

文章编号 1004-924X(2007)06-0841-05

检测激光晶体侧面致冷均匀性的马赫-泽德干涉法

肖孟超^{1,2}, 郝二娟^{1,2}, 吕彦飞³, 檀慧明¹, 钱龙生¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

摘要:提出了一种基于马赫-泽德干涉仪的检测法。理论分析表明,该法检测到的物光与参考光的干涉条纹即为晶体径向平面上的等温线。通过热分析软件对均匀和非均匀致冷晶体温度场的模拟表明,当检测到的干涉条纹为以晶体径向平面中心为圆心的圆环时,晶体周边接触良好,致冷均匀;当检测到的干涉条纹向某一方向扭曲时,该方向上致冷块与晶体边界接触不好。对装在铜致冷座里的 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 5\text{ mm}$, a 切割, $0.5\% \text{ Nd}^{3+}$ 掺杂的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体进行了检测,根据检测到的干涉条纹扭曲方向重新安装了致冷座,获得了以端面中心为圆心的干涉环。实验结果与理论分析相符,证明马赫-泽德干涉法可以检测晶体侧面致冷均匀性。

关键词:马赫-泽德干涉法;激光晶体;热光效应;侧面致冷

中图分类号: TN244; O436.1 **文献标识码:** A

Mach-Zehnder interferometry for detecting side cooling uniformity of laser medium

XIAO Meng-chao^{1,2}, HAO Er-juan^{1,2}, LU Yan-fei³, TAN Hui-ming¹, QIAN Long-sheng¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: For detecting side cooling uniformity of laser medium, a detecting method based on Mach-Zehnder interferometer is presented. Theoretical analysis indicates that the interference fringe produced by a reference beam and a beam passing the medium is also isotherm on the radial face of the laser medium. The simulations on the temperature fields of uniformly and non-uniformly cooled mediums by heat analysis software indicate that: if the interference fringe is circle with the center of the radial face as the center, the sides of the medium contact closely with the copper cooler, the medium is cooled uniformly. If the interference fringe is distorted to a certain direction, the medium contacts loosely with the copper cooler in the direction. In the experiment, a distorted interference fringe is obtained by detecting a $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ sized, a -cut, $0.5\% \text{ Nd}^{3+}$ -doped $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ embedded in a copper cooler. A circular interference fringe is obtained after reassembling the copper cooler according to the distorted direction of the distorted interference fringe. Experimental result agrees with the the-

收稿日期:2007-02-02;修订日期:2007-03-21.

基金项目:国家 863 计划资助项目(No. 2002AA311140)

oretical analysis very well, it has proved that Mach-Zehnder interferometry can detect side cooling uniformity of laser medium.

Key words: Mach-Zehnder interferometry; laser medium; calorescence effect; side cooling

1 引言

随着半导体激光泵浦源功率的提高,固体激光器端面泵浦方式由于具有易与基模模式匹配,泵浦效率高的优点已越来越多地在大功率激光器中被采用^[1-4]。由于该泵浦方式结构方面的限制,通常只能采用侧面传导的方式进行致冷,该致冷方式的一个很大的缺点是形成很大的径向温度梯度,从而产生很严重的热透镜效应,降低出光效率和光束质量^[5-8],因此热问题的研究变得越来越重要。

关于热问题的研究,前人做过很多工作^[9-12]。这些工作大都假设热分布是均匀的,但实际的应用中,晶体侧面致冷块的装调误差可能破坏端泵激光晶体热透镜效应的圆对称性,不仅影响导热效率,增加热透镜补偿难度,而且会恶化光束质量^[13,14],因此有必要对晶体致冷块的装调工艺进行检测。

本文提出了一种基于马赫-泽德干涉平台^[15]的方法,使用该方法可以检测晶体侧面致冷的均匀性,下面以检测 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, a 切割, 0.5% Nd^{3+} 掺杂的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体侧面致冷均匀性为例介绍这种方法。

2 马赫-泽德干涉法检测原理

马赫-泽德干涉法实验装置如图 1 所示。把准直且垂直于 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体 π 向入射的 632.8 nm 氦氖线偏振光作为探测光,经分束器 1 后分成两条光路,一条为参考光光路,另一条为经过 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的物光光路,两条光路经过分束器 2 后合为一条光路。调焦成像系统使其物面定位于 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的前表面,在 CCD 上将得到晶体前表面上物光与参考光的干涉图。由文献^[13]可知,干涉条纹为参考光和物光的等位相差线。由于准直的参考光在整个干涉面内等位相,因此干涉条纹又可看作物光的等位相线。

$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 对物光位相的改变主要与其径向温度分布有关。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 在吸收泵浦光后,

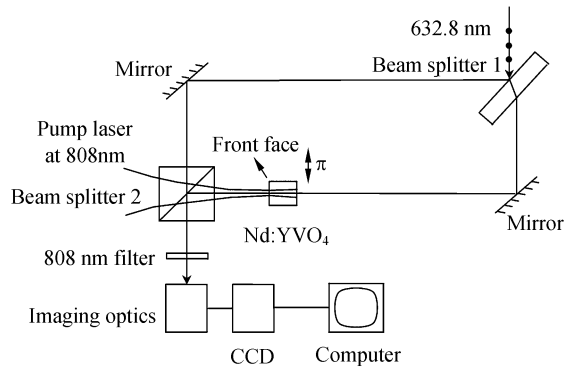


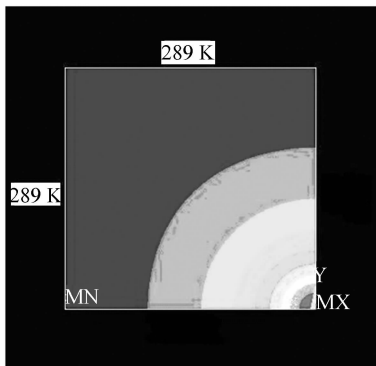
图 1 马赫-泽德干涉法实验装置

Fig. 1 Mach-Zehnder interferometer experimental setup

一部分能量转化为热。当以侧面传导的方式致冷时,在晶体内部会形成径向的温度梯度。径向的温度梯度通过热光效应产生径向折射率梯度,从而改变物光的位相分布。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 有垂直和平行于晶体 π 向的两个不等值的热光系数 dn_o/dT 和 dn_e/dT , dn_o/dT 为晶体中偏振方向垂直于晶体 π 向行进的光所能感受到的因温度改变引起的热光系数, dn_e/dT 为晶体中偏振方向平行于晶体 π 向行进的光所能感受到的因温度改变引起的热光系数。对于偏振方向垂直于晶体 π 向入射的物光线偏振光来说,它只能感受到由 dn_o/dT 产生的折射率变化,因此在整个径向平面内,径向温度分布与折射率分布存在一一对应的线性关系。由于折射率分布又与物光位相分布存在一一对应的线性关系,因此径向温度分布与物光位相分布也存在一一对应的线性关系,等位相线即为等温线。因此通过马赫-泽德干涉法测得的干涉条纹可以检测 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的温度分布。

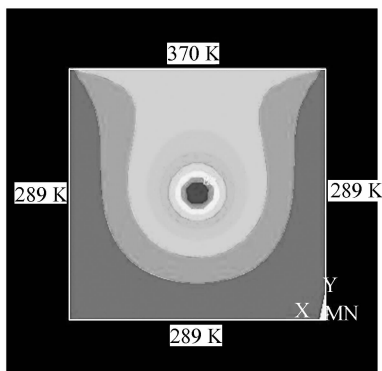
图 2 为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, a 切割, 0.5% Nd^{3+} 掺杂的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体在有 4 W 的泵浦功率转换成热时前端面稳态温度分布模拟图。图 2(a)模拟的是周边致冷温度均为 289 K 的情况,由于热模型具有对称性,所以只模拟晶体的 $1/4$ 部分以减小模拟运算数据量,得到的模拟图等温线为以端面中心为圆心的圆环。图 2(b)模拟条件为:晶体三边致冷温度为 289 K ,上侧致冷块与晶体接触不好,稳态下温度设为 370 K ,得到的模拟

图等温线向上侧扭曲。由此可得出这样的判断:当晶体座致冷均匀时,晶体径向平面等温线为圆环,这样的温度分布产生的干涉环也为圆环;当某方向上的致冷块与晶体接触不好时,晶体径向平面等温线向这一方向扭曲,这样的温度分布产生的干涉环也向这一方向扭曲。



(a) 周边致冷均匀(1/4 晶体)

(a) Sides cooling uniformly (1/4 part of crystal)



(b) 周边制冷不均匀

(b) Sides cooling non-uniformly

图 2 4 W 的泵浦功率转换成热时,3 mm×3 mm×5 mm,*a* 切割,0.5% Nd³⁺ 掺杂的 Nd:YVO₄ 晶体前端面的温度分布稳态模拟图

Fig. 2 Static temperature simulation of the front face of a 3 mm×3 mm×5 mm sized, *a*-cut, 0.5% Nd³⁺-doped Nd:YVO₄ with 4 W pump power converting to heat

3 实验现象

所用泵浦源为 LIMO 公司生产的 808 nm 光

纤耦合 LD。激光晶体为 3 mm×3 mm×5 mm,*a* 切割,0.5% Nd³⁺ 掺杂的 Nd:YVO₄。Nd:YVO₄ 侧面裹上铝箔后通过机械夹固的方式固定在如图 3 所示的铜致冷座上。当泵浦功率为 13 W 时,测得从热扩散刚刚开始到热平衡建立的不同时刻的干涉图如图 5 所示。图 5(a)为晶体未吸收泵浦光时的干涉图,干涉图一片均匀,说明晶体无径向温度梯度。图 5(b)-(d)为晶体吸收泵浦光后热扩散初期的干涉图,此时热量还未传递到致冷块,处于向四周均匀扩散状态,等温线形状不受边界致冷均匀性影响,为以端面中心为圆心的圆环。图 5(e)为晶体吸收泵浦光后热扩散趋于稳定时的干涉图,此时热量已传递到致冷块,等温线形状开始受边界致冷均匀性影响而有些微扭曲。图 5(f)为热稳态建立后的干涉图,此时边界致冷的不均匀使得等温线向图中箭头方向明显扭曲,说明图中白线标出的边界处致冷块与晶体接触不好。

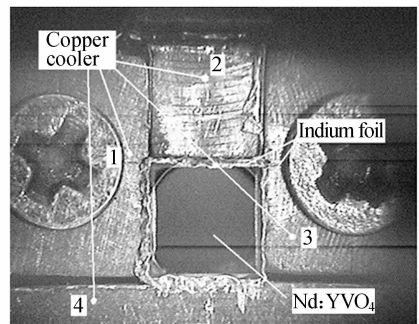


图 3 嵌有 Nd:YVO₄ 的铜致冷座

Fig. 3 Copper cooler embedded with Nd:YVO₄ crystal

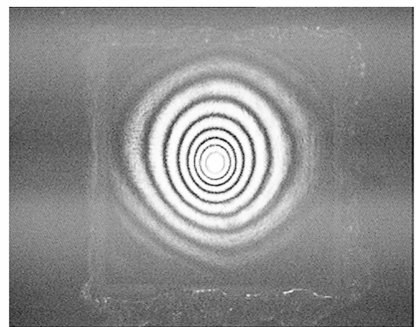
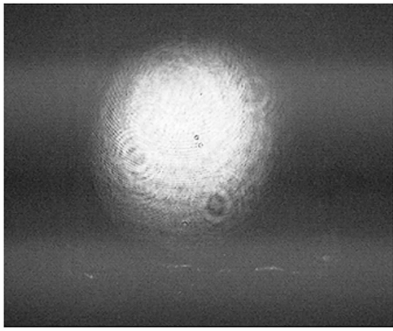
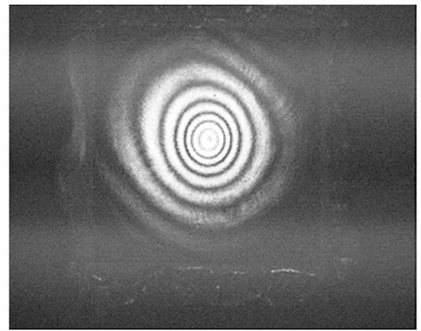


图 4 重新装调铜致冷座后获得的圆形干涉图

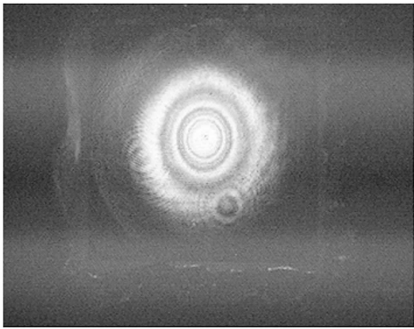
Fig. 4 Circular interference fringe obtained after re-assembling the copper cooler



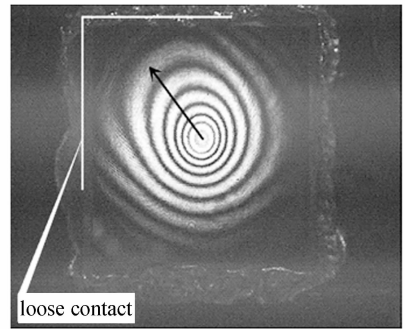
(a) 0 ms



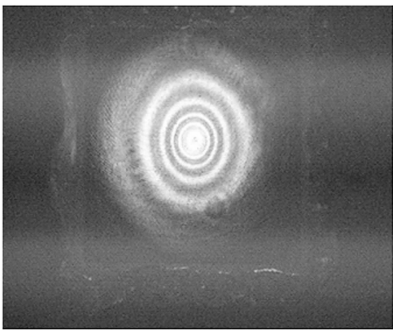
(e) 810 ms



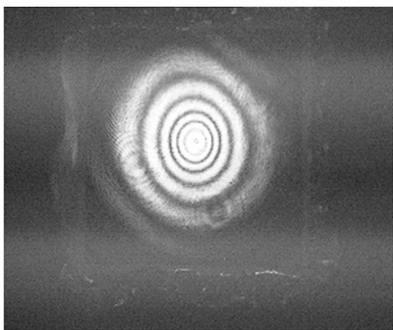
(b) 90 ms



(f) 3460 ms



(c) 225 ms



(d) 405 ms

图 5 从热扩散刚刚开始到热平衡建立的不同时刻的干涉图

Fig. 5 Interference fringe from beginning of heat diffusion to static heat diffusion

重新装调图 3 所示的铜致冷座,有意识地轻微挤压致冷块 1、2,使其与晶体侧面更好地接触,测得干涉图如图 4。从图中可看出,相对于干涉图 5(f),沿箭头方向的扭曲被纠正过来,等温线呈圆对称分布,可见重新装调后的致冷座能对晶体的四个侧面进行均匀致冷。

4 结 论

为检测激光晶体侧面致冷的均匀性,本文描述了一种基于马赫-泽德干涉法的检测方法。使用该法获得的干涉条纹即为晶体径向平面的等温线,软件模拟表明当侧面致冷不均匀时,圆干涉环向热接触不好的边界扭曲。使用该法对装在铜致冷座里的 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, a 切割, 0.5% Nd^{3+} 掺杂的 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体进行了检测和重新装调,结果表明,该法能检测晶体座致冷的均匀性,并对如何正确装调具有指导意义。

参考文献:

- [1] LIU J H, LI G M, WANG CH Q, *et al.*. Thermal lens stabilized flat-flat resonator 15-W CW Nd:YVO₄ laser end-pumped by a diode-laser-array [J]. *SPIE*, 1999, 3862: 267-269.
- [2] YANG S T, IMAL Y, OKA M, *et al.*. Frequency-stabilized, 10 W continuous-wave, laser-diode end-pumped, injection-locked Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(20): 1676-1678.
- [3] CHEN Y F, LAN Y P, WANG S C. Efficient high-power diode-end-pumped TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser with a planar cavity[J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(14): 1016-1018.
- [4] Lü Y F, ZHANG X H, YAO ZH H, *et al.*. 1.1 W continuous-wave orange-yellow light Nd:YVO₄ laser with intracavity sum-frequency generation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 736-739. (in Chinese)
- [5] JAGUS J, KWIATKOWSKI J, ZENDZIAN W, *et al.*. Characterization of thermo-optic effects in diode end pumped lasers [J]. *SPIE*, 2005, 5958: 511-518.
- [6] CLARKSON W A. Design considerations for high-power TEM₀₀ operation of end-pumped solid-state lasers [J]. *SPIE*, 1998, 3682: 2-12.
- [7] LU P H, WANG R W. Thermal effect of high power laser and output laser beam quality [J]. *SPIE*, 2000, 4223: 50-54.
- [8] SONG F, ZHANG CH B, XIN D, *et al.*. Determination of thermal focal length and pumping radius in gain medium in laser-diode-pumped Nd:YVO₄ lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(12): 2145-2147.
- [9] YU J. Discussion on temperature profile in end-pumped laser rods [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(4): 26-30. (in Chinese)
- [10] ANANADA K C. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. *IEEE Journal OF Quantum Electronics*, 1992, 28(4): 1057-1069.
- [11] INNENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(19): 1831-1833.
- [12] 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.
LI L, SHI P, LIU X F, *et al.*. Thermal effect of YVO₄-Nd:YVO₄ composite laser crystals[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 786-791. (in Chinese)
- [13] SIEGMAN A E. Analysis of laser beam quality degradation caused by quartic phase aberrations [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 5893-5901.
- [14] 季小玲, 吕百达. 像散透镜对高斯光束的光束变换[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(4): 397-400.
JI X L, LÜ B D. Transformation properties of Gaussian beams passing through an astigmatic lens [J]. *High power laser and particle beams*, 2000, 12(4): 397-400. (in Chinese)
- [15] 梁铨廷. *物理光学(第二版)*[M]. 北京:机械工业出版社, 1987.
LIANG Q T. *Physical optics (2th Edition)* [M]. Beijing: China Machine Press, 1987. (in Chinese)

作者简介:肖孟超(1980—),男,江西人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,研究方向为激光器的模块化及稳定性研究。E-mail:xiaomengchao@sohu.com