

文章编号: 0258-7025(2004)09-1033-03

激光二极管阵列抽运 Nd:YAG/LBO 大功率 蓝光激光器

高兰兰, 檀慧明

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要 报道了激光二极管阵列(LDA)端面抽运全固体腔内倍频大功率蓝光激光技术的研究。采用复合 Nd:YAG 晶体作为增益介质,并利用半导体致冷器(TEC)对激光晶体的温度进行精密控制。倍频晶体采用 I 类临界相位匹配方式切割的 LBO 晶体。谐振腔为 V 型结构。根据大功率抽运条件下激光晶体热透镜效应严重,且热透镜的焦距会随着抽运功率的增大逐渐变短的特点,计算出最大抽运功率条件下激光晶体的热透镜焦距,依据此数据来优化谐振腔结构,使激光器实现最佳模式匹配和倍频效率,得到高效蓝光激光输出。在可吸收抽运功率为 18.5 W 时,473 nm 蓝光激光输出功率为 1.38 W,抽运光-倍频光的光-光转换效率为 7.5%。

关键词 激光技术;激光二极管阵列;复合 Nd:YAG 晶体;LBO 晶体;大功率蓝光激光器

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Laser Diode Array Pumped Nd:YAG/LBO High Power Blue Laser

GAO Lan-lan, TAN Hui-ming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The laser diode array (LDA) end-pumped intracavity doubling frequency high power blue laser is reported. Gain medium is composited Nd:YAG crystal, the temperature of which is precisely controlled by thermoelectrically cooled (TEC). The doubling frequency crystal used in the experiment is a LBO (LiB_2O_3) crystal cut in phase-matching type I. The cavity is V type. This cavity is designed based on the facts that the thermal-lensing effect of the rod pumped by high pumped power is serious and the focal length of the thermal lens becomes shorter when the pumped power increases. According to the highest pumped power, the cavity is optimized so that the optimum mode-matched and high conversion efficiency are realized. When absorbed pumped power is 18.5 W, the blue laser output power at 473 nm is 1.38 W and the conversion efficiency of pumped light to doubling frequency light is 7.5%. The laser is simple and stable in structure.

Key words laser technology; laser diode array (LDA); composited Nd:YAG crystal; LBO crystal; high power blue laser

1 引 言

LD 抽运的全固体激光器具有结构紧凑、光-光转换效率高、稳定性好等优点,通过腔内倍频技术实现可见光波段激光输出的全固体激光器为激光显示、激光打印、光存储等方面提供了关键光源。激光

输出中心波长为 532 nm 的大、中、小型全固体绿光激光器已实现产业化生产^[1,2],而波长为 473 nm 的蓝光全固体激光技术由于受到其基频光 946 nm 的准三能级特性影响还处在早期研究阶段^[3]。Nd:YAG 晶体的 946 nm 发射谱线发生在能级 $^4F_{3/2}$ 和

收稿日期:2003-05-12;收到修改稿日期:2003-07-01

基金项目:国家 863 计划(2002AA311140)资助项目。

作者简介:高兰兰(1975—),女,河北磁县人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事 LD 抽运全固态蓝、绿光激光器的研究。E-mail:gl_l75@163.com

$^4I_{9/2}$ 之间,下能级 $^4I_{9/2}$ 上分布的粒子数占基态总粒子数的 0.74%,存在严重的再吸收损耗^[4,5]。因此,准三能级激光系统比四能级激光系统阈值高很多,由于再吸收损耗会随着晶体温度的升高,下能级粒子数分布的增加而增加,对于准三能级激光系统,在提高抽运功率、加大激光增益的同时必须考虑到激光晶体的散热问题,这一点对于大功率激光器尤为重要。如果散热装置的效率不够理想,激光器很可能在大功率抽运条件下出现淬灭现象。另外,由于 Nd:YAG 晶体还存在两条相对较强的发射谱线 1064 nm 和 1320 nm,因此,要实现 946 nm 谱线振荡必须抑制掉 1064 nm 和 1320 nm 谱线的振荡,这一点通常是通过增加谐振腔中腔镜对其的透射损耗来实现的。对于大功率蓝光激光器,国外已有文献报道,但多采用水冷系统控制激光晶体的温度^[6~8]。这种激光器结构复杂,体积庞大,造价高。本文采用复合 Nd:YAG 激光晶体作为增益介质,利用半导体致冷器(TEC)控制激光晶体的温度,采用 V 型谐振腔结构,并利用大功率抽运条件下激光晶体中的热透镜效应优化谐振腔结构,在可吸收抽运功率为 18.5 W 时,利用 LBO 腔内倍频,得到输出功率为 1.38 W 的 473 nm 激光,抽运光-倍频光的光-光转换效率达 7.5%。

2 激光器的整体设计

2.1 复合 Nd:YAG 晶体

采用新型的复合 Nd:YAG 晶体作为增益介质,在普通半导体致冷器 TEC 的控制下成功实现了对增益介质的致冷。使增益介质的温度恒久保持在 16℃。复合 Nd:YAG 晶体(如图 1 所示)是采用键合技术将不掺杂的 YAG 晶体键合在 Nd:YAG 晶体棒的两端。由于不掺杂部分对抽运光不产生任何吸收作用,因此复合晶体中掺杂部分所吸收的热可

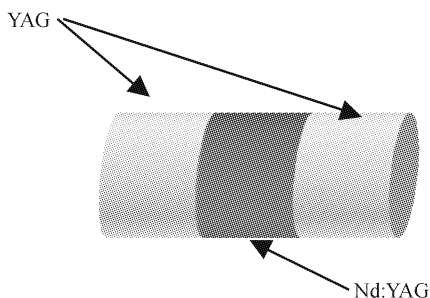


图1 复合 Nd:YAG 的结构示意图

Fig. 1 Schematic of the composite Nd:YAG crystal

以通过扩散结合传向不掺杂部分,再通过外部致冷系统散发掉。这在很大程度上减弱了增益介质的热致变形效应(如:温度梯度大,引力变形等)。有报道称,在物理条件相同的情况下(增益介质、几何尺寸、掺杂浓度、抽运功率等),激光器采用复合晶体的光-光转换效率比采用不复合晶体提高 3 倍^[9]。故利用复合晶体很好地解决了激光增益介质中的热负载问题,为大功率小体积蓝光激光器的发展提供了可能。

2.2 谐振腔的优化

大功率抽运条件下激光器的另一个特点是热透镜效应。尽管采用了复合 Nd:YAG 晶体,减轻了增益介质的热负载问题,但是对于大功率端面抽运条件下的圆柱形增益介质,热透镜效应不会完全消失。对于用近高斯光束抽运的边缘致冷的圆柱形增益介质,它的热透镜效应可以近似表示为一个薄透镜,其焦距 f_{th} 确定为^[10]

$$f_{th} = \frac{\pi \cdot K \cdot \omega_p^2}{p_p \cdot \xi \cdot (dn/dT)} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\alpha \cdot l)} \quad (1)$$

其中, p_p 为抽运功率, ω_p 为抽运光斑半径, K 为热传导系数, α 为对抽运光的吸收系数, ξ 为吸收的抽运光能量中转化为热能的系数, l 为增益介质的长度, dn/dT 为随温度变化的折射率变化量。从(1)式可以看出,对于不同的抽运功率,热透镜的焦距也不同,随着抽运功率的提高,热透镜的焦距逐渐变小,热透镜效应变得严重。在设计谐振腔时,首先确定了最大抽运功率,进而确定了热透镜的焦距,然后,再根据 ABCD 矩阵来设计谐振腔的参数,这样就能保证在最大抽运功率的条件下激光器的光-光转换效率达到最高。为了提高倍频光的转换效率,采用了 V 型折叠腔结构,把倍频晶体放在第二个分臂中,基频光两次通过倍频晶体,使倍频效率达到单向通过倍频晶体时的两倍。

采用 I 类临界相位匹配的 LBO 作为倍频晶体,主要是考虑 LBO 的抗损伤阈值高的特点。另外,虽然它的有效非线性系数低于 KN, BBO 等晶体,但是,根据连续光腔内倍频公式

$$p_{2\omega} = \eta'(p_\omega)^2 \quad (2)$$

通过调节 V 型腔中两个相对独立的光腰,使倍频晶体处的光腰足够小,即基频光的功率密度足够大,就可以弥补非线性系数小的缺点。

3 实验装置

实验装置如图 2 所示。采用德国 Limo 公司生

产的大功率激光二极管阵列,抽运光经光纤耦合后的出射光斑直径为 $400\ \mu\text{m}$,数值孔径为 0.22。抽运光经两个平凸镜 1:1地准直和聚焦后入射到复合 Nd:YAG 晶体的中心,平凸镜的焦距为 10 mm。复合 Nd:YAG 的中间为 $\phi 2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ 的 Nd:YAG 晶体,掺杂浓度为 0.9%,其两端分别是 $\phi 2\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$ YAG 晶体(图 1),复合 Nd:YAG 的两端镀 946 nm 和 473 nm 增透膜。平面镜 M_1 的入射端面镀 946 nm 高反和 808 nm 增透膜,转折镜 M_2 的凹面(曲率半径为 100 mm)镀 946 nm 高反和 1064 nm/473 nm 增透膜,平面镜 M_3 镀 473 nm 增透膜;后端镜 M_3 的凹面镀 946 nm/473 nm 高反膜。为了抑制 1064 nm 的振荡,要求 M_2 对 1064 nm 的透过率大于 50%。LBO 晶体($2\ \text{mm} \times 2\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$)的两端镀 946 nm 和 473 nm 增透膜, I 类相位匹配切割。

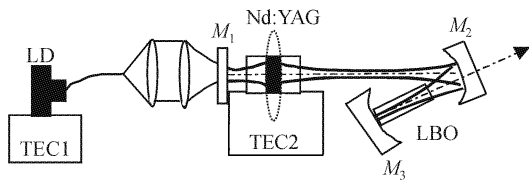


图 2 高效 473 nm 蓝光激光器装置示意图

Fig. 2 Schematic of the high efficiency 473 nm blue laser

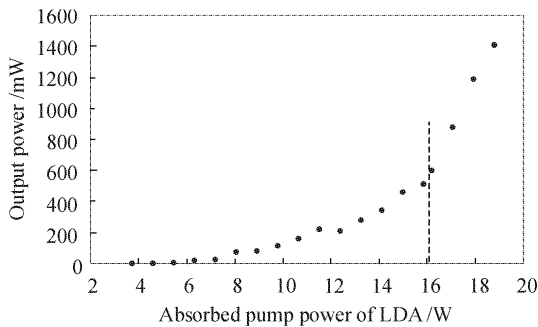


图 3 473 nm 蓝光输出功率与激光二极管阵列可吸收抽运功率的关系

Fig. 3 Output power of 473 nm blue laser versus the absorbed pump power of LDA

4 实验结果与分析

采用美国 Coherent 公司生产的 LM-3 型功率计测量不同抽运功率下蓝光的输出功率,如图 3 所示。从图中可以看出,激光器的可吸收抽运功率的阈值为 3.7 W。随着 LDA 抽运功率的增大,倍频光输出功率逐渐增强。当可吸收抽运功率接近最大值时,显然抽运光-倍频光的光-光转换效率高于可吸收抽运功率小于 16 W 时的转换效率。这主要是因

为在设计谐振腔时,增益介质中的等效热透镜的焦距是按照最大可吸收抽运功率情况下计算的,只有可吸收抽运功率达到最大值 18.5 W 时,谐振腔的各参数才达到最佳优化状态。此时,激光器的蓝光最大输出功率为 1.38 W,抽运光-倍频光的光-光转换效率为 7.5%。

5 结论

以上数据说明,在大功率端面抽运的蓝光激光器中,利用复合 Nd:YAG 晶体代替传统的 Nd:YAG 晶体,可以大大地改善增益介质的热透镜效应,在此基础上,采用结构简单的半导体致冷系统可以成功地实现对增益介质的温度控制,使其在工作过程中保持 16°C 恒温。通过等效热透镜焦距的应用,优化谐振腔的结构,采用 LBO 腔内倍频技术实现了 473 nm 的瓦级功率输出。

参考文献

- Wang Haibo, Ma Yan, Zhai Zehui *et al.*. 1.5 W cw frequency-stabilized and intracavity frequency-doubled ring laser end-pumped by diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2): 119~122
王海波,马艳,翟泽辉等. LD 端面抽运 1.5 W 单频稳频绿激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2): 119~122
- Feng Yan, Bi Yong, Zhang Hongbo *et al.*. 20 W diode dumped external frequency-doubled Nd:YAG green laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 469~471
冯衍,毕勇,张鸿博等. 20 W 腔外倍频全固态 Nd:YAG 绿激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 469~471
- Li Ruining, Yu Jianhua, Lai Yinjuan *et al.*. LD pumped Nd:YAG/LBO blue laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(supplement): 105~107
李瑞宁,余建华,来引娟等. LD 抽运的 Nd:YAG/LBO 内腔倍频全固态蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊): 105~107
- Norman P. Barnes, Brian M. Walsh, Ralph L. Hutcheson *et al.*. Pulsed $^4F_{3/2}$ to $^4I_{9/2}$ operation of Nd lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(12): 2169~2177
- Liu Weiren, Huo Yujing, He Shufang. Theory analysis for Nd^{3+} :YAG quasi-three-level laser system [J]. *Optical Technology*, 2002, **28**(4): 319~321
刘伟仁,霍玉晶,何淑芳. Nd^{3+} :YAG 的 946 nm 准三能级激光系统理论分析[J]. *光学技术*, 2002, **28**(4): 319~321
- P. Zeller, P. Peuser. Efficient, multiwatt, continuous-wave laser operation on the $^4F_{3/2}$ - $^4I_{9/2}$ transitions of Nd:YVO₄ and Nd:YAG [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 34~36
- M. Pierrou, F. Laurell. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO₄ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4): 205~207
- Du Geguo, Ruan Shuangchen, Zhu Qin *et al.*. LD-pumped Nd:YAG laser at 946 nm and frequency doubling [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11): 1392~1394
杜国同,阮双琛,朱勤等. 激光二极管泵浦 Nd:YAG 946 nm 激光器及倍频研究[J]. *光子学报*, 2001, **30**(11): 1392~1394
- M. Tsunekane, N. Taguchi, H. Inaba. Efficient 946-nm laser operation of a composite Nd:YAG rod with undoped ends [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5713~5719
- 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