

Yb : YAG 表层增益陶瓷板条波前畸变数值模拟

陈一豪,梁兴波,李 宁,贾佑权,陈念江
(固体激光技术重点实验室,北京 100015)

摘 要:Yb : YAG 表层增益陶瓷板条在烧结过程中存在离子扩散行为,导致扩散区域折射率变化,引起波前畸变。本文结合扩散理论,建立表层增益陶瓷板条离子浓度分布、折射率空间分布模型,利用数值模拟的方法分析了扩散行为对静态波前畸变的影响。与传统晶体板条相比,陶瓷板条的离子扩散行为,对于静态波前畸变有一定影响,畸变在 $\lambda/10$ 量级。

关键词:表层增益;Yb : YAG 陶瓷;离子扩散;板条放大器;仿真分析

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.012

Numerical simulation of wavefront distortion of surface gain Yb : YAG ceramic slab

CHEN Yi-hao, LIANG Xing-bo, LI Ning, JIA You-quan, CHEN Nian-jiang
(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: Yb : YAG surface-gain ceramic slabs have ion diffusion behavior during sintering, which results in a change in the refractive index of the diffusion region, causing wavefront distortion. In this paper, the diffusion theory is used to establish the ion concentration distribution and refractive index spatial distribution model of the surface gain ceramic slab. The influence of the diffusion behavior on the static wavefront distortion is analyzed by numerical simulation. Compared with traditional crystal slab, the ion diffusion behavior of ceramic slab has a certain influence on the static wavefront distortion, and the distortion is in the order of $\lambda/10$.

Keywords: surface gain; Yb : YAG ceramic; ion diffusion; slab amplifier; simulation analysis

1 引 言

激光技术在医学、智能制造、科学研究等领域均有不可或缺的应用,其中高功率高光束质量的固体激光器是研究热点,各国各组织均开展了重点研究。高性能、高质量的激光增益材料是激光技术发展和应用的根基。相比于传统的增益材料(晶体和玻璃),透明激光陶瓷具有更优异的特性:制作周期短、可掺杂浓度高、可满足复杂构型及大尺寸制备,因而近年来作为高功率固体激光增益材料被国内外广泛关注、研究^[1-5]。

制约激光器发展的一个主要因素就是热效应,

高掺杂浓度以及大尺寸构型提供更高的激光功率,但也造成更严重的热效应。热透镜效应、热致双折射、热梯度效应和热应力将极大恶化激光束质量、降低板条使用寿命以及降低输出功率^[6-9]。由于传统构型激光器的热透镜效应,1969 年 Martin 等人,首次提出板条激光器的构型设计,显著改善了散热性能,降低了波前畸变;且 zig-zag 的激光光路,进一步补偿了热分布不均造成的热畸变,提高了激光输出的光束质量^[10-11]。

结合板条和薄片的特点,2008 年唐晓军等^[12]发表了表层掺杂板条的构型设计。板条整体厚度为

2 mm,中间为白 YAG,在大面两边键合 200 μm 左右的掺杂了 Nd^{+3} 离子或 Yb^{+3} 离子的 YAG,该结构可以作为振荡器或放大器使用。2016 年,刘洋等^[13]设计了 Nd:YAG 表层掺杂振荡器,在单脉冲泵浦能量为 354 mJ 的条件下,获得 121 mJ 的激光输出,光-光转换效率和斜效率分别为 34 % 和 45 %。2018 年,李宁等^[14]设计了 Yb:YAG 表层增益板条放大器,注入 200 W 的种子光,采用双端泵浦,在泵浦光为 11.2 kW 时,获得了单程 1.6 kW,双程 6 kW 的激光输出,光-光转换效率为 12.8 % 以及 21.4 %;测得该功率下板条的透射波前 PV 值为 1.3 μm 。2019 年,李宁等^[15]利用有限元方法对分别对表层掺杂板条状激光模块以及传统的体掺杂 CCEPS 结构进行了数值仿真,结果表明表层掺杂板条有效降低了板条连续泵浦时的温升,改善了光束质量,PV 值均在 0.03 μm 以内。

以往表层增益板条均采用键合工艺,掺杂区与非掺杂区存在明显的界面,界面的键合质量对激光束质量具有很大影响。在高功率激光放大器中,键合界面会导致传输效率下降,甚至可能产生很强的反向传输激光,从而带来安全隐患^[16]。采用真空烧结工艺制作的陶瓷板条,不存在明显的界面,但在烧结过程中,掺杂离子在掺杂交互界面存在一定的扩散行为^[17],改变了初始的掺杂浓度分布以及折射率分布。因此有必要对表层掺杂的扩散行为对光束质量的影响进行研究。然而现有的国内外文献中关于这方面的研究报道还很薄弱,迫切需要结合表层掺杂的浓度分布、折射率分布和波前畸变模拟等展开系列报道。

本文基于表层增益激光板条结构,结合陶瓷板条的特性,对 Yb:YAG 表层增益陶瓷激光板条的静态波前畸变进行分析及数值模拟,研究扩散行为对输出光束波前畸变的影响。

2 理论模型

2.1 表层增益陶瓷板条结构

图 1 为表层增益模块的基本结构,以及板条内部的光束传输光路示意图。现阶段表层掺杂板条的制作工艺,是将未掺杂的 YAG 晶体与掺杂晶体在大面上键合在一起,有明显的键合界面。而陶瓷板条则是先将掺杂与未掺杂的 YAG 陶瓷粉体铺设成三明治结构,再烧结成型,不存在键合界面。板条大面

有两个功能:1. 传导冷却面,将板条通过铜与微通道冷却热沉焊接,进行上散热;2. 全反射面,为保证泵浦光、激光均能在板条内部全反射,减少界面处的倏逝波,在大面镀有特殊膜。激光与泵浦光均从端面进入,端头切割角 45°,端面镀有两种光的增透膜。

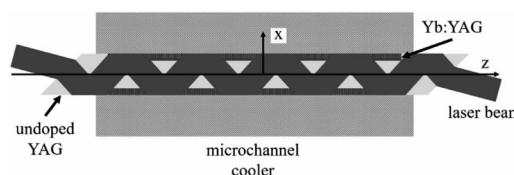


图 1 表层增益板条结构及激光光路示意图

Fig. 1 Schematic of surface gain slab and laser beam path

2.2 Yb⁺³ 掺杂离子的扩散行为

2.2.1 Yb⁺³ 离子的浓度分布

从热力学平衡的角度看,激活离子在烧结过程中不可避免地会从高浓度区域向低浓度区域扩散。通常,离子扩散的距离取决于加热时间和温度,如菲克扩散定律所述。通过在更高的温度和/或更长的时间加热^[18-19],离子会进一步扩散到整个键合表面。对于陶瓷等多晶材料的扩散,我们可以使用 Fick 的一维第二定律(扩散方程)来分析浓度分布曲线。菲克第二定律的数学表达式如下式所示:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中, C 为掺杂离子的体积浓度 (kg/m^3); t 为离子的扩散时间 (s); x 为距离 (m); D 为离子的扩散系数。在分析表层掺杂的扩散时,对于掺杂层可以将未掺杂层的厚度认为是无限厚,通过半无限扩散的扩散方程进行分析。对于表层掺杂结构,起始浓度分布,即时间 $t=0$ 时的浓度可表示如下式:

$$C(x, t=0) = \begin{cases} C_0 (\text{const}), & \text{other} \\ 0, & x_1 < x < x_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, C_0 为掺杂区的标准初始浓度。随烧结时间 t 的推移,不同区域的浓度也逐步变化,其扩散行为如下式表示:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[2 - \text{erf}\left(\frac{x - x_1}{2\sqrt{Dt}}\right) + \text{erf}\left(\frac{x - x_2}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (3)$$

其中, $\text{erf}(x, t)$ 为误差函数; D 为扩散系数。

2.2.2 Yb:YAG 的折射率分布

Yb:YAG 的折射率随 Yb^{+3} 离子掺杂浓度的变化而改变, Patel 等人^[20], 在实验中研究了 Yb:YAG 掺杂浓度和折射率之间的关系, 得到了 Yb:YAG 陶瓷板条折射率的一般方程如下:

$$n_{\text{Yb:YAG}}(A, \lambda) = (1.4651 \times 10^{-4}) \times A + n_{\text{YAG}}(\lambda) \quad (4)$$

其中, A 为 Yb^{+3} 浓度, 单位为 at %; $n_{\text{YAG}}(\lambda)$ 为 λ 波长下未掺杂 YAG 的折射率。对于泵浦光和激光, 非掺杂 YAG 的折射率分别为: $n_{\text{YAG}}(1030 \text{ nm}) = 1.8153$ 和 $n_{\text{YAG}}(941 \text{ nm}) = 1.8173$ 。这样由上面所得的掺杂浓度分布就可以得到表层掺杂陶瓷板条的折射率分布。

2.3 静态波前畸变计算

由于陶瓷的离子扩散行为, 陶瓷内部折射率分布呈不均匀化, 光束在内部传输会产生畸变。板条内部激光光路为 zig-zag, 设光路的锯齿数(反射次数)为 N , 根据几何关系计算可得, 板条构型与 N 的关系为:

$$\tan \theta = \frac{N \cdot d}{L} \quad (5)$$

其中, θ 为激光与反射面的夹角; d 为板条厚度; L 为板条长度。激光在增益介质里的光程为:

$$L_n(x) = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^L n(x, z) dz \quad (6)$$

$n(x, z)$ 板条内部的折射率分布, 结合式(3) ~ (6)可以求得激光在板条内部的光程差为:

$$\Delta L_n(x) = L_n(x) - \min\{L_n(x)\} \quad (7)$$

3 数值模拟及结果分析

根据上述理论分析, 对表层掺杂 Yb:YAG 透明陶瓷板条的 Yb^{+3} 离子浓度分布、折射率分布和静态波前畸变进行了数值模拟仿真和分析。表 1 为 Yb:YAG 透明陶瓷板条的基本结构参数。其中 a 为板条掺杂区厚度。

表 1 表层掺杂 Yb:YAG 陶瓷
激光板条的结构参数

Tab. 1 Structural parameter for surface
gain Yb:YAG ceramic laser slab

	L/mm	d/mm	a/mm	$A/\text{at \%}$	n_0
Yb:YAG	120	2	0.2	1	1.8153

3.1 Yb^{+3} 离子浓度及折射率分布模拟

结合表 1 的板条基本参数以及上述公式, 对板条烧结后的掺杂浓度及折射率进行计算, 结果如图 2、图 3 所示。由图可得, 由于扩散行为, 掺杂离子向未掺杂区进行扩散, 扩散范围在 $100 \mu\text{m}$ 左右, 在初始界面处掺杂浓度降至原先的 50%。陶瓷板条折射率在掺杂交互界面延扩散方向, 缓慢降低。

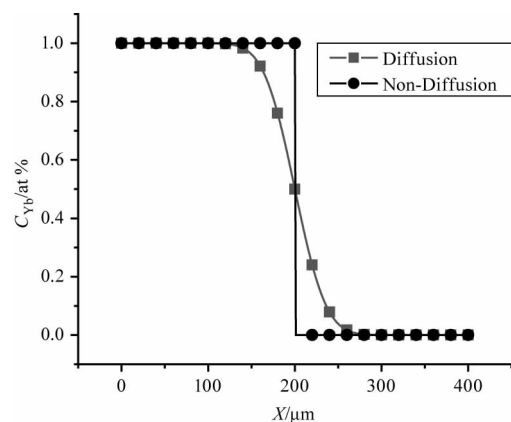


图 2 Yb^{+3} 离子一维浓度分布

Fig. 2 One-dimensional concentration distribution of Yb ions

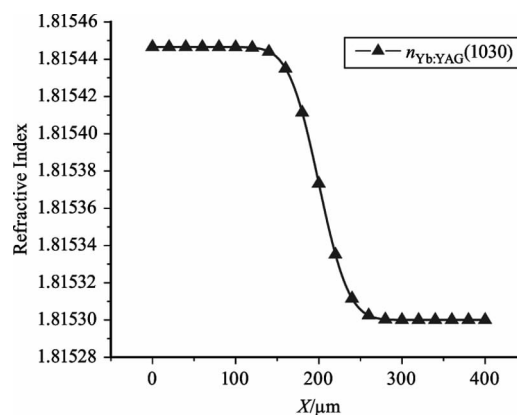


图 3 Yb:YAG 陶瓷板条一维折射率分布

Fig. 3 One-dimensional refractive index distribution of
Yb:YAG ceramic slab

3.2 静态波前畸变模拟

根据式(5) ~ (7)对板条的静态波前畸变进行数值仿真, 激光光路锯齿数 N 取 30。计算得到静态波前畸变如图 4 所示, 从图中可以看出由于掺杂浓度不同, 直通型光路产生了 PV 值为 $17.58 \mu\text{m}$ 的波前畸变, 而在 zig-zag 光路下得到了很好的补偿, 几乎为 0。

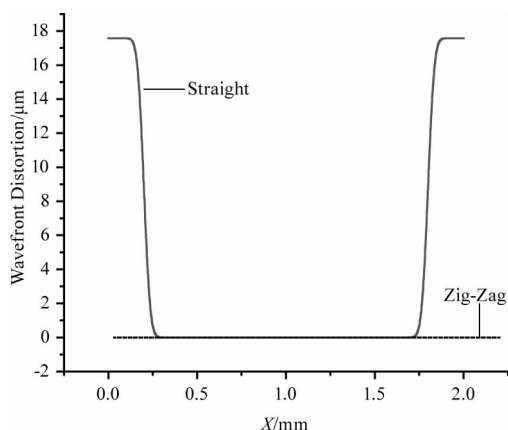


图4 表层掺杂 Yb:YAG 陶瓷板条波前畸变

Fig. 4 Wavefront distortion of surface gain Yb:YAG ceramic slab

然而在实际的工程应用中,陶瓷板条的铺设、烧结过程中,存在非均匀扩散导致板条内部的 Yb⁺³ 离子浓度分布不再是图 2 中所示的情况。本文中采用在扩散系数上叠加正弦波动来模拟这种变化,如式(8)、(9)所示,其中 b 为波动幅值(μm); l 为波动周期(mm); z 为板条长度方向距离(mm)。

$$B_0 = 2 \sqrt{Dt} \quad (8)$$

$$B(z) = B_0 + b \cdot \sin(2\pi z/l) \quad (9)$$

Yb⁺³ 离子浓度局部分布如图 5(a) 所示。图 5(b)、(c) 则分别描述了不同幅值、周期的离子浓度起伏的静态波前畸变。

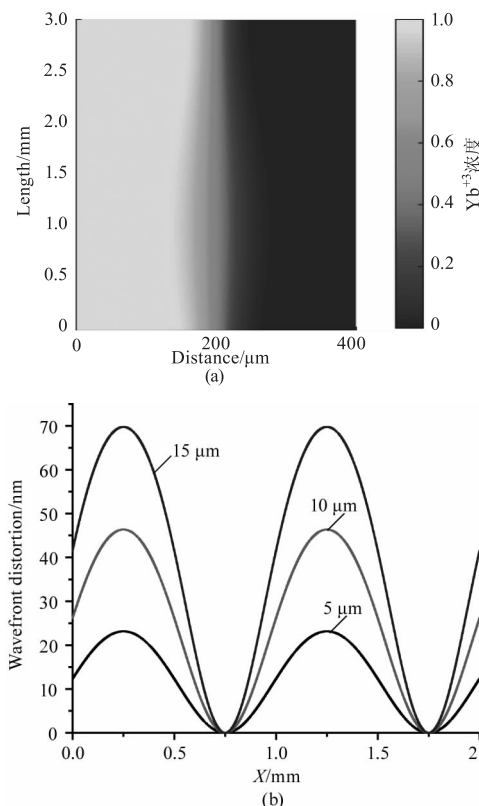


图5 Yb 离子不均匀扩散模拟结果

Fig. 5 Simulation results of Yb ions non-uniform diffusion

相同周期下,幅值 15 μm 时 PV 值为 69.76 nm, 5 μm 时 PV 值为 23.14 nm;相同幅值下,周期为 2 mm 时 PV 值为 46.37 nm,8 mm 时 PV 值为 0.90 nm。

4 结 论

本文以表层增益 Yb:YAG 透明陶瓷板条为研究对象,根据菲克定律,考虑离子浓度和折射率的相关性,运用有限元方法数值模拟仿真了陶瓷板条的离子浓度、折射率分布,以及静态波前畸变。与传统键合工艺相比,均匀扩散的透明陶瓷板条在 zig-zag 光路下对静态波前畸变几乎为 0。而掺杂交互界面的离子不均匀扩散对静态波前畸变有一定影响,但波前畸变 PV 值仍在 $\lambda/10$ 量级,与板条面形加工精度相近。因此,陶瓷离子扩散对于静态畸变影响有限,在板条设计过程中可以忽略其对静态波前畸变的影响。后续可以针对扩散导致的热分布变化、热畸变等热效应,以及折射率变化导致的光散射进行进一步分析。

参考文献:

- [1] Ikesue A, Furusato I, Kamata K. Fabrication of polycrystalline transparent YAG ceramics by a solid-state reaction method[J]. J Am Ceram Soc, 1995, 78(1): 225-228.
- [2] Yang Qihong. The research history and recent progress of laser transparent ceramics[J]. J Chin Ceram Soc, 2009, 37(3): 476-484. (in Chinese)
杨秋红, 激光透明陶瓷研究的历史与最新进展[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(3): 476-484.
- [3] Ge Lin, Li Jiang, Zhou Ziwei, et al. Nd:YAG transparent ceramics fabricated by direct dry pressing and vacuum sintering[J]. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(9): 1226-1232. (in Chinese)

- 葛琳,李江,周智为,等.直接干压成型与真空烧结技术制备Nd:YAG透明陶瓷[J].硅酸盐学报,2015,43(9):1226-1232.
- [4] Zhang Zhou, Wang Hao, Tu Peng-yu, et al. Characterization and evaluation on mechanical property of $\text{Mg}_{0.27}\text{Al}_{2.58}\text{O}_{3.73}\text{N}_{0.27}$ transparent ceramic [J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(9): 1006-1010.
- [5] Wang Qingqing, Shi Yun, Feng Yagang, et al. Fabrication and laser parameters of Yb:YAG transparent ceramics with high optical quality[J/OL]. Journal of Inorganic Materials, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1363.TQ.20190606.1419.022.html>. (in Chinese)
王晴晴,石云,冯亚刚,等.高光学质量Yb:YAG透明陶瓷的制备及激光参数研究[J/OL].无机材料学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1363.TQ.20190606.1419.022.html>.
- [6] Yagi H, Takaichi K, Ueda K, et al. The physical properties of composite YAG ceramics [J]. Laser Phys, 2005, 15(9): 1338-1344.
- [7] Weber R, Neuenschwander B, Weber H P. Thermal effects in solid-state laser materials[J]. Opt Mater, 1999, 11: 245-254.
- [8] Fan T Y. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG[J]. IEEE J Quantum Electron, 1993, 29(6): 1457-1459.
- [9] Macdonald M P, Graft, Balmer J E, et al. Reducing thermal lensing in diode-pumped laser rods [J]. Opt Commun, 2000, 178(4/6): 383-393.
- [10] Eggleston, J, Kane, T. J, Kuhn, K, et al. The slab geometry laser-part I: theory [J]. IEEE J Quantum Electronics, 1984, 20(3): 289-301.
- [11] Kane T J, Eckardt R C, Byer R L. Reduced thermal focusing and birefringence in zig-zag slab geometry crystalline lasers [J]. IEEE J Quantum Electronics, 1983, 19(9): 1351-1354.
- [12] Tang Xiaojun, Zhou Shouhuan, Du Tao, et al. Gain medium plate bar with sandwich structure and its making method: CN1012420071A[P]. 2008-08-13. (in Chinese)
唐晓军,周寿桓,杜涛,等.三明治结构增益介质板条及其制备方法:CN1012420071A[P]. 2008-08-13.
- [13] Liu Yang, Tang Xiaojun, Wang Zhe, et al. Laser diode end pumped Nd:YAG surface gain slab lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1001004. (in Chinese)
刘洋,唐晓军,王喆,等.激光二极管端面抽运Nd:YAG表层增益板条激光器[J].中国激光,2016, 43(10): 1001004.
- [14] Li Ning, Zhang Weiqiao, et al. Yb:YAG surface gain slab laser amplifier [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1101003. (in Chinese)
李宁,张伟桥,等.Yb:YAG表层增益板条激光放大器的研究[J].中国激光,2018,45(11):1101003.
- [15] Li Ning, Liu Yang, et al. Simulation of the slab laser module used surface doped [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(11): 1328-1332. (in Chinese)
李宁,刘洋,等.表层掺杂板条状激光模块仿真研究分析[J].激光与红外,2019,49(11):1328-1332
- [16] Li Mi, Hu Hao, et al. Dual concentration doped Nd:YAG composite ceramic slab laser with high power [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0514003. (in Chinese)
李密,胡浩,等.高功率双浓度掺杂的Nd:YAG复合陶瓷板条激光器[J].光学学报,2017,37(5):0514003
- [17] Liu Qiang, Zhao Yu, et al. Fabrication and ion diffusion behavior of planar waveguide YAG/Yb:YAG/YAG transparent ceramics [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2017, 45(6): 749-755. (in Chinese)
刘强,赵玉,等.平面波导YAG/Yb:YAG/YAG透明陶瓷的制备与离子扩散行为[J].硅酸盐学报,2017,45(6):749-755
- [18] H Mehrer. Diffusion in Solids-Fundamentals, methods, materials, Diffusion-Controlled processes [M]//Springer series in Solid-State Science, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [19] Kana F, Akira S, Yasushi F, et al. Ion diffusion at the bonding interface of undoped YAG/Yb:YAG composite ceramics [J]. Optical Materials, 2015, 46: 542-547.
- [20] F D Patel, E C Honea, J Speth, et al. Laser demonstration of $\text{Yb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YbAG) and materials properties of highly doped Yb:YAG [J]. IEEE J. Quantum Elect. 2001, 37(1): 135-144.