

文章编号 1004-924X(2005)03-0260-05

# 全固态 589 nm 复合腔连续波和频激光器

吕彦飞, 檀慧明, 钱龙生

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**给出了一种复合腔结构和频激光器,用 2 台激光二极管阵列(LDA)经过光纤耦合分别单独端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:YAG 晶体,其中 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:YAG 晶体所选择的能级跃迁分别为  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}$  和  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{3/2}$ ,其对应激光跃迁波长分别为 1 064 nm 和 1 319 nm,两基频激光束分别在两个子谐振腔中振荡,在其交叠区利用 KTP II 类临界相位匹配(CPM)进行腔内和频,获得了 589 nm 的和频激光。当抽运功率为 8 W/14 W 时获得了 340 mW 连续波 TEM<sub>00</sub> 黄光激光输出。光束质量因子  $M^2 < 1.2$ ,激光输出功率噪声低,4 h 功率不稳定性小于  $\pm 3\%$ 。该复合腔结构是实现 LDA 泵浦 589 nm 全固态黄光激光器一种有效的和频方法。

**关键词:**激光二极管阵列;和频;全固态激光器;黄光激光器

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## All-solid-state continuous-wave doubly resonant all intra-cavity sum-frequency laser at 589 nm

L Ü Yan-fei, TAN Hui-ming, QIAN Long-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A resonator designed for doubly resonant continuous-wave intra-cavity sum-frequency mixing (SFM) laser is studied. Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG are pumped by two Laser Diode Array (LDA) which were coupled by optical fiber respectively, 1 064 nm wavelength is obtained from  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}$  transition in Nd:YVO<sub>4</sub> and 1 319 nm wavelength is obtained from  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{3/2}$  transition in Nd:YAG. Both laser beams are oscillated in two sub-cavity, and a KTP with type II Critical Phase Match (CPM) is used at the overlap of the two fundamental laser beams to realize the 589 nm SFM laser. An output power of 340 mW continuous-wave TEM<sub>00</sub> yellow laser could be obtained with 8 W/14 W pump power. The output power is with low noise and a  $M^2$  factor of less than 1.2. The power instability is less than  $\pm 3\%$  within 4 h. Doubly resonant is an effective solution to realize 589 nm all solid state yellow laser pumped by LDA.

收稿日期:2005-03-19;修订日期:2005-04-20

基金项目:国家“863”高科技计划资助项目(No. 2002AA311140)

**Key words:** laser diode array; sum-frequency; all-solid-state laser; yellow laser

## 1 引言

LDA 抽运的全固态激光器具有体积小、寿命长、结构紧凑、效率高、光束质量好和性能稳定等优点,具有广泛的应用前景。目前,LDA 抽运的腔内混频激光器主要应用是腔内倍频激光器,已经有大量文章对 LDA 抽运腔内倍频红、绿和蓝激光器进行研究<sup>[1-6]</sup>,并且在很多领域得到了广泛的应用。然而,在 550 ~ 620 nm 的激光束由于缺少相应基频光,很难通过上述倍频技术得到。但是该波段激光在显示、医疗和各种野外作业中,特别是有雾气情况下的大地测量上有特殊的用途。如果在激光谐振腔内可以获得两个不同波长的激光谱线同时振荡,选择确定切割角度的非线性晶体进行腔内和频恰能够产生该波段激光。LDA 抽运的腔内和频激光器的基础是腔内双波长的产生。从 90 年代初开始,有些作者已对各种掺钕离子激光增益介质双波长振荡和输出的可能性进行了研究,并从理论上给出了双波长振荡条件<sup>[7-9]</sup>。目前利用双波长在非线性晶体内和频产生不同波长的研究主要有腔内和频<sup>[10-13]</sup>和腔外和频<sup>[14-15]</sup>方法。

与腔内倍频激光器相比,腔内和频激光器的研究较少。本文首次报道了采用两台抽运源分别抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:YAG 晶体。通过复合腔结构,使两基频光获得独立增益,通过优化谐振腔使两基频光交叠充分,可以分别调节两台抽运源的电流使复合腔的两个子谐振腔中的基频光增益达到相近,在激光束的交叠区通过非线性晶体 KTP II 类临界相位匹配进行腔内和频,获得了 589 nm 的黄激光输出。该激光束不仅在光谱研究中有广泛的应用,而且

在军事方面(如空间目标监测与识别)有着重要的应用。在天文望远镜中可成为纳导信号理想的取代光源。因此,研制 589 nm 黄光激光器具有较高的实用价值。

## 2 实验方案

实验装置如图 1 所示,两台抽运源为光纤耦合输出半导体激光器阵列,经准直聚焦系统(传输耦合效率约为 82%)会聚成半径 200 μm 的抽运光斑,注入到 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:YAG 晶体中。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体沿 a 轴切割,钕离子掺杂原子分子数为 0.5%,尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm, Nd:YAG 的钕离子掺杂原子分子数为 1.0%,尺寸为 4 mm × 3 mm。

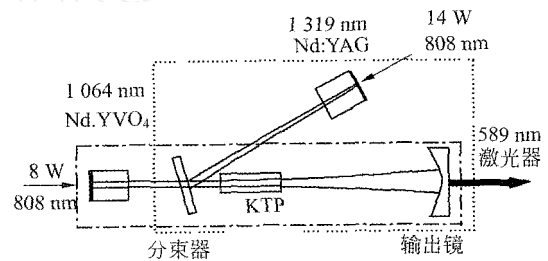


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

其中 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体左端镀 1 064 nm 高反膜,808 nm 增透双色膜作为一个腔镜,右端镀 1 064 nm 增透膜;Nd:YAG 晶体右端镀 1 319 nm 高反膜,808 nm 增透双色膜作为另一个腔的腔镜,左端镀 1 319 nm 增透膜;曲率半径为 200 mm 的平凹镜作为两谐振腔的共用输出镜,凹面镀 1 319 nm/1 064 nm 高反膜、589 nm 增透膜,平面镀 589 nm 增透膜;分束镜左端镀 1 064 nm 增透膜,右端镀 1 319 nm 高反膜、1 064 nm 增透膜;非线性和频晶体 KTP 采用 II 类临界相位匹配角度切割,尺寸为 2 mm ×

2 mm × 7 mm, 两端面均镀 1 319 nm / 1 064 nm / 589 nm 增透膜。

对 LDA、Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:YAG 和 KTP 用半导体致冷器进行严格的温控。调节致冷器电流, 使 LDA 的发光波长分别与 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:YAG 的中心吸收波长重合, 可最大限度地吸收利用抽运光, Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:YAG 和 KTP 共用一个致冷器。含有 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:YAG 谐振腔长分别为 67 mm 和 55 mm。

### 3 实验结果

采用了 KTP 作为非线性晶体进行腔内和频, 测量了 589 nm 激光输出功率随抽运功率的变化, 如图 2 所示, 曲线 1 是当注入到 Nd:YAG 晶体的抽运功率为 14 W

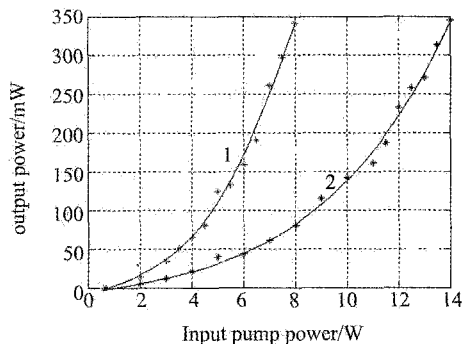


图 2 589 nm 和频光输出功率随抽运光功率的变化关系

Fig. 2 SFM 589 nm output power via pump power

时, 589 nm 激光输出功率随注入到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的抽运变化关系, 曲线 2 是当注入到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的抽运功率为 8 W 时, 589 nm 激光输出功率随注入到 Nd:YAG 晶体的抽运功率的变换关系。由图 2 可以看出和频激光最高输出功率为 340 mW 时, 并未出现饱和现象, 这就说明当增大抽运功率时, 和频激光仍会进一步提高。但是在高功率 LDA 端面抽运固体

激光器中, 激光晶体的热效应是不能获得高效率、高功率输出的一个重要因素。即使在中功率情况下, 激光晶体的热透镜效应仍很明显。根据稳态热传导方程为<sup>[16]</sup>

$$\frac{1}{f_{th}} = \frac{P_{abs}}{4 K_c} \left[ \frac{dn}{dT} + (n_0 - 1) \right]$$

其中  $f_{th}$  热透镜焦距, 为热负荷比,  $P_{abs}$  为吸收的抽运功率,  $K_c$  为热导率,  $r_p$  为平均抽运光斑半径,  $n_0$  是环境温度下的折射率,  $dn/dT$  为折射率温度系数,  $\beta$  为热膨胀系数。实验中所用 Nd:YVO<sub>4</sub> 的有关参数是:  $\beta = 0.4$ ,  $K_c = 5.23 \text{ W/mK}$ ,  $n_0 = 2.165$ ,  $\beta = 4.43 \times 10^{-6} / \text{K}$ ,  $dn/dT = 3.0 \times 10^{-6} / \text{K}$ ; Nd:YAG 的有关参数是  $\beta = 0.38$ ,  $K_c = 10.3 \text{ W/mK}$ ,  $n_0 = 1.82$ ,  $\beta = 7.5 \times 10^{-6} / \text{K}$ ,  $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。

经过计算, 8 W / 14 W 的抽运功率下 Nd:YVO<sub>4</sub> / Nd:YAG 的热透镜焦距约为 150 mm / 100 mm。可以看出, 当增大抽运功率时, 热焦距会进一步变短, 这就导致热透镜焦距与两个子谐振腔的腔长接近。所以如果为提高输出功率而增大抽运功率时, 应当重新考虑谐振腔的设计。

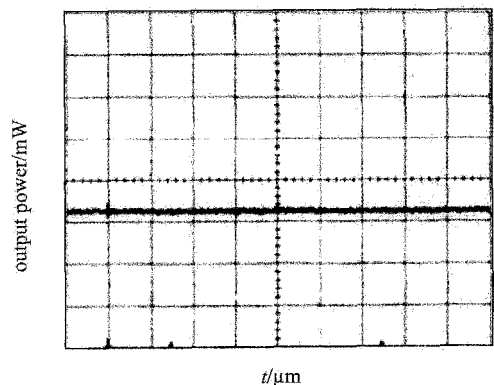


图 3 589 nm 输出功率噪声情况

Fig. 3 589 nm output power under noise operation

图 3 是在输出功率为 340 mW 时用示波器测量的噪声图形, 可以看出激光的输出功率为低噪声。图 4 是用照相机拍摄激

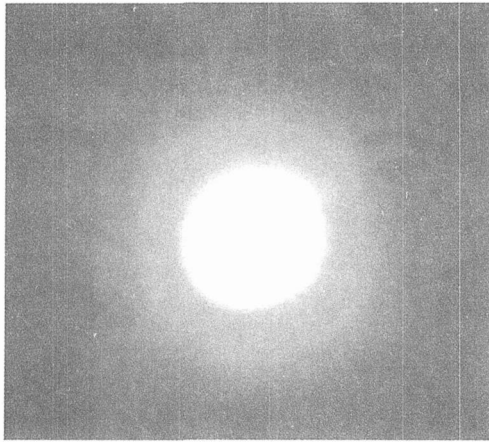


图4 589 nm 激光远场光斑照片  
Fig.4 Far-field spot of 589 nm laser

光远场光斑的照片,表明激光输出的模式为  $TEM_{00}$  模。

## 4 结 论

研究了采用 8 W/14 W 的 LDA 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:YAG 晶体,利用 KTPII 类临界相位匹配进行复合腔内和频,获得了 340 mW 的 589 nm 连续波黄激光输出,激光输出功率噪声低,光束质量好。实验结果表明该复合腔结构是实现 LDA 抽运 589 nm 全固态黄光激光器的一种有效和频方法,并可应用到其他两种激光晶体的发射谱线进行腔内和频,能够获得更多不同颜色的单谱线激光输出。因此,LDA 抽运的复合腔和频技术,为新波长全固态激光器的发展提供了一个新的方向。

## 参考文献:

- [1] 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.  
XU D G, YAO J Q, ZHOU R, *et al.* 104 W All-solid-state 532 nm Nd:YAG laser[J]. *China. J. Laser*, 2003,30(9):864-864. (in Chinese)
- [2] ZHENG Q, ZHAO L, QIAN L S. Single-frequency operation of a diode-pumped green laser using multi-Brewster plates[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003,1(8):480-481.
- [3] 檀慧明,郑权,陈颖新,等. LBO I 类临界相位匹配倍频 671 nm 激光器[J]. 中国激光, 2002,29(4):289-292.  
TAN H M, ZHENG Q, CHEN Y X, *et al.* Double-frequency 671 nm laser with type-I critical phase-matching LBO[J]. *China. J. Laser*, 2002,29(4):289-292. (in Chinese)
- [4] 张恒利,侯玮,许祖彦,等. 激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 红光激光器研究[J]. 光学学报, 2001,21(3):274-277.  
ZHANG H L, HOU W, XU Z Y, *et al.* Study of an efficient Nd:YVO<sub>4</sub> red light laser pumped by laser diode[J]. *Acta. Optica. Sinica.*, 2001,21(3):274-277. (in Chinese)
- [5] YAO A Y, HOU W, LIN X C, *et al.* High power red laser at 671 nm by intra-cavity-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser using LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> [J]. *Optics Communications*, 2004, 231(4-6):413-416.
- [6] PIERROU M, ARLSSON H K, KELLNER T, *et al.* Generation of 740 mW of blue light by intra-cavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO<sub>4</sub> crystal[J]. *Opt Lett.*, 1999,24(4):205-207.
- [7] NADTOCHEEV V E, NANIL O E. 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] SHEN H Y, ZENG R R, ZHOU Y P, *et al.* Comparison of simultaneous multiple wavelength

- lasing in various neodymium host crystals at transitions from  ${}^4F_{3/2}$ - ${}^4I_{1/2}$  and  ${}^4F_{3/2}$ - ${}^4I_{3/2}$  [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(20):1937-1938.
- [9] CHEN Y F. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Appl. Phys.*, 2000, B70:475-478.
- [10] SHEN H Y. Oscillation condition of simultaneous multiple wavelength lasing [J]. *Chinese Phys. Lett.*, 1990, 7(4):174-176.
- [11] HONDERSON G A. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, 68(11):5451-5455.
- [12] KRETSCHMANN H M, HEINE F, GANTER H. All solid-state continuous-wave doubly resonant all-intra-cavity sum-frequency mixer[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(19):1661-1663.
- [13] 檀慧明,高兰兰,吕彦飞. 激光二极管泵浦 KTP 腔内和频激光器及其噪声的分析[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5):459-464.
- TAN H M, GAO L L, LÜ Y F. Noise characteristics of laser diode pumped solid-state laser by intra-cavity sum-frequency of KTP phase matching[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(10):459-464. (in Chinese)
- [14] CHEN Y F. Efficient generation of continuous-wave yellow light by single-pass sum-frequency mixing of a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> dual-wavelength laser with periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(20):1809-1811.
- [15] VANCE J D, SHE CH Y, MOOSMÜLLER H. Continuous-wave, all-solid-state, single-frequency 400 mW source at 589 nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator[J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(21):4891-4896.
- [16] CHEN Y F, TSAI S W. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> yellow laser with intra-cavity sum-frequency mixing[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(6):397-399.

作者简介:吕彦飞(1976-),男,黑龙江人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,研究方向为大功率高性能全固态激光器及非线性频率变换技术。Email:lvyanfei\_1976@163.com