

文章编号: 1001-3806(2005)05-0488-03

## LD 抽运 Nd YVO<sub>4</sub> /LBO 腔内和频橙黄光连续激光器

吕彦飞, 檀慧明\*, 任旭升, 钱龙生

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

**摘要:** 报道了一种激光二极管抽运 Nd YVO<sub>4</sub> 晶体、腔内类临界相位匹配 LBO 和频、连续波输出的全固态橙黄色激光器的设计和实验结果。橙黄色激光由 Nd YVO<sub>4</sub> 晶体的 1064nm 和 1342nm 谱线腔内和频产生, 输出波长为 593.5nm。实验采用了双镜谐振腔结构, 在 1.6W 的 808nm 注入抽运功率下, 获得了最大功率为 84mW 连续波 TEM<sub>00</sub> 的橙黄色低噪声激光输出, 光光转换效率为 5.3%, 光束质量因子  $M^2 < 1.2$ 。实验和分析表明, 采用激光二极管抽运 Nd YVO<sub>4</sub> 晶体、LBO 类临界相位匹配腔内和频是获得橙黄色激光的实用方法, 并可以应用到 Nd YVO<sub>4</sub> 晶体的其它谱线或具有多条谱线的其它激光增益介质, 获得更多不同颜色的单谱线激光输出。

**关键词:** 激光二极管抽运; 腔内和频; 全固态; 橙黄色激光

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

### Laser diode pumped Nd YVO<sub>4</sub> /LBO continuous wave orange-yellow laser with intracavity sum frequency mixing

LÜ Yan-fei, TAN Hui-ming, REN Xu-sheng, QIAN Long-sheng

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

**Abstract:** A fiber-coupled laser diode pumped Nd YVO<sub>4</sub> crystal, type critical phase matching LBO crystal intra-cavity sum frequency mixing by 1064nm and 1342nm, orange-yellow laser at 593.5nm was reported. By using a two lenses-cavity resonator, with injection pump power of 1.6W, TEM<sub>00</sub> mode orange-yellow, low noise laser at 593.5nm of 84mW was obtained at last, and the optical conversion efficiency was 5.3%, its  $M^2$  factor was less than 1.2. The experiments and analyses show that type critical phase matching LBO crystal intra-cavity sum frequency mixing is an available technique for orange-yellow laser and it can be applied to other transition wavelengths in Nd YVO<sub>4</sub> or other laser with different laser gain crystals to obtain more all-solid-state lasers with different single wavelength.

**Key words:** LD pumped; intra-cavity sum frequency; all-solid-state; orange-yellow laser

## 引 言

LD 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, 有着广泛的应用前景。目前, LD 抽运的腔内混频激光器主要应用是腔内倍频激光器, 已经有很多学者对 LD 抽运腔内倍频红、绿和蓝激光器进行研究<sup>[1~6]</sup>。并且它在很多领域也得到了广泛的应用。然而, 由于在 550nm ~ 650nm 的激光束没有相应基频光, 无法通过上述倍频技术得到, 但是, 590nm ~ 620nm 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及各种准直场合, 有着特殊的用途。由于大

多数激光增益介质具有多条跃迁谱线, 如果通过谐振腔参量的控制, 激光谐振腔内可以获得两个或两个以上的不同波长激光谱线振荡, 选择确定角度切割的非线性晶体在腔内混频, 可以获得与激光发射谱线不同的和频或差频波长输出, 而腔内和频恰能够产生 550nm ~ 650nm 波段激光, 因此具有较高的实用价值。

LD 抽运的腔内和频激光器的基础腔内多波长的产生, 从 90 年代初开始, 有些学者已对各种掺钕离子激光增益介质多波长振荡和输出的可能性进行了研究<sup>[7~9]</sup>, 并从理论上给出了多波长振荡条件。目前利用多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, 11]</sup>和腔外和频<sup>[12, 13]</sup>两种方法, 而腔内和频的研究很少, 主要有 KRECHMANN 等采用复合腔结构对 Nd YAP 的 1080nm 谱线和 Nd YAG 的 1444nm 谱线进行腔内和频, 获得了 618nm 的近红激光输出<sup>[14]</sup>, CHEN 等采用三镜谐振腔结构研究了 LD 抽运 Nd YVO<sub>4</sub> 晶体的 Q 开关脉冲激光器<sup>[9]</sup>, 获得了 593.5nm 橙黄色脉冲激光输出。

基金项目: 国家八六三高科技计划基金资助项目 (2002AA311140)

作者简介: 吕彦飞 (1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为大功率高性能全固态和频激光器及非线性频率变换技术。

\* 通讯联系人。E-mail: huimingt@163.com

收稿日期: 2004-07-26; 收到修改稿日期: 2004-08-30

作为激光增益介质的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,除了可以产生 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 到 <sup>4</sup>I<sub>1/2</sub> 能级跃迁外,还可以产生 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> 到 <sup>4</sup>I<sub>3/2</sub> 能级跃迁,其对应激光跃迁波长分别为 1064nm 和 1342nm,其中 1064nm 和 1342nm 的发射截面分别是 25 × 10<sup>-19</sup> cm<sup>2</sup> 和 7.6 × 10<sup>-19</sup> cm<sup>2</sup>[15],以 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为激光增益介质可以同时产生 1064nm 和 1342nm 双波长振荡。作者研究了采用两镜谐振腔结构,LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体、LBO 类临界相位匹配的腔内和频连续波输出激光器,获得了 84mW 的 593.5nm 的橙黄色连续波激光输出。

### 1 和频晶体的选择

选择和频晶体时,晶体的匹配类型、匹配角度、有效非线性系数、走离角、容忍角和温度范围等参数都是要考虑的。它们一方面决定着对和频晶体的切割角度的选取,另一方面也作用于激光谐振腔的设计。在 LD 抽运 593.5nm 固体激光器中,常用的两种非线性和频晶体 LBO 和 KTP 临界相位匹配的主要参数见表 1。

Table 1 The parameters of 1064nm and 1342nm critical phase-matching sum frequency mixer of different nonlinear crystals

parameters	crystals	
	KTP( )	LBO( )
walk-off angle /mrad	20.8	1.58
nonlinear coefficient d <sub>eff</sub> /(pm · V <sup>-1</sup> )	3.41	0.84
mix accept angle/(mrad · cm <sup>-1</sup> )	3.55	23.37

由表 1 可以看出,LBO 晶体的有效非线性系数 d<sub>eff</sub> 明显小于 KTP 的,但却具有走离角小、容忍角大等优点,考虑到激光器的和频光功率密度与有效非线性系数 d<sub>eff</sub> 和晶体长度 L 乘积的平方成正比。虽然 LBO 晶体的有效非线性系数 d<sub>eff</sub> 小,但 LBO 有较大的作用长度,可以通过增加 LBO 的长度得以补偿。另外,可以适当地减小腔内光束半径 w,以增加腔内经过 LBO 的基频光功率密度,从而进一步提高和频效率。并且 LBO 晶体类临界相位匹配工作时,没有 KTP 类相位匹配那种双折射滤光片效应,不会改变基频光的偏振方向,基频光良好的偏振方向才能保证相位匹配条件,也有利于提高和频效率。虽然 KTP 的有效非线性系数 d<sub>eff</sub> 大,但容忍角小,走离角大,在腔内束腰较小的情况下,导致和频晶体作用长度很短,很难提高激光输出功率。

### 2 实验方案

LD 抽运腔内和频橙黄色激光器的实验装置如图 1 所示,采用的是两镜腔结构,具有结构紧凑,装调简单,易于应用等优点。

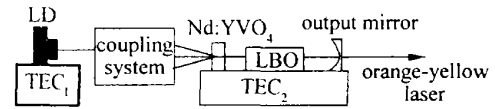


Fig 1 Experimental setup

抽运源是最大输出功率为 2W 的 LD,通过 LD 致冷器 TEC<sub>1</sub> 电流的调节,使抽运光中心波长与 Nd:YVO<sub>4</sub> 的中心吸收波长 808.9nm 重合,经过准直、扩束、聚焦,最终成为椭圆度为 0.88,束腰半径约为 90μm 的抽运光斑,入射到 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体沿 a 轴切割,钕离子掺杂的原子数分数为 1%,通光长度为 2mm,其左端镀 808nm 增透膜和 1342nm/1064nm 双色高反膜作为一个腔镜,右端对 1342nm/1064nm 增透,侧面裹上一层铝箔安装在紫铜热沉上,通过半导体制冷器进行温度控制。曲率半径为 50mm 的平凹镜作为输出镜,凹面镀 1342nm/1064nm 高反膜和 593.5nm 增透膜,平面对 593.5nm 增透,和频晶体采用类临界相位匹配 LBO,尺寸为 2mm × 2mm × 10mm,两端面镀 1342nm/1064nm/593.5nm 三色增透膜。腔长约为 20mm,机械结构稳定、抗震动。对 LD,Nd:YVO<sub>4</sub> 和 LBO 用半导体致冷器 TEC<sub>2</sub> 进行严格的温控,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体和 LBO 共用一个致冷器致冷,减小 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体热效应。

由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中波长为 1064nm 基频光比 1342nm 基频光的受激发射截面大,因此,若想使两基频光在增益介质中的增益尽量达到相近,合理的设计谐振腔内各元件的反射率和透过率直接影响着激光器的总体效率。根据激光谐振腔内光束计算公式,在同样条件下,1342nm 与 1064nm 光斑半径比为  $\sqrt{1342/1064} = 1.12$ ,即腔内 1342nm 基频光要比 1064nm 基频光的束腰半径大一些,仅从束腰这一角度来看,1342nm 基频光要比 1064nm 基频光的增益大一些;另外,在制备激光输出镜时,优先考虑 1342nm 的基频光,使其反射率大于 1064nm 基频光的反射率。这样,从上面两点分析来看,可以弥补 1342nm 相对于 1064nm 基频光发射截面小的缺点,使两基频光的增益达到相近。

### 3 实验结果及分析

实验中测量了 593.5nm 橙黄色激光输出功率随电流的变化关系,图 2 是 593.5nm 橙黄色激光输出功率

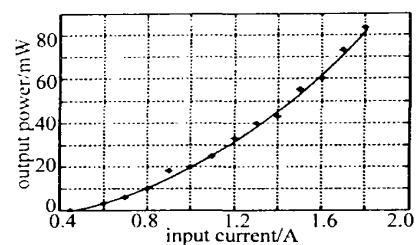


Fig 2 SFM 593.5nm output power via input current

率随工作电流变化情况。从图2中可以看出,激光器的阈值功率约为0.45A,当抽运功率1.8A(对应抽运功率为1.6W)时,获得593.5nm橙黄色激光输出功率为84mW。

图3是用示波器在功率为84mW时检测593.5nm

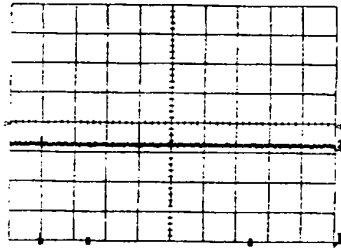


Fig 3 593.5nm output power under noise operation

的噪声特性,并且观察到输出信号始终处于低噪声工作。其原因是由于Nd:YVO<sub>4</sub>晶体发射的1064nm和1342nm两个基频光波长都为相同方向的线偏振输出,由于在LBO类和频过程中,和频光的偏振态都不改变,仅有一个偏振方向,不会发生由于不同偏振模式之间耦合引起模式竞争。

图4是采用Photon Inc.公司生产的光束轮廓仪测

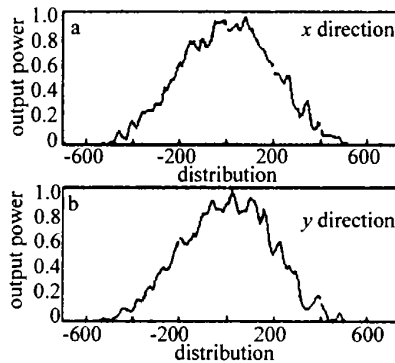


Fig 4 Far-field spot energy distribution 593.5nm laser

量的橙黄色激光的远场光斑能量分布图,说明激光光斑是很好的TEM<sub>00</sub>输出。

## 4 结论

研究了采用2W的LD抽运Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,采用LBO类临界相位匹配腔内和频,获得了84mW的593.5nm连续橙黄色激光输出,光光转换效率为5.3%。实验结果表明,采用LD抽运腔内和频是获得593.5nm

橙黄色激光一种有效和频方法,若该方法应用Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的其它谱线或具有多条谱线的其它激光增益介质进行腔内和频,可获得更多波长的全固态腔内和频单谱线激光器。故LD抽运的腔内和频技术,为实现新波长全固态连续波激光器的发展提供了方向。

## 参考文献

- [1] 赵致民,李隆,田丰 *et al* 高功率端面泵浦内腔倍频瓦级绿光激光器 [J]. 激光技术, 2003, 27(4): 331~333.
- [2] 郭明秀,陆雨田. Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP全固态倍频激光器的研究 [J]. 激光技术, 2003, 27(6): 236~238.
- [3] 李朝阳,王勇刚,黄骝. 类临界相位匹配LBO腔外倍频660nm效率的研究 [J]. 激光技术, 2003, 27(5): 428~430.
- [4] 王涛,姚建铨,李喜福. 红光(660nm)准连续Nd:YAP内腔倍频激光器 [J]. 中国激光, 2002, A29(6): 108~110.
- [5] 李瑞宁,于建华,来引娟 *et al* LD抽运的Nd:YAP内腔倍频全固态蓝光激光器 [J]. 中国激光, 2002, A29(6): 105~107.
- [6] PIERROU M, KARLSSON H, KELLNER T *et al* Generation of 740mW of blue light by intracavity 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, NAN L O E Two-wave emission from a cw solid-state YAG:Nd<sup>3+</sup> laser [J]. Sov J Q E, 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 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>1/2</sub> and <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>3/2</sub> [J]. A P L, 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 Physics Letters, 1990, 7(4): 174~176.
- [11] HENDERSON G A. A computational model of a dual-wavelength solid-state laser [J]. J A P, 1990, 68(11): 5451~5455.
- [12] 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.
- [13] VANCE J D, SHE C Y, MOOSMULLER H. Continuous-wave, all-solid-state, single-frequency 400mW source at 589nm based on doubly resonant sum-frequency mixing in a monolithic lithium niobate resonator [J]. Appl Opt, 1998, 37(21): 4891~4896.
- [14] KRETSCHMANN H M, HEINE E. All solid-state continuous-wave doubly resonant all-intracavity sum-frequency mixer [J]. Opt Lett, 1997, 22(19): 1661~1663.
- [15] OKA M, KUBOTA S. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized mode in diode-pumped Nd:YAP lasers [J]. Opt Lett, 1988, 13(10): 805~807.

(上接第477页)

- tron, 1999, E82-C(2): 357~359.
- [5] SATO T, YAMAMOTO F, TSUJI K *et al* A uncooled external cavity diode laser for coarse-WDM access network systems [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2002, 14(7): 1001~1003.
  - [6] LAY T S, CHEN M H, YANG H M *et al* 1.55μm non-anti-reflection-coated fiber grating laser for single-longitudinal mode operation [J]. Opt & Quantum Electron, 2002, 34(7): 687~696.
  - [7] MIKHAILOV T V, BAYVEL P, WYATT R *et al* Fibre grating laser-

- based pulse source for 40Gbit/s OTDM transmission systems [J]. Electron Lett, 2001, 37(14): 909~910.
- [8] WU Zh M, XIA G Q, CHEN J G. Influence of the reflectivity distribution of fiber grating on the output characteristics of fiber grating external cavity diode lasers [J]. J Opt Commun, 2003, 24(1): 22~24.
  - [9] 周凯明,葛璜,安贵仁 *et al* 用光纤光栅作外反馈的可调谐外腔半导体激光器 [J]. 中国激光, 2001, A28(2): 113~115.
  - [10] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. Second Edition, San Diego: Academic Press, 1995. 455.