

文章编号: 0258-7025(2010)01-0026-04

双包层平面波导激光器中热应力的分析

杨天新 于 超 李树青 邹 豪

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 以二维模型为基础,对端面双向抽运双包层平面波导激光器的热效应进行了理论分析和模拟计算,并研究了影响双包层平面波导激光介质中热应力的因素。

关键词 激光物理; 双包层平面波导激光器; 有限元方法; 热应力分布; 温度分布

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103701.0026

Thermal Stress Analysis of Double-Cladding Planar Waveguide Lasers

Yang Tianxin Yu Chao Li Shuqing Zou Hao

(Key Laboratory of Optoelectronic Information of Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering Technology Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Based on two-dimensional model, theoretical analysis and numerical simulation were focused on the thermal effect of bi-directionally end-pumped double-clad planar waveguide lasers. Factors which could impact the thermal stress of double-clad planar waveguide laser medium were researched.

Key words laser physics; double-clad waveguide laser; finite element method; thermal stress distribution; temperature distribution

1 引 言

固体激光器的热效应已经成为制约激光器功率进一步提高的严重障碍,因此,想要提高激光器的光束质量和输出功率,设法降低激光介质的热效应及对热效应进行有效的补偿是主要的解决方案。激光器内热量传输的过程中,导热性好的晶体组成的复合晶体能有效地降低增益介质边缘的温度梯度,从而有效降低热效应,因此已经成为全固态激光器的研究热点^[1,2],其中 Nd:YAG/YAG 复合晶体激光器,由于不掺杂晶体,可以起到热沉的作用,有利于晶体更好地散热,有效地改善了晶体中心和侧面的温度梯度,使激光器可以高效率、高功率工作,被广泛应用于激光加工领域^[3]。基于这样的思路,利用导热性更好的蓝宝石作为热沉,并引入波导结构,就形成了双包层平板波导激光器的雏形。

双包层平板波导激光器的芯层增益介质是掺杂

YAG 晶体,不掺杂的白 YAG 作为内包层,外包层和基底都是蓝宝石^[4,5]。与上述复合晶体激光器不同的是,内包层的引入扩大了抽运光耦合进入波导激光器的数值孔径,能够有效地提高抽运光耦合效率。另一方面,内包层与芯层构成的波导,能有效地抑制高阶激光模式的激励和传输,从而保证激光器单横模运转,产生高光束质量激光输出。双包层平板波导激光器的另一个优势体现在散热方面,它的外包层是蓝宝石晶体,具有良好的散热性能,有源介质的芯层产生的热量流过内包层,由外包层表面散热。所以内包层的厚度越小,该激光器的散热效果越好。但是内包层越薄,加工难度越大,器件越容易破裂。特别是在大功率端面抽运情况下,最大的热应力一般出现在波导的端面上,甚至导致端面破裂损坏^[6],这成为制约激光器功率进一步提高的严重障碍。因此,需要研究不同的双包层平板波导结构的器件中温度和热应力的

收稿日期: 2009-02-24; 收到修改稿日期: 2009-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(60578222)资助课题。

作者简介: 杨天新(1964—),女,教授,主要从事光电子技术领域方面的研究。E-mail: tyang@tju.edu.cn

分布情况,希望找到一种加工难度最低的双包层平板波导结构,使其既能保证激光单模输出,又具有良好的散热性能,有效地降低芯层端面边缘的温度梯度,从而提高激光器损伤阈值。

利用有限元方法对固体激光器的温度和应力随空间的变化特性及其热致变形的分析已经得到广泛关注^[7]。他们利用 ANSYS 软件成功分析了 Nd:GGG(掺钕钷石榴石)板条激光器,为设计合理冷却方案提供了依据。本文利用 ANSYS 软件以二维模型为基础对其散热性能与各层结构参数之间的关系进行模拟计算,并据此估算出该器件能够承受的最大抽运功率。

2 理论数学模型

由于激光介质温度呈不均匀分布,介质体内的微元必然存在位移变化。用矢量函数 $\bar{U}(\bar{r})$ 表示这一变化,则原来在 \bar{r} 处的微元将移动到 $\bar{r} + \bar{U}(\bar{r})$ 处。定义应变张量为^[8]

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right),$$

根据虎克定律,应变张量矩阵元与应力张量矩阵元的关系为^[8]

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1+\nu)\sigma_{ij} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})\delta_{ij}] + \alpha T \delta_{ij}$$

其中 E 为 Young's 模量, ν 表示泊松半径, α 为热膨胀系数, T 为温度。

根据反映介质内部的热应力关系式可得到平衡方程^[8]

$$\nabla^2 \bar{U} + \frac{1}{1-2\nu} \nabla(\nabla \cdot \bar{U}) = \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha \nabla T.$$

另外,激光介质中的热传导规律也已经被很好地总结^[8],热传导方程为

$$\frac{C\rho}{\kappa} \dot{T} = \nabla^2 T + \frac{Q}{\kappa},$$

其中 κ 为热传导率, C 为比热, ρ 为密度。

由此,便可以通过温度场的分布求得应变场的分布,进而求得应力分布。

3 用 ANSYS 计算双包层平面波导激光器中温度、热应力分布

3.1 有限元法的计算模型

双包层平面波导的结构及参数如图 1 所示(上下外包层的厚度分别为 300 和 3000 μm)。由于模型采用端面均匀抽运和表面冷却方式,故只考虑模

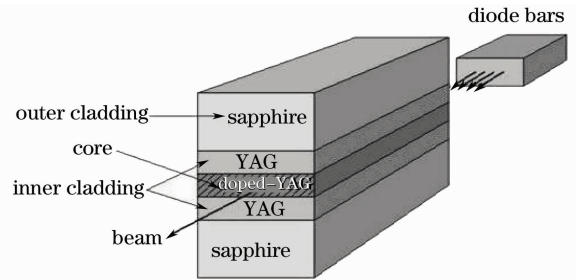


图 1 双包层平面波导激光器结构示意图

Fig. 1 Double-clad planar waveguide laser

structure diagram

型厚度方向和长度方向的热传播。

3.2 模拟算例计算条件参数

为了分析双包层平面波导激光器的波导结构对激光介质温度、热应力分布的影响,在以下的不同结构中,取相同的加热功率和相同的边界条件:其中上下表面取平均换热系数为 $10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,温度取 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。抽运面为自然对流条件,平均换热系数取 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,温度取 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4 数值模拟结果及分析

通过改变波导各层厚度,分析了不同情况下的温度分布和热应力分布,并对结果进行了对比。

4.1 激光介质厚度的变化对激光器热分析结果的影响

对于双包层平面波导激光器来说,激光介质是波导结构中最重要的一部分,激光介质的厚度直接影响了激光器的抽运效率、激光输出功率及激光的质量。下面分 3 种情况分析不同激光介质厚度对激光介质总体热效应的影响情况。

在抽运功率和边界条件相同的情况下,当芯层厚度分别为 10, 20, 40 μm 时,图 2 给出了沿激光介质长度方向的温度、应力分布。

通过激光介质横截面的平均温度和热应力在激光器长度方向上的比较发现,在抽运功率相同的情况下,激光介质厚度的变化引起了激光介质整体热应力和温度分布显著的变化。在抽运功率相同的情况下,当激光介质厚度增加时,激光介质内的整体温度和热应力分布都显著地增加,因此,对于双包层平面波导激光器来说,在影响激光介质热效应方面,波导激光器中激光介质厚度是一个关键的因素,对激光介质的热效应影响较大。

4.2 内包层厚度的变化对激光器热分析结果的影响

内包层结构对双包层平面波导激光器来说是很重要的结构,一方面内包层的厚度直接影响到激光器的抽运效率,内包层越厚,抽运光越容易被抽运到

激光介质中,抽运效率越高;另一方面,由于双包层平面波导激光器的5层晶体是靠直接键合技术成为一个整体的,因此双包层的厚度直接影响到制备双包层平面波导激光器中工艺的难易程度。所以研究双包层平面波导激光器的内包层的厚度对制备双包层平面波导激光器是非常必要的。图3给出了在相同抽运功率和边界条件下内包层厚度分别为5,10和15 μm时激光介质内温度和热应力的分布情况。

通过对3种情况下激光介质横截面上温度和应力平均值在激光器长度上分布的比较,可以看出,内

包层的变化没有引起激光介质温度、应力的显著变化,因此在一定的范围内,内包层厚度的增加不会引起多余的热效应,这对提高抽运效率、降低波导激光器的制作工艺的难度很有帮助。

4.3 基底厚度的变化对激光器热分析结果的影响

显然,减小双包层平面波导激光器基底的厚度更利于热量的扩散,但是对热应力的影响是未知的,图4给出了当基底的厚度分别为2和3 mm时,双包层平面波导激光器中温度和热应力的变化情况。

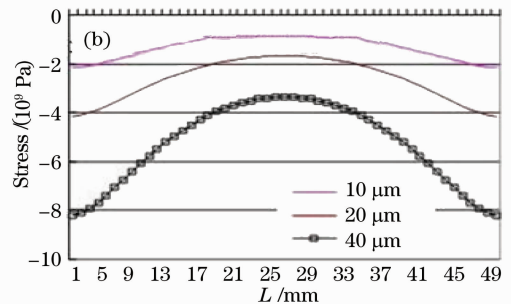
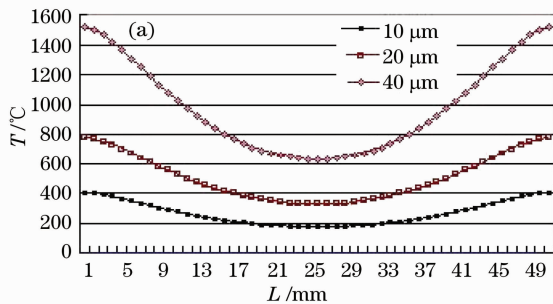


图2 芯层厚度对激光介质温度(a)和热应力(b)的影响

Fig. 2 Temperature (a) and thermal stress (b) of different core layer thickness

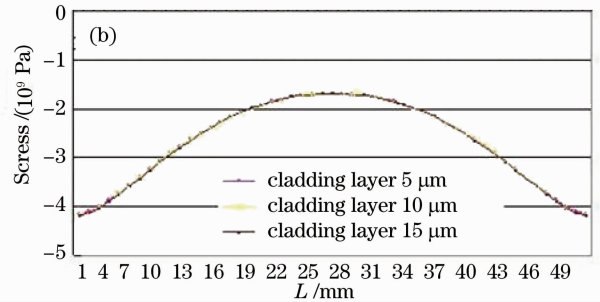
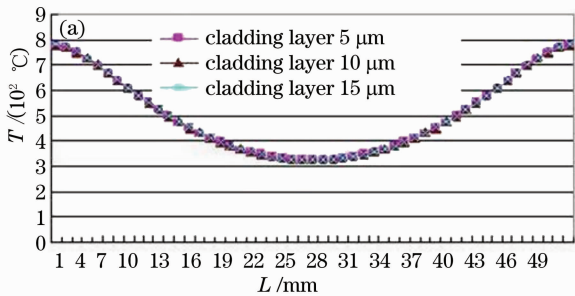


图3 内包层的变化对激光介质温度(a)和热应力(b)分布的影响

Fig. 3 Temperature (a) and thermal stress (b) of different cladding layer thickness

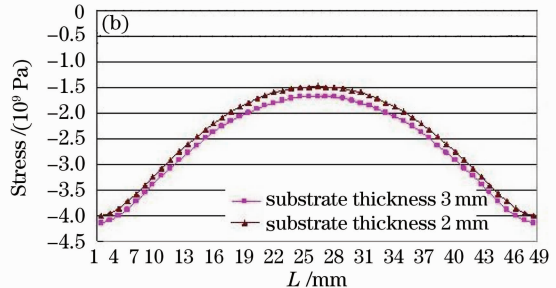
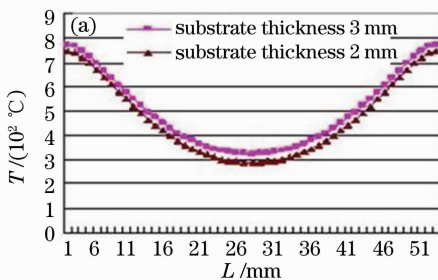


图4 基底厚度对激光介质温度(a)和应力(b)的影响

Fig. 4 Temperature (a) and thermal stress (b) of different Substrate thickness

5 结 论

通过改变波导各层厚度,分析了不同情况下的温度分布和热应力分布。当芯层厚度从10 μm变

到20 μm直到40 μm时,在抽运功率相同的情况下,激光介质波导两端的温度和热应力分布都几乎成倍地增加。当内包层厚度从5 μm变到10 μm直

到 15 μm 时,在抽运功率相同的情况下,激光介质内温度和热应力基本不变。这一结论对降低加工难度非常有意义,因为晶体的减薄研磨非常容易使晶体破裂,导致前功尽弃。另外,当基底分别取 3 mm 和 2 mm 时,激光介质内温度和热应力并没有引起激光介质内温度和热应力的显著变化。这一结论可以使我们尽量加大基底的厚度,使得整个器件在加工抛光研磨过程中能有一个牢固的基座,减小失败的几率。最后值得一提的是,在上述所有模拟计算结果中,沿波导的纵向,温度和应力的分布均为在波导两端面上的温度及应力最大,中间反而较低,这一规律与多数大功率棒状固体激光器实验结果吻合,说明结论是可靠的。

参 考 文 献

- 1 Li Xiaomin, Zhuo Zhuang, Li Tao *et al.*. Laser diode-pumped Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 41~44
 李晓敏, 卓 壮, 李 涛 等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄/YVO₄ 复合晶体激光器[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 41~44
- 2 Zhao Hongming, Zhao Shengzhi, Yang Kejian. Q-switched intracavity doubling Nd:YVO₄/KTP laser with acousto-optic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1294~1297
 赵宏明, 赵圣之, 杨克建. LD抽运 Nd:YVO₄/KTP 内腔倍频声光调 Q 理论和实验研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(11): 1294~1297
- 3 Yao Zhenyu, Lü Baida, Jiang Jianfeng. Laser diode-pumped Nd:YAG double-disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 457~460
 姚震宇, 吕百达, 蒋建锋. 激光二极管抽运 Nd:YAG 双薄片激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 457~460
- 4 D. P. Shepherd, S. J. Hettrick, C. Li. High-power planar dielectric waveguide lasers[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, **34**: 2420~2432
- 5 Jacob I. Mackenzie, Cheng Li, David P. Shepherd. Multi-watt, high efficiency, diffraction-limited Nd:YAG planar waveguide laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(3): 493~500
- 6 Yang Yongming, Wang Shiyu, Cai Defang *et al.*. Thermal effect of end deformation in laser diode end pumped Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 582~586
 杨永明, 王石语, 蔡德芳 等. 激光二极管端面抽运 Nd:YAG 的端面变形 [J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 582~586
- 7 Hou Liqun, Zu Jifeng, Dong Yue *et al.*. Numerical simulation of thermal induced effects and cooling characteristics of Nd:GGG laser crystal slabs in the heat capacity operation mode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1025~1029
 侯立群, 祖继锋, 董 玥 等. Nd:GGG 激光晶体热容工作下的热致效应与冷却特性数值模拟 [J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1025~1029
- 8 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