

文章编号: 0258-7025(2009)07-1723-04

# 全固态复合式内腔和频 500.8 nm 连续波青光激光器

金光勇 于永吉 王超 王奕博 沙鹏 梁柱

(长春理工大学理学院激光技术研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要** 报道了一台全固态连续波 500.8 nm 青光激光器。实验中采用复合式谐振腔结构,用两个激光二极管阵列(LDA)经过光纤耦合分别单独端面抽运两块 Nd:YAG 晶体,青色激光由两块 Nd:YAG 晶体的 1064 nm 和 946 nm 谱线非线性和频产生。在两个子谐振腔的交叠区域利用 LBO I 类临界相位匹配进行腔内和频,通过谐振腔优化设计,实现了腔内两个波长较好的模式与增益匹配。当注入到两块 Nd:YAG 晶体的抽运功率分别为 12 W 和 8 W 时,获得 223 mW 的 TEM<sub>00</sub> 模连续波 500.8 nm 青色激光输出,水平和垂直方向的光束质量  $M^2$  因子约为 1.2。实验结果表明,采用复合式腔结构和和频是获取高功率 500.8 nm 青色激光输出的有效方法。

**关键词** 激光器; 青光激光器; 和频; 复合腔; 激光二极管抽运

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1723

## All-Solid-State Continuous-Wave Doubly Resonant All-Intracavity Sum-Frequency Mixing Cyan Laser at 500.8 nm

Jin Guangyong Yu Yongji Wang Chao Wang Yibo Sha Peng Liang Zhu

(Institute of Laser Technology, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** An all solid-state continuous-wave cyan laser at 500.8 nm is presented. By using a new resonator for doubly resonant, two Nd:YAG are pumped by two laser diode arrays (LDA) coupled by optical fibers, respectively. In the two cavities, wavelengths of 1064 nm from one Nd:YAG and 946 nm from the other are chosen to be mixed into 500.8-nm cyan laser. Through proper design of the cavity, the optimum matching of modes and gains for the two wavelengths can be obtained. In the overlapping of the cavities, sum-frequency mixing is generated with a type I critical phase matching LBO crystal. The cyan laser output of 223 mW at 500.8 nm with TEM<sub>00</sub> mode is obtained at the incident pump power of 12 W for one Nd:YAG crystal and 8 W for the other. The beam quality  $M^2$  value is about 1.2 in both horizontal and vertical directions at the maximum output power. The experimental results show that the intracavity sum-frequency mixing by doubly resonant is an effective method for high power 500.8-nm cyan laser.

**Key words** lasers; cyan laser; sum-frequency; double cavity; laser diode pumped

## 1 引 言

近年来,通过对激光二极管(LD)抽运的掺钕离子增益介质腔内倍频来获取蓝、绿激光输出的技术已经相当成熟<sup>[1-6]</sup>,并且在很多领域得到了广泛的应用。但波长介于蓝光与绿光波段之间的青色激光,由于缺少相应的基频光输出,还不能通过倍频的方式获得。而处于这一波段的光源在医疗、生物以及显示技术等有着特殊的用途,因此对这一波

段激光器的研究越来越受到重视。由于掺钕离子的增益介质含有多条跃迁谱线,通过谐振腔参量的控制可以获得两条不同波长的激光谱线振荡,这时利用非线性晶体在腔内进行和频,可以获得与激光发射谱线不同的波长输出,而腔内和频这种方法恰好能够产生该波段的激光。

自 20 世纪 90 年代开始,一些研究小组陆续对各种掺钕离子增益介质的双波长振荡和输出可能性

收稿日期: 2008-11-02; 收到修改稿日期: 2008-11-21

基金项目: 吉林省杰出青年基金(20060121)资助课题。

作者简介: 金光勇(1971—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光物理与新型激光器、激光毁伤机制及非线性光学频率变换技术等方面的研究。E-mail: jgycom@163.com

进行了研究<sup>[7~11]</sup>,并通过双波长频率变换获得了新的波长激光输出。其中亓岩等<sup>[12]</sup>利用激光二极管端面抽运 Nd:YAG 实现双波长运转,利用腔内和频获得了 15 mW 的 500.8 nm 青色激光输出。但这些报道大多都是讨论单个晶体的两条谱线振荡,而单个晶体两条谱线振荡时均消耗上能级的粒子数,同时两条谱线的发射截面积相差较大,进行非线性和频过程中光子数很难达到理想匹配,因此和频效率较低,并且双波长的模式竞争势必会影响输出光束的质量。

本文报道了一种采用复合式的谐振腔结构,通过谐振腔优化设计,腔内和频实现 500.8 nm 青色激光输出的方法。利用这种结构,以两个 Nd:YAG 晶体为增益介质,使 1064 nm 和 946 nm 基频光振荡分别获得独立增益,可以通过调节两激光二极管阵列(LDA)的电流使两个子腔中的基频光增益达到相近,在两个子腔的交叠区域利用非线性晶体 LBO I 类临界相位匹配进行腔内和频,获得了 223 mW 的 500.8 nm 青色激光输出。

## 2 实验方案

500.8 nm 连续波青光激光器实验装置如图 1 所示,采用的是复合式谐振腔结构。抽运源分别为最大输出功率 12 W 和 8 W 的光纤耦合激光二极管阵列,通过温度调节,使抽运光中心波长与 Nd:YAG 的中心吸收波长重合,经过准直聚焦系统(传输耦合效率约为 80%)会聚成半径为 200  $\mu\text{m}$  的抽运光斑注入到 Nd:YAG 晶体中。Nd:YAG 晶体 1 与 Nd:YAG 晶体 2 均采用钕离子掺杂原子数分数为 1.0%,尺寸为  $\phi 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,其中 Nd:YAG 晶体 1 左端面镀 946 nm 高反膜( $R > 99.9\%$ ),808 nm 增透膜( $T > 95\%$ )作为一个腔镜,右端面镀 946 nm 增透膜;Nd:YAG 晶体 2 右端面镀 1064 nm 高反膜( $R > 99.9\%$ ),808 nm 增透膜( $T > 95\%$ )作为另一个腔镜,左端面镀 1064 nm 增透膜。在两晶体的侧面裹上一层铝箔安装在紫铜热沉上,通过半导体制冷器(TEC)进行温度控制。平面合束镜  $M_1$  由 1 mm 厚的 K9 玻璃经过双面镀膜制成,左端面镀  $15^\circ$  入射时 946 nm 高反膜( $R > 99.9\%$ ),1064 nm 减反膜( $T > 99\%$ ),右端面镀  $15^\circ$  入射时 1064 nm 减反膜( $T > 99\%$ )。曲率半径为 50 mm 的平凹镜  $M_2$ ,凹面镀 946 nm/1064 nm 高反膜( $R > 99.9\%$ ),作为折叠反射镜。曲率半径为 200 mm 的平凹镜  $M_3$ ,凹面镀 946 nm/1064 nm 高反膜( $R > 99.9\%$ ),500.8 nm 增透膜( $T > 95\%$ ),平面镀

500.8 nm 增透膜( $T > 95\%$ ),作为输出镜。 $M_2$  与  $M_3$  构成的折叠臂中折叠反射镜  $M_2$  的折叠角应尽量小于  $10^\circ$ ,以减小色散的影响。在整个装置中,946 nm 子腔由 Nd:YAG 晶体 1,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  组成,1064 nm 子腔由 Nd:YAG 晶体 2,  $M_2$ ,  $M_3$  组成,在两个子腔共用的谐振腔  $M_2$  与  $M_3$  之间束腰处加入非线性晶体 LBO 进行腔内和频。非线性和频晶体 LBO 采用 I 类临界相位匹配,尺寸为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,由 SNLO 软件<sup>[13]</sup>计算,LBO 晶体沿  $x$ - $y$  轴的切割角度为  $\theta = 90^\circ$ ,  $\Phi = 15.1^\circ$ ,由 1064 nm(o) 和 946 nm(o) 和频产生 500.8 nm(e),LBO 晶体的有效非线性系数  $d_{\text{eff}} = 0.826 \text{ pm/V}$ ,走离角  $\theta_{\text{walk-off}} = 8.97 \text{ mrad}$ ,LBO 的两个端面镀 1064 nm/946 nm/500.8 nm 三色增透膜。

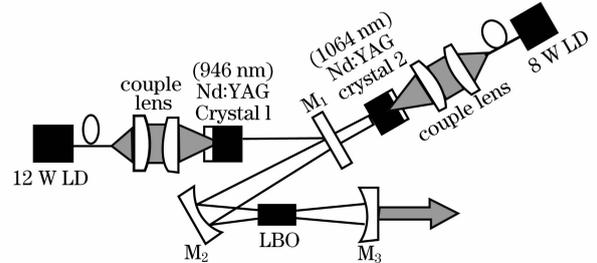


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

由于在高功率激光二极管阵列端面抽运增益介质中,增益介质的热透镜效应是不能获得高效率、高功率输出的一个重要因素,因此在较大抽运功率变化范围内,通过合理地选择腔长以得到热不灵敏腔,是获得稳定高功率激光输出的必要条件。由端面抽运条件下的稳态热传导方程<sup>[14]</sup>

$$\frac{1}{f_{\text{th}}} = \frac{\xi P_{\text{abs}}}{4\pi K_c \omega_p^2} \left[ \frac{dn}{dT} + (n_0 - 1)\alpha \right], \quad (1)$$

其中  $f_{\text{th}}$  为热透镜焦距,  $\xi$  为热负荷比,  $P_{\text{abs}}$  为吸收的抽运功率,  $K_c$  为热导率,  $\omega_p$  为平均抽运光斑半径,  $n_0$  为环境温度下的折射率,  $dn/dT$  为折射率温度系数,  $\alpha$  为热膨胀系数。实验中所用的 Nd:YAG 有关参数:  $\xi = 0.38$ ,  $K_c = 10.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $\omega_p = 200 \mu\text{m}$ ,  $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,  $n_0 = 1.82$ ,  $\alpha = 7.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。经过计算,在 12 W 和 8 W 的最高抽运功率下 Nd:YAG 晶体 1 和 Nd:YAG 晶体 2 的热透镜焦距分别约为 106 mm 和 158 mm。将两块晶体分别等效为焦距为  $f_1$  和  $f_2$  的两个薄透镜,则包含热透镜的等效谐振腔如图 2 所示。根据所用实验器件的具体参数,选取  $L_1 = 20 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 10 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 50 \text{ mm}$ , 利用 ABCD 光束传输矩阵及 G 参数等价腔分析法<sup>[15]</sup>, 分别以薄透镜  $f_1$  和  $f_2$  为参考面,有

$$\mathbf{M}_1 = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 + L_3 - 3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \frac{3}{1.82} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$g_1 = a - b; g_2 = d - \frac{b}{R_3}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{pmatrix} e & f \\ g & h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_2 + L_3 - 3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \frac{3}{1.82} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$g_3 = e - f; g_4 = h - \frac{f}{R_3}. \quad (5)$$

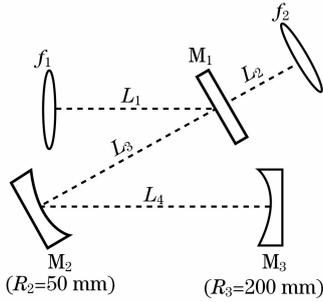


图 2 包含热透镜的等效谐振腔

Fig. 2 Equivalent resonator corresponding to thermal lens

由谐振腔稳区条件  $0 < g_1 \cdot g_2 < 1, 0 < g_3 \cdot g_4 < 1$ , 通过 MATLAB 软件计算机模拟得到如图 3 所示的复合腔稳区图。图中横轴坐标为热透镜焦距长度, 纵坐标为折叠臂  $L_4$  的长度。由图 3 可知, 随着热透镜焦距的变化, 谐振腔会经过两个稳区, 由于在最高抽运功率下 Nd:YAG 晶体 1 和 Nd:YAG 晶体 2 的热透镜焦距分别为 106 mm 和 158 mm, 所以折叠臂  $L_4$  的长度在 23~40 mm 之间时整个复合腔即可处于热不灵敏区。综合 1064 nm 与 946 nm 基频光在折叠臂中的束腰半径考虑, 选择折叠臂  $L_4$  长度为 30 mm。通过计算得 1064 nm 和 946 nm 基频光在折叠臂束腰处(即和频晶体位置)光束半径分别为 91  $\mu\text{m}$  和 87  $\mu\text{m}$ , 基本近似相等, 实现了两基频光很好的交叠。

由于两块 Nd:YAG 晶体分别由两个激光二极管阵列抽运, 并且由于 Nd:YAG 的 946 nm 谱线相对于 1064 nm 谱线起振阈值过高, 所以 Nd:YAG 晶体 1 的抽运功率高于 Nd:YAG 晶体 2 的抽运功率。

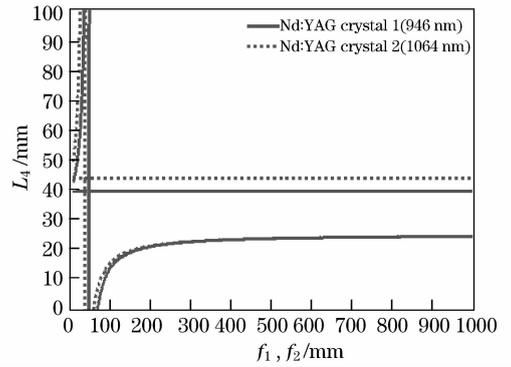


图 3 复合腔稳区图

Fig. 3 Stable range of double cavity

通过分别调节两组激光二极管阵列的电流, 可使腔内两基频光子数密度之比达到 1:1, 实现增益匹配, 从而提高和频转换效率。

### 3 实验结果

采用 LBO I 类临界相位匹配进行腔内和频, 测量了 500.8 nm 青色激光输出功率随抽运功率的变化, 如图 4 所示。曲线 1 是当注入到 Nd:YAG 晶体 1 的抽运功率为 12 W 时, 500.8 nm 青色激光输出功率随注入到 Nd:YAG 晶体 2 抽运功率的变化关系, 曲线 2 是当注入到 Nd:YAG 晶体 2 的抽运功率为 8 W 时, 500.8 nm 青色激光输出功率随注入到 Nd:YAG 晶体 1 抽运功率的变化关系。由图 4 可以看出激光器的阈值功率约为 2 W, 当注入到 Nd:YAG 晶体 1 和 Nd:YAG 晶体 2 的抽运功率分别为 12 W 和 8 W 时, 获得 500.8 nm 青色激光最大输出功率为 223 mW, 并且可以看出当注入到 Nd:YAG 晶体 1 的抽运功率为 12 W 时, Nd:YAG 晶体 2 在抽运功率达到 8 W 出现饱和现象, 这说明 1064 nm 的光功率密度已经大于 946 nm 的光功率密度, 如果想要获得更高的输出功率, 必须进一步提高 946 nm 的光功率密度, 这就需要提高注入到 Nd:YAG 晶体 1 的抽运功率。

在 500.8 nm 青色激光输出功率为 223 mW 时所拍摄的激光远场光斑照片如图 5 所示, 激光输出模式为 TEM<sub>00</sub> 模。采用 Spiricon 公司的光束质量分析仪测量 500.8 nm 青色激光输出远场光束质量如图 6 所示, 在水平和垂直方向光束质量  $M^2$  因子约为 1.2。

### 4 结 论

以两块 Nd:YAG 晶体作为增益介质, 利用非线性晶体 LBO I 类临界相位匹配, 通过复合式谐振腔内和频实现了 550.8 nm 连续波青色激光输出。当两

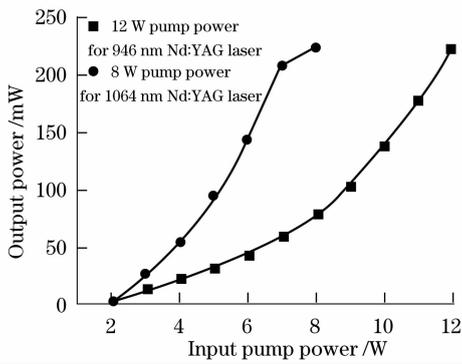


图 4 500.8 nm 青色激光输出功率随注入抽运光功率的变化关系

Fig. 4 Output power at 500.8 nm versus input pump power

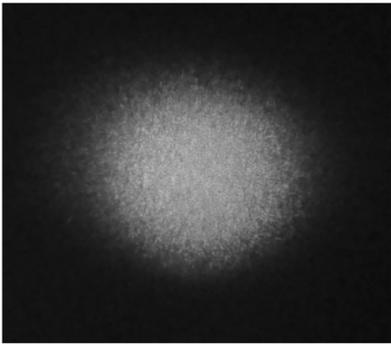


图 5 青色激光远场光斑

Fig. 5 Far field cyan laser spots

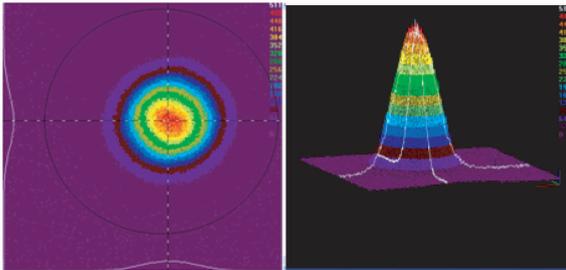


图 6 500.8 nm 青色激光光束质量

Fig. 6 Beam quality of 500.8-nm cyan laser

块 Nd:YAG 晶体抽运功率分别为 12 W 和 8 W 时, 获得 223 mW, 500.8 nm 激光输出, 激光输出光束质量好。实验结果表明, 与利用单块增益介质双波长振荡腔内和频实现 500.8 nm 连续波青色激光输出的技术方案相比, 采用复合式腔结构和频是获取高功率 500.8 nm 青色激光输出的有效方法。

### 参 考 文 献

1 J. T. Bai, G. F. Chen. Continuous-wave diode-laser end pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP high-power solid-state green laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**: 333~336

2 He Jingliang, Hou Wei, Zhang Hengli *et al.*. 8.8 W green laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(6): 481~484  
何京良, 侯 玮, 张恒利 等. LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(6): 481~484

3 Xu Degang, Yao Jianquan, Zhou Rui *et al.*. 104 W all-solid-state 532 nm Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9): 864~864  
徐德刚, 姚建铨, 周 睿 等. 104 W 全固态 532 nm Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9): 864~864

4 Zheng Quan, Zhao Ling, Shao Yonghong *et al.*. Cr:YAG passively Q-switched all-solid-state blue laser at 473 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 673~676  
郑 权, 赵 岭, 邵永红 等. Cr:YAG 被动调 Q 全固态 473 nm 蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 673~676

5 Wang Junying, Zheng Quan, Xue Qianghua *et al.*. 1.1 W CW output all-solid-state blue laser at 473 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 523~526  
王军营, 郑 权, 薛庆华 等. 1.1 W 连续输出 473 nm 全固态蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 523~526

6 Yanfei Lu, Xihe Zhang, Zhihai Yao *et al.*. 6.2 W deep blue light generation by intracavity frequency-doubled Nd:GdVO<sub>4</sub> using BiBO[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 407~408

7 V. E. Nadocheev, O. E. Nanil. Two-wave emission from a CW solid-state Nd<sup>3+</sup>:YAG laser[J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1989, **19**(4): 444~446

8 H. Y. Shen, R. R. Zeng, Y. P. Zhou. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in neodymium host crystal at transitions from <sup>4</sup>F<sub>3/2-4</sub>I<sub>11/2</sub> and <sup>4</sup>F<sub>3/2-4</sub>I<sub>13/2</sub>[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20): 1937~1938

9 Y. F. Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(4): 475~478

10 Pingxue Li, Dehua Li, Chunyong Li *et al.*. Simultaneous dual-wavelength continuous wave laser operation at 1.064 μm and 946 nm in Nd:YAG and their frequency doubling[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **235**(1-3): 169~174

11 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. Laser diode array pumped Nd:YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 438~442  
吕彦飞, 檀慧明, 钱龙生. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG 腔内双波长运转 589 nm 和频激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 438~442

12 Qi Yan, Bu Yikun, Zheng Quan *et al.*. LD pumped intracavity sum-frequency CW 500.8 nm Nd:YAG/LBO laser[J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(6): 436~438  
齐 岩, 卜轶坤, 郑 权 等. LD 抽运腔内和频连续 500.8 nm Nd:YAG/LBO 激光器[J]. *激光与红外*, 2004, **34**(6): 436~438

13 <http://www.sandia.gov/imrl/X1118/xxtal.htm>

14 Y. F. Chen, S. W. Tsal. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> yellow laser with intracavity sum-frequency mixing[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6): 397~399

15 Lü Baida. *Laser Optics Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 394~397  
吕百达. *激光光学-光束描述、传输变换与光腔技术物理* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 394~397