传输时,由于温度梯度小,不会产生波前畸变。

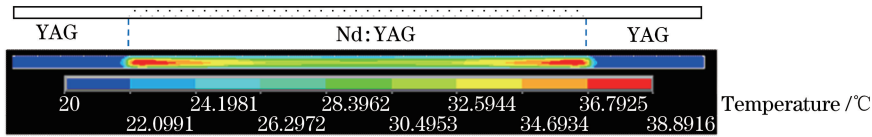


图 3 Nd:YAG 复合板条中的温度场分布

Fig. 3 Temperature distribution in Nd:YAG compound slab

假设入射激光在板条介质内沿“之”字形光路传输,计算激光由 $A-A'$ 截面经 26 次全反射传输至 $B-B'$ 截面过程中因热效应引起的波前畸变。 $A-A'$ 及 $B-B'$ 截面均位于未掺杂段,且远离键合区, $A-A'$ 截面位于 $z = z_A$ 处, $B-B'$ 截面位于 $z = z_B$ 处, $z_B - z_A$ 为常数。这里取 $z_B - z_A = 10.39\text{ cm}$ 。

图 4(a)为 $z_A = -L/2 + nt$ ($n \in \mathbf{Z}$) 时计算得到的波前畸变分布图。从图 4 中可以看出,随着 z_A 取值的变化,波前畸变的波形在“M”和“W”之间转换,而幅值基本不变。

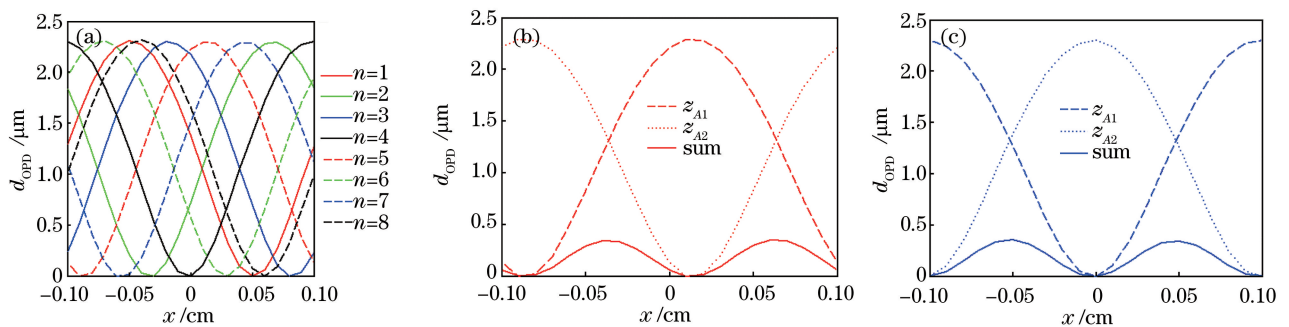


图 4 不同条件下 x 方向的波前畸变。(a) $z_A = -L/2 + nt$; (b) $z_{A1} = -L/2 - 5t, z_{A2} = -L/2 - 4.135t$;
(c) $z_{A1} = -L/2 - 4t, z_{A2} = -L/2 - 3.135t$

Fig. 4 Wavefront-distortion in x axis under different conditions. (a) $z_A = -L/2 + nt$; (b) $z_{A1} = -L/2 - 5t, z_{A2} = -L/2 - 4.135t$;
 $z_{A2} = -L/2 - 4.135t$; (c) $z_{A1} = -L/2 - 4t, z_{A2} = -L/2 - 3.135t$

图 4(b)为 $z_{A1} = -L/2 - 5t, z_{A2} = -L/2 - 4.135t$ 时激光由 $A-A'$ 截面传输至 $B-B'$ 截面产生的波前畸变,以及上述两个波前畸变之和(已去掉活塞项)。从图 4(b)中可以看出: z_A 取 z_{A1}, z_{A2} 时,波前畸变的幅值为 $2.29\text{ }\mu\text{m}$,而上述两个波前畸变之和的幅值为 $0.35\text{ }\mu\text{m}$ 。这表明,通过合理控制入射激光进入板条介质的位置,入射激光两次通过板条介质时产生的波前畸变可能比单次通过板条介质时产生的波前畸变小。这是因为入射激光两次以同一角度通过板条介质时产生了波形相反的波前畸变,由于相消叠加,减小了波前畸变。

图 4(c)为 $z_{A1} = -L/2 - 4t, z_{A2} = -L/2 - 3.135t$ 时激光由 $A-A'$ 截面传输至 $B-B'$ 截面产生的波前畸变,以及上述两个波前畸变之和(已去掉活塞项)。从图 4(c)中可以看出: z_A 取 z_{A1}, z_{A2} 时,波前畸变的幅值为 $2.3031\text{ }\mu\text{m}$,而上述两个波前畸变之和的幅值为 $0.3521\text{ }\mu\text{m}$ 。这表明,通过合理控制入射激光进入板条介质的位置,入射激光两次通过板条介质时产生的波前畸变可能比单次通过板条介质时产生的波前畸变小。这是因为入射激光两次以同一角度通过板条介质时产生了波形相反的波前畸变,由于相消叠加,减小了波前畸变。

图 5 为一种典型的激光谐振腔光路示意图,激光由左侧输出耦合镜 OC 开始向右传输,进入板条激光介质后沿“之”字形光路传输,由板条右端面出射,然后经过相互垂直的两个全反射镜 M_1, M_2 反射回板条介质右端面,再次进入板条激光介质,之后沿“之”字形光路传输,并由板条左端面出射。入射至 OC 的激光一部分经透射由 OC 输出,另一部分经反射返回至腔内继续上述过程。调节全反射镜 M_2 的位置,使激光两次通过板条激光介质时的“之”字形光路间存在一个横向偏移量,就可以达到减小热致波前畸变的目的。

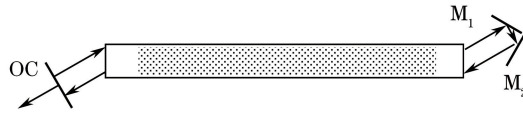


图 5 一种典型的热致波前畸变自校正谐振腔光路示意图

Fig. 5 Schematic of optical path of a typical resonant cavity with self-correction for thermal-induced wavefront-distortion

4 结 论

针对板条激光介质中的热效应问题,对波前畸变的幅值、波形与入射点位置之间的关系进行了研究,发现激光入射位置的变化会导致热致波前畸变的波形发生变化。通过控制激光进入板条介质的位置,并两次以同一角度通过板条介质,会产生两个波形相反的波前畸变。由于相消叠加,可以达到减小波前畸变的目的。该方法可有效减小温度场分布不均匀而引入的热致波前畸变,缓解光束质量主动控制系统的压力,有助于获得高功率、高光束质量的激光输出。给出了一种典型热致波前畸变自校正谐振腔光路示意图,详细的板条激光介质构型设计、谐振腔结构设计和实验验证工作将在后续论文中报道。

参 考 文 献

- [1] Krupke W F. Advanced diode pumped solid state lasers (DPSSLs): near term trends and future prospects[C]. SPIE, 2000, 3888: 21-32.
- [2] Bowman S R. Lasers without internal heat generation[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(1): 115-122.
- [3] Beach R J, Honea E C, Sutton S B, *et al.* High-average-power diode-pumped Yb:YAG lasers[C]. SPIE, 2000, 3889: 246-260.
- [4] Tuckerrmn D B, Pease R F W. High performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [5] Ripin D J, Ochoa J R, Aggarwal R L, *et al.* 165 W cryogenically cooled Yb:YAG laser[J]. Optics Letters, 2004, 29(18): 2154-2156.
- [6] LaFortune K N, Hurd R L, Brase J M, *et al.* Incavity adaptive correction of a high-average-power solid-state, heat-capacity laser[C]. SPIE, 2005, 5708: 1-7.
- [7] Brignon A, Huignard J P. Phase conjugate laser optics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporation, 2003.
- [8] Lü Q, Kugler N, Weber H, *et al.* A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd:YAG rods[J]. Optical and Quantum Electronics, 1996, 28(1): 57-69.
- [9] Zhang Guangyin, Zhang Chaobo, Ding Xin, *et al.* Control on dynamical stability of solid laser resonator[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(2): 253-258.
张光寅, 张潮波, 丁欣, 等. 固体激光腔动力学稳定性的调控[J]. 物理学报, 2002, 51(2): 253-258.
- [10] Albrecht G, George V E, Krupke W F, *et al.* High energy bursts from a solid state laser operated in the heat capacity limited regime: US005526372[P]. 1996-06-11.
- [11] Xiang Rujian, He Zhongwu, Xu Honglai, *et al.* Closed-loop beam quality control for MOPA solid slab laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 358-362.
向汝建, 何忠武, 徐宏来, 等. 固体板条 MOPA 激光光束质量主动控制[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 358-362.
- [12] Bishop B. Northrop Grumman scales new heights in electric laser power, achieves 100 kilowatts from a solid-state laser [Z/OL]. (2009-03-18)[2017-05-12]. http://www.irconnect.com/noc/pages/news_releases.html#161575.
- [13] Northrop Grumman Corporation. Joint high power solid-state laser [Z/OL]. [2017-05-12]. <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/SolidStateHighEnergyLaserSystems/Pages/JointHighPowerSolidStateLaser.aspx>.
- [14] Weinberger. Defense technology international: solid-state lasers; 100 kilowatts or bust; rivals vie to develop next generation of lasers[EB/OL]. [2017-05-12]. http://www.textronddefense.com/news/in_the_news/05_22_06.htm
- [15] Mandl A, Klimek D E. Textron's J-HPSSL 100 kW ThinZag® laser program[C]. Proceedings of the Conference on

- Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2010: 11428712.
- [16] Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. Chinese J 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.
- [17] Liu Gang, Tang Xiaojun, Xu Liuqing, *et al.* Fluid-solid coupled heat transfer design numerical study for water cooling CCEPS laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402004.
刘刚, 唐晓军, 徐臻婧, 等. CCEPS 激光器水冷设计的流固耦合传热数值研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402004.
- [18] Liu Liang. Research on thermal effect in conduction cooled end-pumped slab amplifier [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
刘亮. 传导冷却端面泵浦板条放大器热效应研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- [19] Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng, *et al.* Study of thermal distortion in composite slab amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1678-1682.
刘亮, 郭少锋, 陆启生, 等. 复合结构板条放大器热致波前畸变研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1678-1682.
- [20] 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 piezoelectric deformable mirror[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7121-7130.
- [21] Xu Liuqing, Yang Ping, Liang Xingbo, *et al.* Application of Hartmann-Shack wave front detector in testing distorted wave front of conduction cooled end-pumped slab[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802006.
徐臻婧, 杨平, 梁兴波, 等. 哈特曼-夏克波前探测器对传导冷却端面抽运板条激光放大器的波前畸变测试[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802006.
- [22] 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.
- [23] Li Mi, Hu Hao, Tang Chun, *et al.* Research on high power slab laser with double doped concentration[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0914004.
李密, 胡浩, 唐淳, 等. 高功率双掺杂浓度板条激光技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0914004.
- [24] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. New York: Springer-Verlag, 1976.