

文章编号: 0258-7025(2010)07-1678-05

复合结构板条放大器热致波前畸变研究

刘亮 郭少锋* 陆启生 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 推导了双端抽运板条晶体内部温度场分布的解析公式,并分别对单一介质与复合介质内部温度梯度导致的波前畸变进行了数值研究。计算结果表明,单一介质与复合介质内部波前畸变的特征明显不同,单一介质内温度梯度导致的正透镜效应,增加“之”字形(zigzag)传输路径的周期可以减小波前畸变;复合介质内温度梯度可能导致正透镜效应,也可能导致负透镜效应,通过增加 zigzag 周期或者在特定的 zigzag 周期下选择合适的板条参数可以减小波前畸变。

关键词 固体激光器;板条放大器;复合晶体;热透镜效应;波前畸变

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1678

Study of Thermal Distortion in Composite Slab Amplifiers

Liu Liang Guo Shaofeng Lu Qisheng Xu Xiaojun

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

Abstract The expression for the temperature distribution in the end-pumped slab cross section was deduced and the thermal distortions in single and composite medium were analyzed. The results indicate great difference in temperature distribution and thermal distortion exists between composite and single slabs. For the single slab, positive lens caused by thermal gradient could be reduced by increasing the bounce number of the light in zigzag propagation through the slab. For the composite slab, the thermal lens may be positive or negative. Thus the thermal distortion could be reduced either by increasing the bounce number of the light in zigzag propagation through the slab or by optimizing the length of each segment at the given bounce number.

Key words solid-state laser; slab amplifier; composite crystal; thermal lens; thermal distortion

1 引言

采用棒状激光介质的传统高能固体激光器,热效应严重,限制了输出功率和输出光束质量的提高。近年来,为了减少热效应的影响,许多学者对此进行了多方面的研究,并提出了多种高能固体激光器方案,如双包层光纤激光器^[1~3]、薄片激光器^[4,5]、板条激光器^[6~9]和热容激光器^[10,11]等。

诺格公司采用 7 路板条放大链实现了 105 kW 的高功率输出^[12],光束质量 M^2 因子优于 3。在该方案中,板条放大链采用端面抽运结构,激光介质为

板条状 YAG:Nd³⁺ YAG:YAG 复合介质,信号光在板条内部沿“之”字形(zigzag)光路传输。其中端面抽运可以实现抽运光与振荡光之间的模式匹配,获得更高的光光转换效率。复合介质结构^[13~16](在掺有激活离子的介质两端键合未掺杂基质)可以同时起到热扩散和增大散热面积的作用,有效地降低和改善介质内部温度和应力的分布^[17]。“之”字形光路可以消除一阶热聚焦效应^[18,19]和热致双折射效应^[20,21]。

对于端面抽运板状复合介质中未掺杂段长度的

收稿日期: 2009-09-25; 收到修改稿日期: 2009-11-06

作者简介: 刘亮(1981—),男,博士研究生,主要从事固体激光器热管理方面的研究。E-mail: ll06b@126.com

导师简介: 陆启生(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: luqsheng@public.cs.hn.cn

* 通信联系人。E-mail: sfguo@nudt.edu.cn

选取问题,文献[16]从最高温度和最大应力的角度出发给出了复合介质的最佳尺寸。当未掺杂段长度超过这个最佳值时,继续增加其长度对于降低温度、改善应力分布没有太大意义。然而,在固体激光器的设计中,控制温度及应力的主要目的之一是为了获得好的光束质量,即减小输出光束的热致波前畸变。本文以此为出发点,分析沿 zigzag 光路传输的信号光分别通过单一介质与复合介质后,其波前畸变的特征,并给出复合板条最佳尺寸的选择标准。

2 板状复合介质温度场分布

如图 1 所示,板条厚度为 t ,宽度为 w ,掺杂段长度为 L_d ,两端未掺杂段均为 L_u ,总长度为 L ,抽运光沿 z 轴从板条两端抽运,介质对抽运光的吸收系数为 α ,其中光热转换效率为 η ,由此产生的热分布为 $Q(z)$,板条上下表面为散热面,其换热系数为 h ,冷却液温度为 T_c ,介质热传导系数为 k ,则热传导方程可以写成

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

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

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

$$-k \frac{\partial T(x, z)}{\partial x} \Big|_{x=-t/2} = -h[T(-t/2, z) - T_c], \quad (4)$$

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

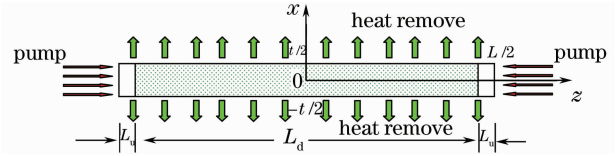


图 1 板条结构示意图

Fig. 1 Scheme of slab

假设板条两端对称抽运,则可将介质内部温度场 $T(x, z)$ 及热源 $Q(z)$ 项按傅里叶级数展开成

$$T(x, z) = \frac{1}{2}a_0(x) + \sum_{n=1}^{\infty} a_n(x) \cos(\beta_n z) + T_c, \quad (6)$$

$$Q(z) = \frac{1}{2}A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\beta_n z), \quad (7)$$

式中

$$A_n = \frac{2}{L} \int_{-L/2}^{L/2} Q(z) \cos(\beta_n z) dz. \quad (8)$$

将(6),(7)式代入(1)~(5)式,得

$$\beta_n = 2n\pi/L, \quad (9)$$

$$a_0(x) = \frac{A_0}{k} \left(\frac{t^2}{8} + \frac{tk}{2h} - \frac{x^2}{2} \right), \quad (10)$$

$$a_n(x) = \frac{A_n}{k\beta_n^2} \left[1 - \frac{h \cosh(\beta_n x)}{k\beta_n \sinh(\beta_n t/2) + h \cosh(\beta_n t/2)} \right]. \quad (11)$$

设介质两端的注入抽运功率为 P_0 ,则有

$$Q(z) = \begin{cases} \alpha \frac{\eta P_0}{w t} \{ \exp[-\alpha(L_d/2 - z)] + \exp[-\alpha(L_d/2 + z)] \}, & -\frac{L_d}{2} \leq z \leq \frac{L_d}{2} \\ 0, & \frac{L_d}{2} < z \leq \frac{L}{2} \text{ or } -\frac{L}{2} \leq z < -\frac{L_d}{2} \end{cases} \quad (12)$$

将(12)式代入(8)式即可得到各级傅里叶系数 A_n ,然后代入(10),(11)及(6)式即可得到复合介质内部的温度场分布。

内的温度场进行了计算,计算结果如图 2 所示。从图中可以看出,通过键合技术得到的复合板条最高温度降低了约 $32\text{ }^\circ\text{C}$,同时最高温度也不在键合位置处,而是内移至 $z = \pm 22.1\text{ mm}$ 处。

采用上述方法,对表 1 所示板状单一/复合介质

表 1 算例中使用的参数

Table 1 Parameters for calculation

	$t /$ mm	$w /$ mm	$L_d /$ mm	$L_u /$ mm	η	$\alpha /$ cm^{-1}	$k /$ [W/(m·K)]	$h /$ [W/(cm ² ·K)]	$T_c /$ K	$P_0 /$ W	$dn/dT / 10^{-6}$	n_0
Single medium	1.7	5.6	49	0	0.3	0.69	11	1	288	800	7.3	1.82
Composite medium	1.7	5.6	49	10	0.3	0.69	11	1	288	800	7.3	1.82

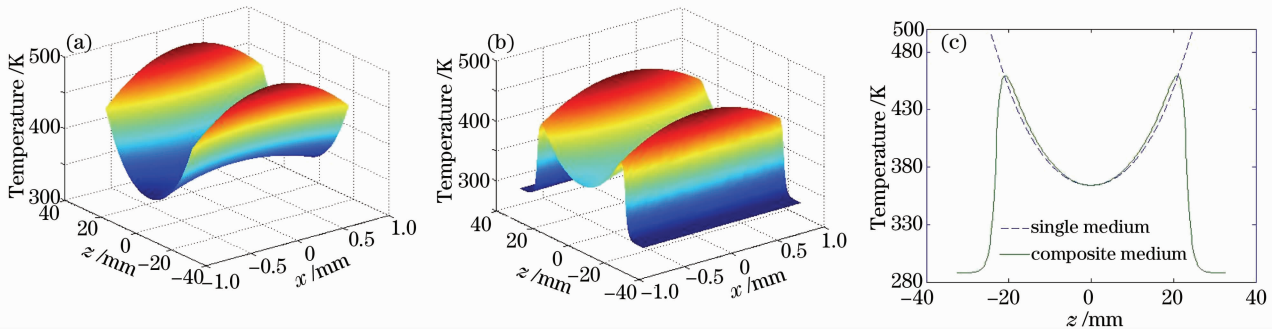


图 2 板状介质内部温度场分布。(a)单一介质；(b)复合介质；(c)温度沿 z 轴的分布 ($x=0$)

Fig. 2 Temperature distribution in slab. (a) single medium; (b) composite medium; (c) temperature along z axis at $x=0$

3 热致波前畸变分析

由于折射率是温度的函数,介质内部温度分布的不均匀将导致信号光产生波前畸变。为了平抑温度梯度的影响,可以采用如图 3 所示的 zigzag 光路减小波前畸变。为了便于分析,假设信号光在板条大表面上的反射次数为 N ,同一表面上两相邻反射点间的距离为一个 zigzag 周期 Λ 。由几何分析可知, N 为偶数,它与板条尺寸之间的关系为

$$\tan(\theta_N) = \frac{N \cdot t}{L}, \quad (13)$$

式中 θ_N 为反射次数为 N 时,信号光与 z 轴的夹角。根据光程的定义,由左端面 $(x, -L/2)$ 点入射信号光在板条内所经历的光程 $S_N(x)$ 可表示为

$$S_N(x) = \frac{1}{\cos \theta_N} \int_{-L/2}^{L/2} n(x', z) dz = \frac{1}{\cos \theta_N} \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ n_0 + \frac{dn}{dT} [T(x', z) - T_0] \right\} dz, \quad (14)$$

式中 $n(x', z)$, $T(x', z)$ 分别为信号光传输路径上 (x', z) 点处的折射率和温度, n_0 为材料温度为 T_0 时的折射率, dn/dT 为热光系数,由此可得板条右端面透射信号光的光程差为

$$\Delta S_N(x) = S_N(x) - \min \{ S_N(x) \}. \quad (15)$$

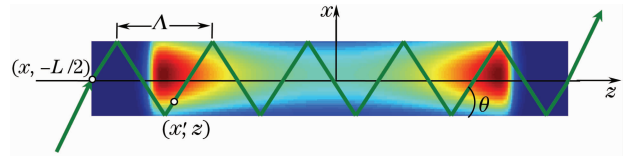


图 3 zigzag 光路

Fig. 3 Light in zigzag propagation through the slab

图 4 为信号光单次通过板条介质后,波前畸变随入射位置的变化曲线,从图中可以看出,对于单一介质而言,温度梯度导致正的热透镜效应,波前畸变只有 $\lambda/1000 \sim \lambda/100$ 量级;对于复合介质而言,温度梯度可能导致正的热透镜效应,也可能导致负的热透镜效应,波前畸变达到 $\lambda/100 \sim \lambda/10$ 量级。

图 5 为波前畸变随反射次数 N 的变化曲线,从图中可以看出,对于单一介质而言,随着反射次数 N 的增加,波前畸变越来越小;对于复合介质而言,随着反射次数 N 的增加,热致波前畸变呈振荡式的减小。

由(14)式可知,端面上各点入射信号光在板条内经历的光程,不仅与介质内部的温度场分布有关,还与反射次数有关。当反射次数一定时,光线传输

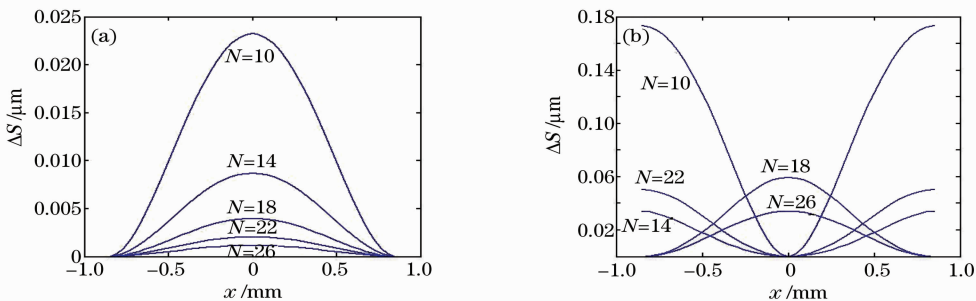


图 4 透射光光程差分布。(a)单一介质；(b)复合介质

Fig. 4 ΔS distribution along the slab height direction x . (a) single medium; (b) composite medium

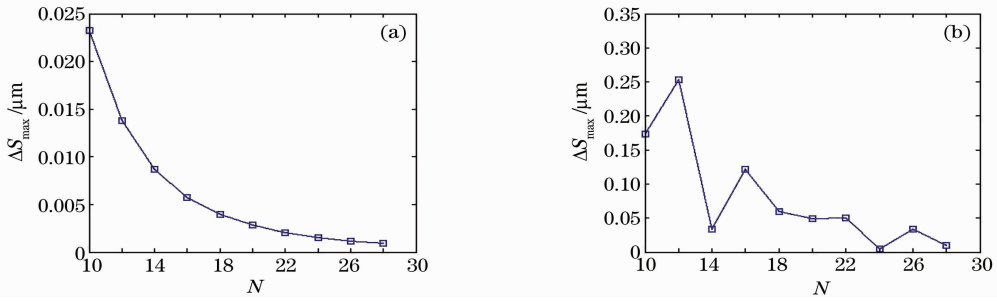


图 5 光程差随反射次数的变化。(a)单一介质;(b)复合介质

Fig. 5 ΔS as a function of the bounce number of the light in zigzag propagation. (a) single medium; (b) composite medium

路径上点 (x', z) 的坐标中 x' 可以写成 z 与入射点 x 的函数,因此(14)式中积分结果为 x 的函数。当介质中的温度仅是 z 或 x 的函数时,由(14)式及周期函数的知识易知端面上各点入射信号光的光程均相等,即波前畸变为零。为了便于理解,图 6 显示了这两种情况下一个 zigzag 周期内的光束传输路径,显然在此周期内各光束的光程相等。因此,只要介质长度为 zigzag 周期的整数倍便不会有波前畸变。而当介质中的温度是 z 和 x 的函数时,由于积分项不相等,波前畸变将随入射位置的变化而变化。

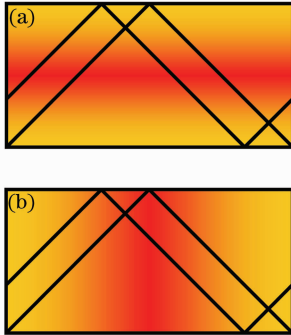


图 6 不同温度分布情况下,一个 zigzag 周期内光束传输情况示意图。(a)温度梯度在 x 方向;(b)温度梯度在 z 方向

Fig. 6 Zigzag propagation in one period for $T(x)$ and $T(z)$. (a) thermal gradient at x direction; (b) thermal gradient at z direction

对于图 6(a)所示的单一板条介质而言,虽然温度是 z 和 x 的函数,但其梯度主要集中在 x 方向,且单一介质的长度正好是 zigzag 周期的整数倍,因此可以获得很好的平抑效果;对于图 6(b)所示的复合介质而言,掺杂段和未掺杂段的长度均不是 zigzag 周期的整数倍,且各部分温度梯度分别集中在 x, z 方向,因此信号光不仅不能在掺杂段和未掺杂段很好地平抑温度梯度的影响,各部分引入的光程差及其波形也有所不同。因此,复合介质中波前

畸变的幅值更大,波形也不同。

为了在复合介质中获得更小的波前畸变,可以通过合理设计复合介质中掺杂及未掺杂段的长度,使之均为 zigzag 周期的整数倍。图 7 显示了当介质分别为单一介质($N=16, L_d=49 \text{ mm}, L_u=0$)和复合介质($N=20, L_d=49 \text{ mm}, L_u=6.1 \text{ mm}$)时,波前畸变随入射位置的变化曲线,从图中可以看出此时复合介质与单一介质内部的波前畸变几乎完全一致。

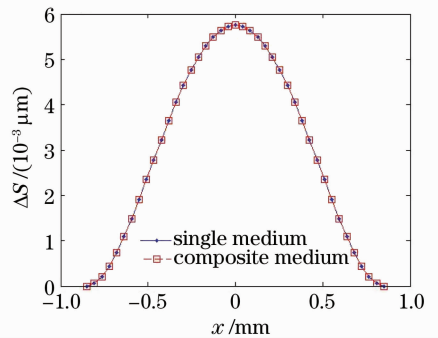


图 7 透射光光程差分布(单一介质: $N=16$; 复合介质 $N=20$)

Fig. 7 ΔS distribution along the slab height direction in single medium at $N=16$ and composite medium at $N=20$

4 结 论

推导了双端抽运、传导冷却板状激光介质内部温度场分布的解析公式,并对沿 zigzag 光路传输的信号光的波前畸变进行了分析,结果表明,单一介质中,热效应导致正透镜效应,通过增加沿 zigzag 光路传输的信号光在介质内的反射次数,可以将波前畸变减小到 $\lambda/100$ 量级;在复合介质中,热效应可能导致正透镜效应,也可能导致负透镜效应,增加沿 zigzag 光路传输的信号光在介质内的反射次数会导致波前畸变振荡式的减小。当板状复合介质的长宽比较大时,应使信号光在介质内部进行足够多次的

全内反射,以减小波前畸变。当板状复合介质的长宽比较小时,信号光在介质内部不能进行足够多次的全内反射,为减小波前畸变,就必须合理选择复合介质各部分的长度,使掺杂段和未掺杂段长度均为zigzag周期的整数倍。

参 考 文 献

- 1 Y. Jeonng, J. Sahu, D. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 2 IPG Photonics offers world's first 10 kW single-mode production laser. <http://www.laserfocusworld.com/articles/364754>
- 3 IPG. High power fiber lasers for industrial applications [R]. http://www.ipgphotonics.com/collateral/Documents/English-us/HP_Brochure.pdf
- 4 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin disc laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 650~657
- 5 S. Garnov, V. Mikhailov, R. Serov *et al.*. Study of the possibility of developing a multichannel-diode-pumped multikilowatt solid-state laser based on optically dense active media[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(4): 650~657
- 6 Hagop Injeyan, Carolyn S. Hofer. End pumped zig-zag slab laser gain medium[P]. United States Patent Number: 6094297, Jul. 25, 2000
- 7 Stephen Palese, Joseph Harkenrider, William Long *et al.*. High brightness end-pumped conduction cooled Nd:YAG zig-zag slab laser architecture [J]. *Advanced Solid-State Lasers*, 2001, **50**: 41~46
- 8 Gregory Goodno, Hiroshi Komine, Stuart McNaught *et al.*. Multi-kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser [C]. Lasers and Electro-Optics Europe. CLEO/Europe. 2005
- 9 http://www.laserfocusworld.com/display_article/292398/12/none/none/Feat/Photonic-Frontiers;-laser-weapons--Pumping-up-the-power
- 10 G. F. Albrecht, E. V. George, W. F. Krupke *et al.*. High energy bursts from a solid state laser operated in the heat capacity limited regime [P]. United States Patent Number:5526372, 1996
- 11 R. M. Yamamoto, K. Allen, R. Allmon *et al.*. A solid state laser for the battle field [C]. Proceeding of the ASC, 2006, Orlando. FL.
- 12 Photo release-northrop grumman scales new heights in electric laser power, achieves 100 kilowatts from a solid-state laser march 18, 2009 <http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news-release.html?d=161575>
- 13 Li Long, Shi Peng, Liu Xiaofang *et al.*. Thermal effect of YVO₄-Nd:YVO₄ composite laser crystals [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 786~791
李 隆, 史 彭, 刘小芳等. YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体热效应研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 786~791
- 14 Li Zhigang, Xiong Zhengjun, Huang Weiling *et al.*. Study of high power laser diode end-pumped composite crystal lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 297~300
李志刚, 熊政军, 黄维玲等. 高功率激光二极管端面抽运复合晶体激光器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 297~300
- 15 Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Thermal distortion analysis for conduction cooled end-pumped slab [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(7): 987~992
刘 亮, 郭少锋, 陆启生等. 传导冷却端面泵浦板条放大器波前畸变数值研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(7): 987~992
- 16 Liu Aiguo, Wang Junrong, Min Jingchun *et al.*. Thermal characteristics of slab by composite medium pumped by high laser power [J]. *J. Engineering Thermophysics*, 2003, **24**(4): 676~678
柳爱国, 王军荣, 闵敬春等. 高能量光泵浦下板状复合介质的热特性[J]. *工程热物理学报*, 2003, **24**(4): 676~678
- 17 B. Chen, Y. Chen, J. Simmons *et al.*. Thermal lensing of edge-pumped slab lasers-I[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**: 413~418
- 18 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): 289~301
- 19 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser-part II: thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(8): 1195~1210
- 20 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
- 21 Yin Xianhua, Zhu Jianqiang, Zu Jifeng *et al.*. Calculation of induced refraction index in heat capacity slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 225~230
尹宪华, 朱健强, 祖继锋等. 热容型板条激光器的感应折射率计算[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 225~230