

文章编号: 0253-2239(2008)03-0497-05

激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄板条激光器 及其热效应

邵 杰 李小莉 冯宇彤 陆雨田

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 激光器中激光介质采用板条状几何结构可以极大地降低它的热效应,但仍然需要进一步分析其影响,进而优化激光器效率。利用有限元分析方法分析了部分端面抽运的混合腔板条激光器中激光介质的热效应,计算的透镜焦距与实测结果基本相符。分析了热效应对模式匹配的影响,分析结果对于优化激光器效率、改进谐振腔设计具有一定的参考价值。并在分析的基础上进行了混合腔实验,抽运功率为 110 W 时,获得连续输出激光功率 41.5 W,光-光转换效率约 38%,斜效率达 58.8%, M^2 因子为非稳腔方向 $M_x^2=1.59$,稳定腔方向 $M_y^2=1.55$ 。

关键词 激光器; Nd:YVO₄板条激光器; 热效应; 光束质量

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

LD-End-Pumped Nd:YVO₄ Slab Laser and Its Thermal Effects

Shao Jie Li Xiaoli Feng Yutong Lu Yutian

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

Abstract The use of slab geometric structure in laser can greatly reduce thermal effects of laser medium, but further analysis of its impact is necessary for optimizing the efficiency of lasers. We analyzed the thermal effects in the partially end-pumped slab laser with a hybrid resonator, using finite element analysis (FEA) method. The calculated results of the thermal focal length match with the measured results. The thermal effect on mode-match was analyzed. The results are helpful for the optimization of laser efficiency and resonant cavity design. In the experiment, an output laser of 41.5 W power is obtained with the input power of 110 W. Optical-optical conversion efficiency is about 38%, and the slope efficiency is 58.8%, with $M_x^2=1.59$ and $M_y^2=1.55$.

Key words lasers; Nd:YVO₄ slab laser; thermal effects; beam quality

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的全固态激光器(DPSSL)以其高效率、长寿命、结构紧凑、光束质量好等优点,被广泛应用于工业、医疗、科研、信息和军事等领域。激光器中激光介质若采用传统的棒状结构,在承受热负荷时径向的温度梯度使棒呈现出光学畸变^[1~3],严重影响了激光器的光束质量和输出功率。如何降低热效应的影响,从而在获得高功率输出的同时,保证良好的光束质量,成为近年来的研究热点之一。经过研究人员对器件结构、抽运方式

以及谐振腔的设计等方面不断地探索和改进,现已发展出多种具有较低热效应的激光器结构,其中最受关注的方案是采用板条(slab)^[4~6]或者薄片状(thin disk)的激光介质。德国斯图加特大学和德国宇航中心于1992年发明了薄片激光器^[7],取得了不错的实验结果,应用前景十分看好。但薄片激光器的抽运光使用光纤耦合,并需要复杂的整形系统,技术难度较大、成本较高;而且使用稳定腔,限制了基模体积。早在1969年,美国通用电气公司的Martin和Chernoch就提出了板条状几何结构激光

收稿日期: 2007-06-12; 收到修改稿日期: 2007-10-10

作者简介: 邵 杰(1982-),男,河北人,硕士研究生,主要从事大功率高重复率固体激光技术方面的研究。

E-mail: jiesh@hotmail.com

导师简介: 陆雨田(1943-),男,江苏常州人,研究员,博士生导师,目前主要从事激光物理与激光技术等方面的研究。

E-mail: luyutian@mail.shnc.ac.cn

器^[8]。传统的板条激光器中激光在增益介质板条内呈“之”形传播,这样在加工时,对两个板条大面的平行度和光洁度要求很高,使加工变得困难,并且板条的机械安装也较复杂。1998年,德国夫琅禾费激光所的杜可明等研制出一种新型的部分端面抽运混合腔板条激光器^[9]。这种激光器中,抽运光被整形成一条横截面为长方形的细线从端面直接抽运晶体。谐振腔采用稳定-非稳混合腔。板条晶体在大尺寸方向上是非稳腔,可以有效地抑制高阶模,获得高光束质量的激光输出;在小尺寸方向上采用稳定腔,利用抽运体积与端面抽运稳定腔的小基模体积的良好匹配,来实现高效率激光振荡。这种激光器可以在紧凑的空间内实现大功率、高光束质量的激光振荡输出。目前国内已经有少数关于这种新型板条激光器的报道^[10,11]。我们研究发现,板条状激光晶体的

使用以及用两个大面作为冷却面,大大改善了激光晶体的热效应,但是仍不能完全消除其影响。尤其在这种新型板条激光器中,热透镜效应对于实现抽运光与振荡光模式匹配具有一定的影响,设计谐振腔时必须加以考虑。在充分考虑模式匹配的基础上我们进行了激光实验,获得了较好的实验结果。

2 实验装置

整个系统结构如图1所示。激光器主要包括:抽运源、整形系统、稳定-非稳混合谐振腔、激光晶体等。抽运源采用自制激光二极管阵列堆,其封装精度和光束平行度远好于市售的国产激光二极管阵列堆,这有利于把抽运光整形为所需要的细长而均匀的线形光束。整形系统由柱透镜、波导和透镜组构成,其中波导起到混束的作用,使抽运光均匀。

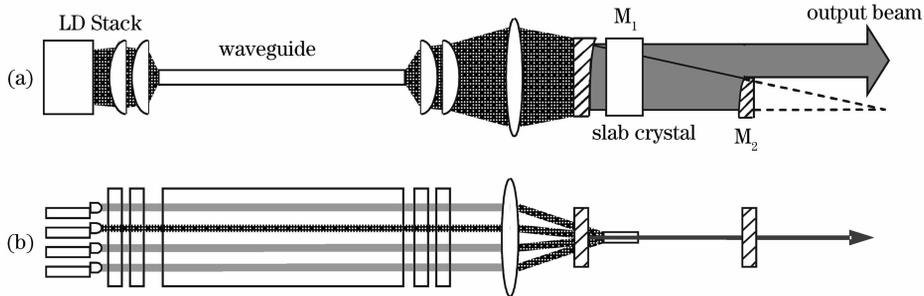


图1 激光器实验装置示意图。(a)水平方向,(b)垂直方向

Fig. 1 Experimental setup of laser. (a) Horizontal direction, (b) vertical direction

激光器谐振腔采用部分端面抽运混合腔结构,如图2所示。经过整形系统后,抽运光被整形成一条沿 x 轴的细长而均匀的线光束入射至晶体端面,但不充满整个端面,故称之为部分端面抽运。

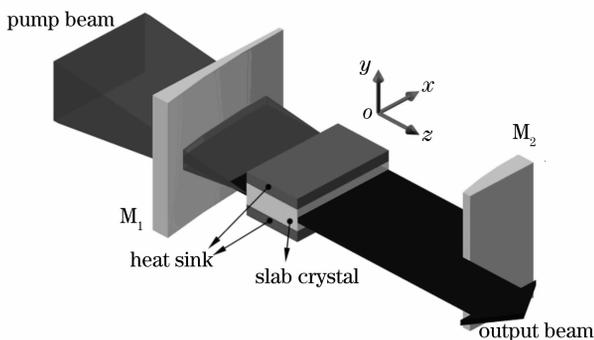


图2 部分端面抽运混合腔板条激光器示意图

Fig. 2 Schematic of partially end-pumped slab laser with a hybrid resonator

混合腔由两个全反射柱面镜 M_1 、 M_2 组成,它们的柱面轴都处于竖直方向,即平行于 y 轴。沿 z 轴方向上,两个柱面镜放置于共焦位置。板条激光

晶体两个最大的表面平行于水平面 xoz ,最小尺寸方向沿 y 轴方向。这样在竖直平面内(即平行于 $yo z$ 平面)两个柱面镜构成了一个平-平腔;在水平面内(平行于 xoz 平面),构成了一个正支共焦非稳腔。共焦非稳腔输出的激光束会被自动准直;另外,与负支非稳腔相比,正支非稳腔结构不会在腔内出现振荡激光的焦点。

3 热效应分析

在这种新型板条激光器中,由于采用板条状激光晶体和两个大面冷却,大大改善了激光晶体的热效应,但仍然需要进一步分析其影响,优化激光器效率。特别是热透镜效应对于实现抽运光与振荡光模式匹配具有一定的影响,设计谐振腔时必须予以考虑。

激光晶体的热分布可以通过热传导方程结合一定的边界条件,利用数值迭代法求出。计算过程比较复杂,而且针对不同的冷却方式计算方法又不尽相同。我们针对本文的激光器结构,利用LasCAD软件对板条激光晶体内的温度和应力分布进行了模

拟,并计算了热透镜焦距。LasCAD 进行热分析的基础是有限元分析(Finite Element Analysis,FEA)方法,对选定形状和尺寸的晶体,设置抽运参量和边界条件(由冷却方式决定),利用自动网格生成器在晶体内生成大量等间距的网格,对热传导方程进行数值求解,并通过三维可视化程序,给出温度和应力分布的三维视图。计算中采用的参量为:Nd:YVO₄晶体,掺杂原子数分数 0.5%,a 向切割,尺寸规格为 12 mm × 10 mm × 1 mm,吸收系数 31 cm⁻¹(808 nm),冷却水温设为 20 ℃。图 3 给出了计算

得到的一些主要结果。可以看出在端面抽运条件下,由于 Nd:YVO₄ 具有较大的吸收系数和相对较小的热导率,使得热负荷集中在晶体端面附近,导致端面处产生了很大的热梯度和热应力,而在晶体内部,沿着抽运光传播方向,温度梯度和热应力逐渐减小。此外热应力还会使端面产生较大的变形。这几方面作用的结果使激光介质产生较严重的热透镜效应。由图 3 还可以看出,由于采用了两个大面冷却,在晶体端面上,温度仅在 y 方向呈梯度分布,即温度梯度呈准一维分布。

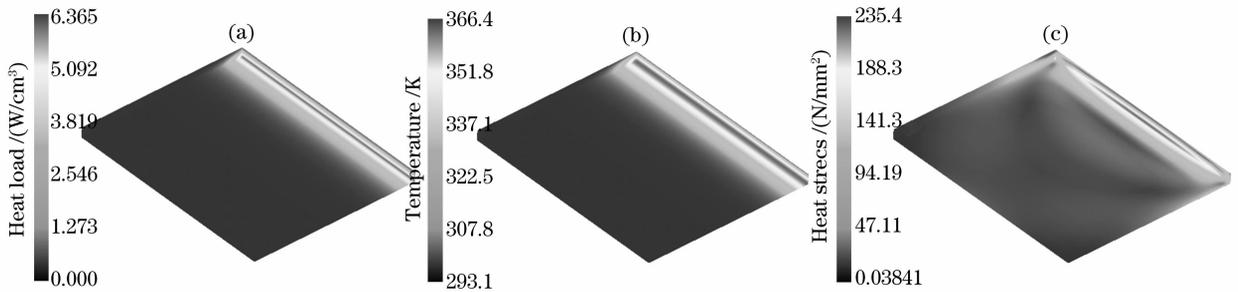


图 3 利用 LasCAD 有限元分析所得晶体内的热分布特性。(a) 热负载, (b) 温度分布, (c) 热应力分布

Fig. 3 Heat distribution in the crystal calculated by LasCAD using FEA method. (a) Heat load, (b) temperature distribution, (c) heat stress distribution

通过有限元分析和折射率拟合后, LasCAD 会自动生成热透镜,热透镜焦距 f 值可通过谐振腔的稳定性因子求得^[12]。改变抽运功率,重复进行有限元分析计算就可以得到热透镜焦距随抽运功率的变化曲线,见图 4。同时我们采用探测光束法实测了不同抽运功率下的热透镜焦距值,得到的结果一并列于图 4 中。比较发现,二者基本吻合。

部分端面抽运方式下,激光晶体在厚度方向上会产生温度梯度从而引起该方向上的热透镜。有热透镜效应的情况下,该方向上谐振腔可以等效为图 5 的形式。 f_T 即为热透镜焦距。

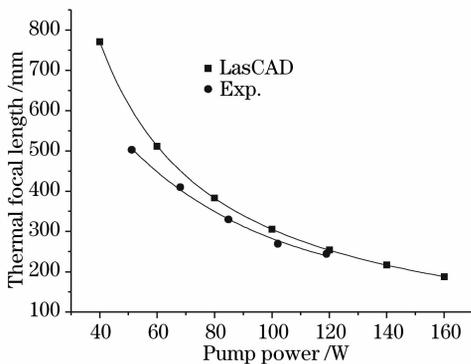


图 4 热透镜焦距随抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Focal length of thermal lens versus pump power

实现模式匹配,亦即使抽运光与振荡光在增益介质中的重叠程度最大化,这是优化固体激光器效率的一个关键因素。体现在系统中,就是要求抽运线在板条激光晶体垂直方向上的宽度与谐振腔在该处的基模光斑大小相近。

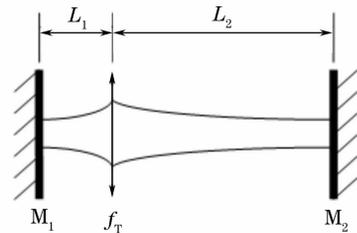


图 5 等效热透镜谐振腔

Fig. 5 Equivalent cavity with thermal lens
等效谐振腔的相关参量可以表示为^[13]

$$g_1 = 1 - \frac{L_2}{f_T}, \quad g_2 = 1 - \frac{L_1}{f_T} \quad (1)$$

腔内任意位置处的光斑半径为

$$\omega(z) = \omega_1 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 ω_1 表示腔镜 M_1 上的基模光斑半径

$$\omega_1^2 = \frac{\lambda L_0}{\pi} \left[\frac{g_2}{g_1(1 - g_1 g_2)} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

z 表示到腔镜 M_1 的距离, z_0 是共焦参量,可表示为

$$z_0 = \pi \omega_0^2 / \lambda. \quad (4)$$

利用(1)式~(4)式,可以得出抽运线位置处的基模光斑半径随热透镜焦距的变化曲线,如图 6 所示。三条曲线分别代表不同腔长情况下的变化趋势。

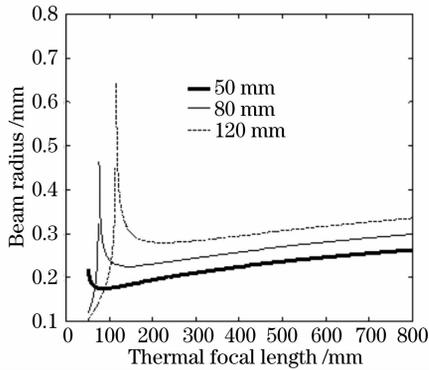


图 6 不同腔长下基模光斑半径随热透镜焦距的变化
Fig. 6 Beam radius versus focal length of thermal lens in different cavity lengths

当选定腔长为 80 mm(图 6 中位于中间的曲线),热透镜焦距小于 100 mm 时,基模光斑半径急剧变大,由于抽运线宽度不可变,这将导致模式匹配迅速变差,激光器超出稳定区,甚至会停止振荡。结合图 4,热透镜焦距 100 mm 对应的抽运功率约 300 W。当抽运功率小于 300 W 时,基模光斑半径变化缓慢,激光器可以稳定工作。其他腔长情况下有类似过程,只是随着腔长的增加,激光器热稳定工作范围将逐渐减小。

仍然选定腔长为 80 mm,基模光斑半径在 0.2~0.3 mm 之间变化,这就要求抽运线在激光晶体厚度方向上的宽度为 0.4~0.6 mm,以达到良好的模式匹配。总之,腔长在 50~120 mm 范围内,抽运功率小于 300 W 时,谐振腔都能保持在稳定状态,受热效应影响较小。同时,合理调整整形系统,可以确保稳腔方向上抽运光与基模振荡的模式匹配,有利于提高谐振腔效率。

4 实验结果

实验中采用 Nd:YVO₄ 晶体,掺杂原子数分数 0.5%,a 向切割,尺寸为 12 mm×10 mm×1 mm。12 mm×1 mm 的两个面作为通光面,镀 808 nm 和 1064 nm 的增透膜。其余四个面打毛,以抑制自激振荡。两个 12 mm×10 mm 的大面紧贴微通道水冷热沉,保证良好的冷却效果。混合腔的凹面柱镜曲率半径为 500 mm,凹面镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 全反膜,凸面柱镜曲率半径为 -350 mm,凸面镀 1064 nm 全反膜。在空腔情况下,腔长约

75 mm,加入激光晶体后,晶体导致焦点平移,此时腔长修正为 80 mm 左右。

我们进行了部分端面抽运的混合腔激光器的连续运转实验。实验中,需要精细调整整形系统中透镜组的位置,同时使激光晶体尽量靠近输入腔镜端,以实现良好的模式匹配。图 7 给出了激光器输出功率曲线。

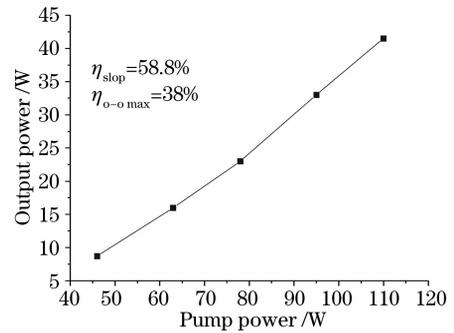


图 7 混合腔连续运转输出功率曲线

Fig. 7 Output power versus continuous-wave pump power of hybrid resonator

当抽运功率为 110 W 时,连续输出激光 41.5 W,光-光转换效率约 38%,斜效率达 58.8%。从图 7 可以看出,随着输出功率的增大,输出没有出现饱和的迹象。可以预计,随着抽运功率的提高,光-光转换效率将进一步提高。

利用 Spiricon 公司生产的 M²-200 型光束传输分析仪测量了混合腔输出激光束的 M² 因子。在抽运功率 110 W、激光输出功率 41.5 W 时,即最大输出功率的情况下,测得 M² 因子分别为 M_x²=1.59, M_y²=1.55。输出激光的远场光斑照片如图 8 所示。这说明获得了高光束质量、大功率的激光输出。激光器的非稳腔方向采用正支共焦非稳腔,具有自准直的特点,理论上,该方向(即 x 方向)光束质量很好,但是我们实际测得 x 和 y 两个方向的 M² 因子

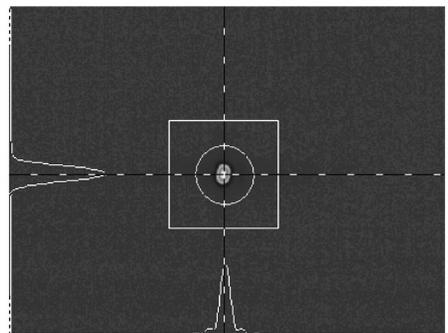


图 8 混合腔运转时输出激光的远场光斑照片
Fig. 8 Output beam facula in the far-field of hybrid resonator

基本接近, x 方向并没有明显比 y 方向好, 甚至略差。原因可能是由于共焦腔本身对腔长调整要求较高, 而且腔内插入晶体后需要做一定的腔长修正, 这些都使腔长很难调整到最佳位置。

5 结 论

利用 LasCAD 软件中的 FEA 模块, 分析了部分端面抽运的混合腔板条激光器中的热效应, 计算的热透镜焦距与实测结果基本相符。分析了热效应对模式匹配的影响, 分析结果对于优化激光器效率、改进谐振腔设计具有一定的参考意义。在分析的基础上, 进行了混合腔实验, 抽运功率为 110 W 时, 获得连续输出激光功率为 41.5 W, 光-光转换效率约 38%, 斜效率达 58.8%, M^2 因子为 $M_x^2 = 1.59$, $M_y^2 = 1.55$ 。

参 考 文 献

- 1 G. D. Baldwin, E. P. Riedel. Measurements of dynamic optical distortion in Nd-doped glass laser rods[J]. *J. Appl. Phys.*, 1967, **38**(7): 2726~2738
- 2 L. M. Osterink, J. D. Foster. Thermal effects and transverse mode control in a Nd:YAG laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **12**(4): 128~131
- 3 J. D. Foster, L. M. Osterink. Thermal effects in a Nd:YAG laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(9): 3656~3663
- 4 Cheng Xiaojin, Niu Jinfu, Xu Jianqiu. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 854~858
程小劲, 牛金富, 徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分布[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 854~858
- 5 Wang Ning, Lu Yutian. Partially end-pumped Nd:YVO₄ slab solid-state laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1319~1323
王 宁, 陆雨田. 部分端面抽运的 Nd:YVO₄ 板条固体激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1319~1323
- 6 Liu Jia, Fu Wenqiang, Hu Qiquan. Dynamic thermal aberration measurement of side-pumped slab laser medium[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(4): 511~514
刘 佳, 付文强, 胡企铨. 侧面抽运板条激光介质动态热畸变测量方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 511~514
- 7 A. Giesen, H. Hügel, A. Voss *et al.*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5): 365~372
- 8 William S. Martian, Joseph P. Chernoch. Multiple internal reflection face-pumped laser[P]. U. S. Patent, 3633126, 1972
- 9 Keming Du, Yan Liao, Peter Loosen. Nd:YAG slab laser end-pumped by laser-diode stacks and its beam shaping[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **140**: 53~56
- 10 Ning Wang, Peng Shi, Yutian Lu. The intensity distribution and thermal stability of InnoSlab laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4): 215~218
- 11 Wang Ning, Lu Yutian. Sensitivity to mirror tilt of off-axis hybrid resonator for InnoSlab laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1593~1598
王 宁, 陆雨田. 部分端面抽运板条激光器腔镜倾斜问题研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1593~1598
- 12 Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi, Wang Qingpu *et al.*. Study on thermal lens of Nd³⁺:YAG laser pumped by a laser diode[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **27**(9): 777~781
张行愚, 赵胜之, 王青圃 等. 激光二极管抽运的激光器热透镜效应的研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(9): 777~781
- 13 W. Koehnner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. First edition, Sen Wen transl., Beijing: Science Press, 2005. 184~185
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 第一版, 孙 文译, 北京: 科学出版社, 2005. 184~185