

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

LD 端面泵浦的高输出单频 Nd : YVO₄ 绿光激光器

郝二娟^{1,2}, 檀慧明¹, 李 特^{1,2}, 苗杰光^{1,2}, 付喜宏^{1,2}, 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, 100039)

摘要:用激光二极管(LD)抽运 Nd : YVO₄ 晶体,采用四镜环形腔结构,腔内放置由法拉第旋光器, $\lambda/2$ 波片及布氏片组成的光学单向器,利用 KTP 内腔倍频技术,实现了高输出单频 Nd:YVO₄ 绿光激光器,及稳定的单频激光输出。在 9 W 的泵浦功率下,最大单频绿光输出为 1.1 W,光-光转化效率为 12.2%。在腔内插入 Cr⁴⁺ : YAG 晶体,又获得了脉宽为 100 ns,重复频率为 21 kHz 的单纵模被动调 Q 激光输出。

关键词: Nd : YVO₄ 激光器; 绿光激光器; 单频激光器; 环形腔被动调 Q

中图分类号: TN 248.1 文献标识码: A

High output and single-frequency ring Nd : YVO₄ laser end-pumped by diode laser

HAO Er-juan^{1,2}, TAN Hui-ming¹, LI Te^{1,2}, MIAO Jie-guang^{1,2}, FU Xi-hong^{1,2}, QIAN Long-sheng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130022, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: A frequency-stability and intracavity frequency-doubled ring Nd : YVO₄/KTP laser end-pumped by a laser diode was designed and experimentally demonstrated. The laser was single-frequency operated by using a TGG, a Brewster polarizer, and a half-wave plate acted as optical diode in the cavity. Under the incident power of 9 W, the maximum green laser output is 1.1 W, and conversion efficiency from light to light is 12.2%. Also, a passively Q-switched single-frequency laser in laser pulse duration of 100 ns and repetition rate of 21 kHz was achieved in a ring cavity by inserting a piece of Cr⁴⁺ : YAG as an intracavity laser pulse saturable absorber.

Key words: Nd:YVO₄; greelight laser; ring cavity laser; single-frequency; passively Q-switched

1 引言

由于 LD 泵浦的全固体激光器具有效率高、

结构紧凑、性能稳定、寿命长等优点,因而引起人们的广泛重视,尤其是全固化单频绿光激光器,已广泛地应用于光谱学、相干通讯、激光雷达、引力波探测、二次谐波产生、参量振荡,光学数据存储

等领域^[1-3]。近几年,国内外学者在理论和实验上对 LD 泵浦的全固体单频激光器进行了大量的研究,提出了诸如标准具、1/4 波片^[4]、短程吸收法、双折射滤光片技术,行波腔法等实现单频输出的方案。这些方案各有局限性。前两种方案由于插入元件会引起较大的损耗,无法获得高效率的单频输出^[5];短程吸收法则要求激光工作物质很短,难以得到较高的泵浦吸收效率^[4];有关实验已经证实双折射滤光片技术也不能获得较高功率的单频绿激光输出^[6],只有采用环形谐振腔,使激光器单向运转,消除空间烧孔效应,才能实现精密选模,达到理想的频率稳定性。近年来,国内外学者对此展开了大量研究^[7-8]。本文采用环形腔法,内加拉第旋转器, $\lambda/2$ 波片和布氏片作为光学单向器,实现了 LD 泵浦的全固体绿激光器低阈值,大功率和高效率的单频运转。在插入可饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体时,获得了脉宽为 100 ns,重复频率为 21 kHz 的单纵模被动调 Q 激光输出。

2 实验装置及腔形设计

实验采用光纤耦合的激光二极管作为泵浦源,25℃下输出中心波长为 806.6 nm,经准直聚焦系统(传输耦合效率约为 80%),会聚成半径为 200 μm 的泵浦光斑,注入到 Nd:YVO₄ 工作物质中。激光二极管泵浦的 Nd:YVO₄ 单频激光器采用的环形腔结构如图 1 所示。

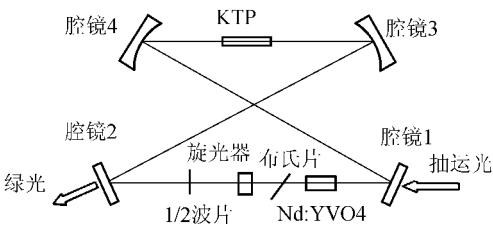


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Setup of the experiment

Nd:YVO₄ 晶体采用 a 轴切割,掺杂浓度为 0.5%(原子数分数),尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm,两端面均镀有 808 nm 和 1 064 nm 的增透膜。采用 KTP 腔内倍频方式,晶体尺寸为 2 mm×2 mm×5 mm,以 II 类角度匹配方式切割,两个通光面均镀 532 nm 和 1 064 nm 的增透膜。平面

镜 M_1 为输入耦合镜,靠近泵浦源的一端镀 808 nm 的增透膜,靠近激光晶体的一端镀对 1 064 nm 高反,对 808 nm 增透的膜, $R_{1\ 064\ \text{nm}} > 99.5\%$, $R_{808\ \text{nm}} < 5\%$; M_3, M_4 为凹面镜,凹面镀 1064/532 nm 高反双色膜, $R_{1\ 064\ \text{nm}} > 99.5\%$, $R_{532\ \text{nm}} > 99.5\%$,曲率半径为 100 mm;平面镜 M_2 为输出耦合镜,对 532 nm 高透,对 1 064 nm 高反, $R_{1\ 064\ \text{nm}} > 99.5\%$, $R_{532\ \text{nm}} < 5\%$ 。腔内插入由 $\lambda/2$ 波片, BP 片, TGG 晶体(插入一个内径为 $\varphi 6$ mm,外径 $\varphi 34$ mm 的磁场中,可以使激光偏振方向转动 8~9°)组成的单向器中,使激光器单向运转。TGG 和 $\lambda/2$ 波片的前后表面均镀有 1 064 nm 的增透膜。

在中高泵浦功率情况下, Nd:YVO₄ 的热透镜效应已很明显,因此,在设计腔型前,有必要对激光晶体的热透镜焦距进行估算。在此,本文将受热的激光晶体等效为一个薄透镜,下式为端面泵浦情况下热透镜焦距公式^[9]:

$$f_{th} = \frac{\pi \times K \times \omega_p^2}{P_p \times \xi \times (dn/dt)} \times \frac{1}{1 - \exp(-\alpha \times l)}$$

其中, ω_p 是泵浦光束在激光晶体中的光腰半径,聚焦后光斑半径为 200 μm ;激光晶体的热传导系数 $K = 0.054\ \text{W/cmK}$;激光晶体对泵浦光的吸收系数 $\alpha = 14.8\ \text{cm}^{-1}$;吸收的泵浦能量中转化为热的比率 $\xi = 0.25$; P_p 是注入到激光晶体的泵浦功率,为 9 W; l 是激光晶体的长度,为 5 mm;激光晶体随温度变化的折射率变化量 $dn/dT = (4.7 + 0.6) \times 10^{-6}/\text{K}$ 。由上述参数计算热透镜焦距 $f_i \approx 130\ \text{mm}$ 。

为了提高对泵浦光的利用率及倍频效率,必须对谐振腔进行合理的设计。以晶体中心为参考点等价薄透镜序列如图 2 所示。

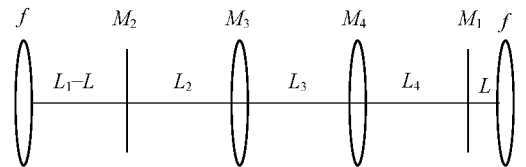


图 2 等价的薄透镜序列

Fig. 2 Equivalent thin lens series.

图中, f 为激光晶体的等效热透镜,在此,假设热

透镜中心在激光晶体的中心, 设 M_1, M_2 之间的距离为 L_1 ; M_2, M_3 之间的距离为 L_2 ; M_3, M_4 之间的距离为 L_3 ; M_4, M_1 之间的距离为 L_4 ; M_1 与激光晶体中心的距离为 $L, L=20$ mm。考虑到伴随热透镜所产生的高阶球差引起的附加衍射损耗, 第一分臂的基频光腰应略小于泵浦光聚焦光斑, 这样有利于获得 TEM₀₀ 模输出^[10]。同时, L_3 的大小对腔的稳定性 and L_3 上的光腰的大小影响较大。在稳区内计算出腔镜 M_3, M_4 的曲率半径及 L_3 与 L_3 上的光腰 ω_{034} 之间的关系如图 3 所示。

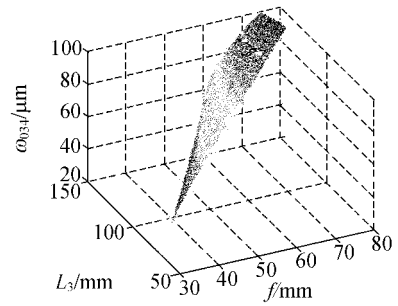


图 3 L_3 和平凹镜的焦距与光腰 ω_{034} 的关系

Fig. 3 Relationship between L_3, ω_{034} and the focus of the plano-concave lens

环形腔的传输矩阵为:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_4+L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_4 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & L_1+L_2-L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$$

式中 f_3, f_4 为镜 M_3, M_4 的焦距。这里取总腔长约 530 mm, $L_1=180$ mm, $L_3=119$ mm, Nd:YVO₄ 晶体内的光斑半径为^[11] $\omega_{034} = \left[\frac{2\lambda B}{\pi} \sqrt{4-(A+D)^2} \right]^{1/2} = 329 \mu\text{m}$, 约等于 $0.8 \times 400 \mu\text{m}$, 实现了基频光与泵浦光的良好匹配, 可以有效地利用泵浦能量。

3 实验结果及分析

实验装置如图 1 所示, 将激光晶体 Nd:YVO₄ 用铝箔包好置于热沉中, 通过温度调节, 使泵浦光中心波长与 Nd:YVO₄ 的中心吸收波长 808.9 nm 重合, 在泵浦光功率 9 W 的情况下, 获得了 1.1 W 的绿光连续单纵模输出, 光-光转化效率为 12.2%, 如能进一步控制好 Nd:YVO₄ 的温度, 转化效率会进一步得到提高。因为在设计腔形的时候考虑了激光晶体的热透镜效应, 所以设计的腔形的最佳工作点在注入功率为 9 W 时。若增大注入功率, Nd:YVO₄ 的热焦距会发生改变, 输出变得不稳定, 要得到稳定的激光输出, 需要重新设计腔形。在注入功率为 9 W 时, 用法布里-珀罗干涉仪观察到的纵模情况如图 4 所示。

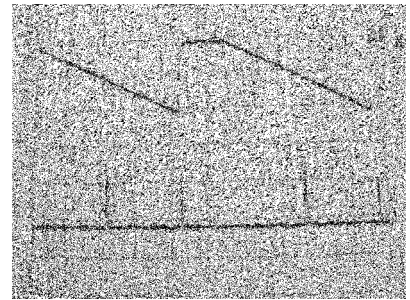


图 4 法布里-珀罗干涉仪观察到的纵模情况

Fig. 4 Transmission from scanned F-P

向同性晶体, 所以对腔内的激光偏振态没有影响。实验中所用的 Cr⁴⁺:YAG 晶体的初始透过率为 70%, 并且两边均镀 1 064 nm 的增透膜。随着注入功率的增加, 重复频率和平均输出功率均增加, 脉宽变化较小; 当注入功率一定时, 脉宽随着腔长的改变有较大的变化。在 9 W 的注入功率下, 获得了脉宽为 100 ns, 重复频率为 21 kHz 的单纵模

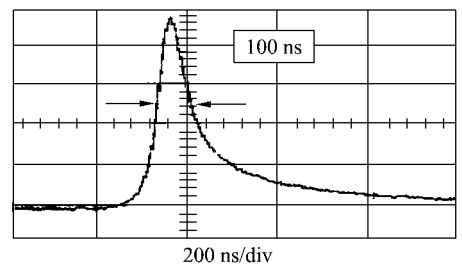


图 5 被动调 Q 的时间波形图

Fig. 5 Scilloscope trace of the Q-switched pulse

在该环形腔中插入可饱和吸收晶体, 同时还可以得到单纵模的被动调 Q 激光输出。选择了 Cr⁴⁺:YAG 作为被动调 Q 晶体, 由于 YAG 是各

被动调 Q 激光输出,峰值功率为 571.4 W。如果将未镀膜 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体以布氏角放入腔中,则该晶体在作可饱和吸收体的同时,又起到了选模的作用,可以进一步简化腔型结构。图 5,6 为激光输出的时间波形图。

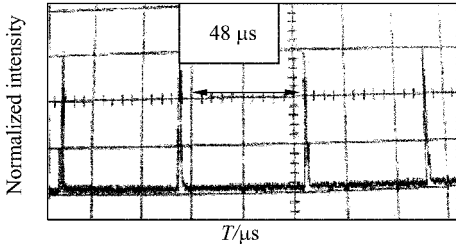


图 6 脉冲的重复频率为 21 kHz

Fig. 6 Laser pulse repetition rate (21 kHz)

4 结 论

本文利用行波腔结构,获得了高功率的单纵模激光输出,在 9 W 的泵浦功率下获得了 1.1 W 的 532 nm 的绿光输出,光-光转化效率为 12.2%,改善激光晶体的温控,转化效率有望得到进一步的提高。在插入被动调 Q 晶体 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 时,又获得了脉宽为 100 ns,重复频率为 21 kHz 的单纵模被动调 Q 激光输出。

参考文献:

- [1] 吕彦飞,檀慧明,钱龙生. 全固态 589 nm 复合腔连续波和频激光器[J]. 光学精密工程,2005,13(3):260-264.
LU Y F, TAN H M, QIAN L SH. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all intra-cavity sum-frequency laser at 589 nm. [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(3): 260-264. (in Chinese)
- [2] 张靖,张宽收,王润林,等. 全固化单频 Nd:YVO₄ 环形激光器[J]. 中国激光,2000,A27(8):694-696.
ZHANG J, ZHANG K SH, WANG R L, et al. All-solid-state Nd:YVO₄ ring Laser of single-frequency operation [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2000; A 27(8):694-696. (In Chinese)
- [3] 毕勇,孙志培,李瑞宁,等. 高平均功率腔内和频蓝光 Nd:YAG 激光器[J]. 光学精密工程,2005,13(1):16-21.
BI Y, SUN ZH P, LI R N, et al. High power blue Nd:YAG laser by intracavity summing frequency[J]. *Opt. and Laser Tech.*, 2005, 13(1):15-25.
- [4] WU E, PAN H, ZHANG S, et al. High power single-longitudinal-mode operation in a twisted-mode-cavity laser with a c-cut Nd:GdVO₄ crystal[J]. *Appl. Phys.* 2005, :1-4.
- [5] 郑义,钱卫红,姚建铨. LD 泵浦的内腔倍频激光器单频运转的理论研究[J]. 中国激光,1997, 24(8):673-678.
ZHENG Y, QIAN W H, YAO J Q. Theoretical study on the single-frequency operation of diode-pumped intracavity frequency-doubled laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997; 24(8):673-678. (in Chinese)
- [6] NAGAI H, KUME M. Low-noise operation of a diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG laser using a Brewster plate [J]. *IEEE J. of Quant. Electro.*, 1992, 28(4):1164-1168.
- [7] HARDMAN P J, CLARKSON W A, HANNA D D. Hanna. High-power diode-bar-pumped intracavity-frequency-doubled Nd:YLF laser[J]. *Optics Communications*, 1998, 156:49-52.
- [8] 万顺平,孙利群,田芊. 一种 LD 泵浦双向输出固体环形激光器[J]. 光学技术,2005,31(1):44-47.
WAN SH P, SUN L Q, TIAN Q. LD-pumped solid-state ring laser with bidirectional outputs[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(1):44-47.
- [9] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers[J]. *Phys. Lett.*, 1990, 56(19):1831-1833.
- [10] 刘均海,吕军华,卢建仁,等. 高功率端面抽运 Nd:YVO₄ 固体激光器模式匹配的研究. [J]. 光学学报,2000,20(2):186-189.
LIU J H, LU J H, LU J R, et al. Mode matching in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO₄ solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(2): 186-189.
- [11] 吕百达. 激光光学[M]. 第三版,高等教育出版社,2002.
LU B D. *Laser Optics*[M]. (the third edition) High Education Press, 2002.