

文章编号: 0258-7025(2007)10-1371-04

激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器 热致光束畸变非对称的平衡

林 强, 王宪涛, 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 由于 a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体的非对称性, 使得激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器不同于 Nd:YAG 激光器, 输出的激光经常产生非对称结果。用有限元法分析激光二极管端面抽运 a 轴切割 Nd:YVO₄ 固体激光器的晶体热效应, 包括温度分布、内部应力和产生的形变。分析结果表明端面抽运 a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体产生了椭球热透镜效应。从结构方面和抽运方面提出了热透镜非对称性的平衡方法, 实验验证了方法的可行性。

关键词 激光器; 固体激光器; Nd:YVO₄ 晶体; 热畸变; 椭球热透镜

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Balance of Asymmetry of Thermal Beam Distortion in Laser Diode End-Pumped Nd:YVO₄ Solid State Lasers

LIN Qiang, WANG Xian-tao, ZHU Jian-qiang

(Joint Laboratory on High Power Laser and Physics,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The asymmetry of a -cut Nd:YVO₄ leads to asymmetrical laser output from laser diode (LD) end-pumped Nd:YVO₄ solid state laser, which differs from Nd:YAG laser. The finite element was applied to analyze the thermal effect of LD end-pumped a -cut Nd:YVO₄ crystal, including temperature distribution, internal stress and its deformation. The results indicate that the thermal lens of end-pumped a -cut Nd:YVO₄ crystal takes the ellipsoidal distribution. The method of balancing the asymmetry of thermal lens was put forward by the way of structure and pumping, and experimentally proved feasible.

Key words lasers; solid state lasers; Nd:YVO₄ crystal; thermal distortion; ellipsoidal thermal lens

1 引言

随着高功率激光二极管(LD)商业化的应用, 激光二极管抽运的固体激光器得到了较快的发展, 它具有结构紧凑、成本低等优点, 广泛应用于光存储、数字视频技术、光谱技术、激光医疗、激光演示和激光多媒体技术等方面。激光二极管端面抽运固体激光器在光谱和空间模式方面能够很好地匹配, 虽然相对于灯抽运系统而言, 激光二极管端面抽运减小了总的热载荷, 但由于局部热沉积的存在, 热导致的光束畸变成为这种激光器的主要问题之一。对激光

二极管抽运固体激光器的热分析有许多, Koechner等^[1]首先分析了均匀光抽运情况, 得到了抛物线形温度分布, 随后人们提出了许多特定假设条件下的分析模型^[2~10]。但对 Nd:YVO₄ 晶体非对称形式工作的热特性分析较少。本文用有限元方法分析激光二极管端面抽运 a 轴切割 Nd:YVO₄ 固体激光器的晶体热效应, 包括温度分布、内部应力和产生的形变。

2 热致光束畸变

平凹腔型结构是典型的激光二极管端面抽运固

收稿日期: 2007-04-02; 收到修改稿日期: 2007-04-23

作者简介: 林 强(1974—), 男, 福建人, 博士研究生, 主要从事固体激光器件及激光工艺研究。E-mail: linq@siom.ac.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 江苏人, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率激光驱动器的总体光学设计、结构设计以及相关检测技术和测控技术的研究。E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

体激光器结构,为了简化总体结构,常常将输入腔镀在激光晶体入射端面上。以激光二极管端面抽运 a 轴切割 Nd:YVO₄ 固体激光器为例,通常在激光晶体 Nd:YVO₄ 的入射端面镀双波长的膜,即对激光波长高反射,对抽运波长高透,从而简化了系统结构。虽然这种结构总的热载荷较小,但是在激光晶体的抽运光模体积分范围内产生了局部热沉积,将导致激光光束传播发生畸变。

在激光二极管端面抽运 a 轴切割 Nd:YVO₄ 固体激光器中,假定抽运光呈轴对称分布,而 a 轴切割晶体 Nd:YVO₄ 轴的两个方向热传导系数不同,此时,对于轴对称抽运和散热方式, a 轴切割 Nd:YVO₄ 稳态温度分布就不再是轴对称的了。

首先,抽运光对 Nd:YVO₄ 作用产生的热功率密度 $q(x, y, z)$ 与抽运光被晶体吸收的量有关,在结构模型中,假定抽运光为沿晶体 a 轴方向传播的高斯型光束,则

$$q(x, y, z) = \frac{2Q\alpha}{\pi\omega_p^2[1 - \exp(-\alpha L)]} \exp(-\alpha z) \times \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2}\right], \quad (1)$$

式中 α 为晶体对抽运光的吸收系数, ω_p 为高斯光束腰半径, L 为晶体长度, Q 为总的热载荷,它是由抽运光能量在激光材料上转化为热能的部分造成的,对于激光工作状态,相当于量子损耗。在 Nd:YVO₄ 晶体中,约有 20%^[11] 的抽运光能量转化为热能。

按照(1)式的条件,用有限元分析方法数字求解,本文借助于 ANSYS 有限元分析软件辅助求解。

初始条件为:垂直 a 轴切割的方形 Nd:YVO₄ 尺寸为 2 mm × 2 mm × 2 mm,激光传播方向平行 a 轴。四个侧面温度控制在 25 °C;前后工作表面处于正常的空气热对流状态,取对流系数为 3.6 W/(m² · K⁻¹)。抽运功率 2 W,抽运光束 ω_p 取为 100 μm。Nd:YVO₄ 的热导率 K_{cr} 取 5.23 W/(m · K) (// c 轴), 5.10 W/(m · K) (⊥ c 轴);将方形 Nd:YVO₄ 晶体沿轴向划分为 80 个等分,沿径向划分为 80 个等分。

经有限元热分析得到 a 轴切割 Nd:YVO₄ 的轴界面上温度分布状况,中心和边缘的温度差约 45 °C,温度等高线是椭圆形的。而在 $\omega_p = 100 \mu\text{m}$ 边缘,平行 c 轴方向比垂直 c 轴方向的温度低约 2.8 °C(如图 1 所示)。

更精细的网格划分分析表明它对结果的影响约

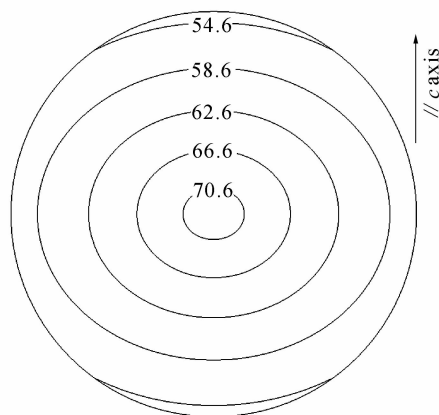


图 1 a 轴切割 Nd:YVO₄ 的入射端面温度等高线图
Fig. 1 Contour of temperature at the incident surface of a -cut Nd:YVO₄

为 2%,已经不能显著改变结果了。因此,上述的划分精度是足够的。同样,利用有限元法可以分析出 a 轴切割 Nd:YVO₄ 内部应力,得到相应的形变量。在弹性限度内,应力和形变关系服从胡克(Hooke)定律。经分析,在抽运光束 $\omega_p = 100 \mu\text{m}$ 范围内的由应力产生的最大形变量 $\Delta u = 0.21 \mu\text{m}$ (⊥ c 轴), $\Delta u = 0.28 \mu\text{m}$ (// c 轴)。

热致畸变主要包括温度变化导致折射率变化而产生的离差量、沿轴方向热致形变产生的光程差以及晶体材料应力双折射产生的光程差^[12]。通过上述对温度差和热致形变量的分析,对抽运点半径范围内粗略估计可以算出热透镜的大小,这种热透镜是非中心对称的,表现为椭球热透镜。

3 热透镜非对称性的平衡

由于 a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体在 // c 轴方向和 ⊥ c 轴方向具有不同的热导率,而激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体主要是沿径向散热,轴向的散热方式主要是对流,散出的热量有限。因此, a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体在 // c 轴方向和 ⊥ c 轴方向形成了不同的温度梯度。使得 a 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体形成了椭球面形热透镜,因而激光器工作于非中心对称状态,输出激光光斑呈椭圆状甚至出现多横模。

为了使激光器工作时接近中心对称状态,需要平衡 Nd:YVO₄ 晶体在平行 c 轴方向和垂直 c 轴方向形成的不同温度梯度。由于垂直 c 轴方向的热梯度比平行 c 轴方向大一些,可以考虑减小晶体在垂直 c 轴方向的尺寸。另一方面, Nd:YVO₄ 晶体在平

行 *c* 轴方向温度梯度大,说明只考虑热致形变时,在平行 *c* 轴方向上的 M^2 因子比垂直 *c* 轴方向的大。

对于抽运 Nd:YVO₄ 晶体的单管激光二极管,其快轴和慢轴发散角不同,因此抽运光在晶体中的聚焦面的位置也就不同。图 2 表示抽运光的快轴和慢轴两个方向上晶体中的增益区和损耗区。在慢轴方向,抽运光束发散角小,在晶体中增益区域的平均直径较小。而在快轴方向,抽运光束发散角大,在晶体中增益区域的平均直径较大。因此,只考虑增益区域情况下,快轴方向的 M^2 因子比慢轴方向大。

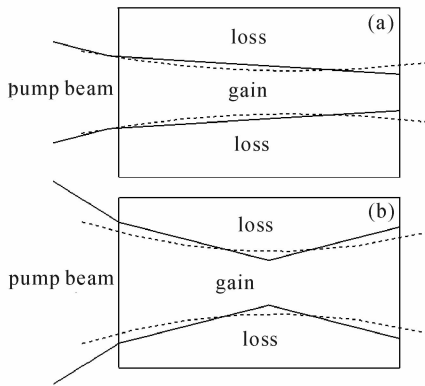


图 2 抽运光慢轴(a)和快轴(b)两个方向上晶体中的增益区和损耗区

Fig. 2 Gain and loss regions in the crystal in the slow-axis (a) and fast-axis (b) direction of pump beam

因此,可以使抽运光束的快轴方向与垂直 *c* 轴方向一致,而慢轴方向与平行 *c* 轴方向一致,再适当调整抽运光束聚焦面在晶体中的位置,即可实现振荡光束传播在两个方向上的平衡。

用光束分析仪通过实验观察单管激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器输出的 1064 nm 激光,并检测输出激光 M^2 因子。实验中采用的单管激光二极管,其抽运功率为 1.8 W,耦合进入 *a* 轴切割 Nd:YVO₄ 晶体中,输出激光功率为 420 mW。在一个随机抽运方向上测得 $M^2(x) = 1.69, M^2(y) = 1.53$,如图 3(a)所示。用上述方法,使抽运光束的快轴方向与垂直 *c* 轴方向一致,慢轴方向与平行 *c* 轴方向一致,调整后 $M^2(x) = 1.37, M^2(y) = 1.35$,如图 3(b)所示,显然,激光输出的光束质量改善了许多。

另外,当把垂直 *c* 轴方向的尺寸改为 1.5 mm 时,在上述实验条件下,也可以找到一个抽运方向,使 $M^2(x) = 1.39, M^2(y) = 1.42$,输出功率保持不变,而此时抽运光束的快轴方向与垂直 *c* 轴方向是

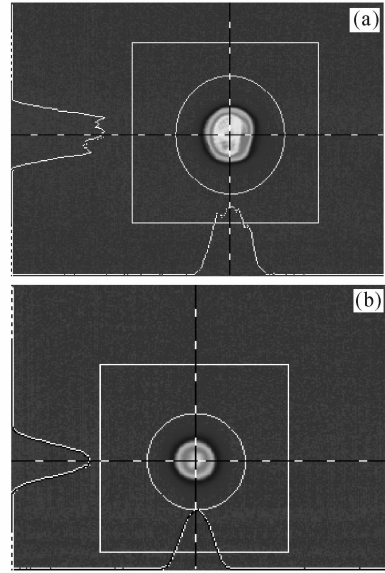


图 3 通过调整抽运光与 Nd:YVO₄ 晶体关系改善光束质量

Fig. 3 Improvement of laser beam quality by adjusting pump beam direction in Nd:YVO₄ crystal

不一致的。

4 结 论

用有限元法分析激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器晶体热效应的结果说明了 Nd:YVO₄ 晶体的热透镜呈椭球面分布,这会影响到输出激光的光束质量,需要平衡热透镜的非对称性。一方面通过减小 Nd:YVO₄ 晶体垂直 *c* 轴方向的尺寸,平衡晶体两个径向的热梯度,实现了非对称的平衡。另一方面,从抽运角度考虑,利用单管激光二极管在快轴和慢轴两发散角不同的特性,使抽运光束的快轴方向与垂直 *c* 轴方向一致,而慢轴方向与平行 *c* 轴方向一致,并适当调整抽运光束聚焦面在晶体中的位置,实现振荡光束传播在两个方向上的平衡,并实验验证了该方法是可行的。

参 考 文 献

- 1 Walter Koechner, Dennis K. Rice. Effect of birefringence on the performance of linearly polarized YAG: Nd lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1970, **QE-6**(9):557~566
- 2 Chartes E. Greninger, Gregory A. Needham, Joseph Rebar. Optical distortions and birefringence in high power laser windows: model and computer code [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(17):2797~2803
- 3 Claude A. Klein. Optical distortion coefficients of high-power laser windows [J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(4):343~350
- 4 David C. Brown, Kotik K. Lee. Methods for scaling high

- average power laser performance [C]. *SPIE*, 1986, **622**:30~41
- 5 Usamah O. Farmkh, A. Martin Buoncristiani, Charles E. Byvik. An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(11):2253~2263
 - 6 M. E. Innocenzi, H. T. Yura, C. L. Fincher *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19):1831~1833
 - 7 Ananada K. Cousins. Temperature and thermal stress scaling in finite length end-pumped laser rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1057~1069
 - 8 Peng Qinjun, Bo Yong, Yang Xiaodong *et al.*. A 2277 W solid state heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11):1477
彭钦军,薄 勇,杨晓冬等. 2277 W 全固态热容激光器[J]. 中国激光, 2005, **32**(11):1477
 - 9 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
 - 10 C. Pfistner, R. Weber, H. P. Weber *et al.*. Thermal beam distortions in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG, and Nd:YLF rods [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(7):1605~1615
 - 11 Steve C. Tidwell, Jonathan F. Seamans, Mark S. Bowers *et al.*. Scaling CW diode-end-pumped Nd:YAG lasers to high average powers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):997~1009
 - 12 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. 7th ed.. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 835~837

“2007 中国光学重要成果”征稿启事

《激光与光电子学进展》的重点栏目——“年度中国光学重要成果”旨在介绍了中国光学领域科研人员在国际著名物理学、光学期刊(如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Opt. Lett.* 等)发表的部分具有重要学术、应用价值的论文。自 2005 年开办以来,该栏目得到了众多著名科学家的肯定和支持,2007 年第 2 期该栏目刊登了近 30 篇高质量的论文,获得了大家的广泛好评。为了让读者了解本年度我国光学领域科研人员的最新研究成果,扩大这些成果在国内的影响,《激光与光电子学进展》2008 年第 2 期继续推出“2007 年度中国光学重要成果”栏目,现向全国光学领域在国际知名刊物发表论文的专家、学者征稿。征稿要求说明如下:

1. 来稿条件:研究成果已发表在 2006 年 10 月 1 日以来出版的国际知名物理学、光学刊物上,如 *Nature*, *Science*, *Phys. Rev. Lett.*, *Appl. Phys. Lett.*, *Opt. Lett.*, *Opt. Exp.* 等;
2. 稿件格式:最多不超过 1 500 字,不超过 2 张图片。必须用中文,语言简洁易懂,不必提供过多技术细节,尽量避免使用公式,最好选用彩色图片,参考文献不超过 5 篇,文章结尾处注明作者发表论文的出处,论文格式可参考中国光学期刊网;
3. 请作者标出论文的所属研究领域,如自适应光学,生物光子学,探测器,衍射光学,光纤光学,纳米光学,非线性光学,光学工程,光子结构,光传播,量子光学,半导体光学,超快光学等;
4. 投稿应该包括作者的姓名、单位和联系方式;
5. 录用稿件不收取任何审稿费、版面费,投稿截止日期 2007 年 11 月 15 日;
6. 稿件可以采用 MS Word、Latex 格式,投稿方式:

上海市 800-211 邮政信箱《激光与光电子学进展》编辑部 201800

E-mail: gwjg@mail.shenc.ac.cn; lop@siom.ac.cn

《激光与光电子学进展》编辑部