

文章编号:1001-5078(2005)01-0045-03

# LBO I 类临界相位匹配内腔和频 593.5nm 激光器

吕彦飞, 檀慧明, 高兰兰, 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 130022)

**摘要:**报道了 LD 端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体产生 1064nm 和 1342nm 双波长激光束, 采用一个线性平凹腔结构, 利用 LBO I 类临界相位匹配在腔内和频产生 593.5nm 连续黄光激光输出的全固体激光器的实验研究。在泵浦功率为 10W 时得到 593.5nm 的黄光激光输出功率为 260mW。光束远场发散角  $\theta < 1$  mrad。593.5nm 激光输出为低噪声输出。24h 功率不稳定性小于  $\pm 2\%$ 。

**关键词:**LD 泵浦; LBO; 和频; 黄光激光器

**中图分类号:**248.1      **文献标识码:**A

## LBO Type- I Critical Phase-matched Intracavity Sum-frequency Mixing 593.5nm Laser

LÜ Yan-fei, TAN Hui-ming, GAO Lan-lan, QIAN Long-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130022, China)

**Abstract:** A LD-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> continuous wave (cw) 593.5nm yellow laser is reported. With one plan-curved cavity dual-wavelength operation, 1064nm and 1342nm are realized, and with LBO intracavity sum-frequency mixing 593.5nm laser is attained. The experimental results of 593.5nm 260mW yellow laser have been observed with 10W pump power. The far field divergence angle is  $< 1$  mrad. Low-noise characteristic of the yellow laser has been proved, and the power instability is less than  $\pm 2\%$  within 24 hours.

**Key words:** LD pumped; LBO; sum-frequency mixing; yellow laser

### 1 引言

LD 泵浦全固体激光器通过内腔倍频技术可以得到红、绿、蓝激光输出, 此类激光器具有体积小、重量轻、寿命长, 效率高等优点。然而, 在 550 ~ 650nm 的激光束由于没有相应基频光, 而无法通过上述倍频技术得到, 但是, 590 ~ 620nm 波段激光在显示和医疗有特殊的用途, 我们必须寻找产生这一波段相干光的途径, 而非线性光学和频技术是获得这个波段的有效方法。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为激光增益介质除了可以产生  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$  的 1064nm 波长的发射谱线, 还可获得  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$  的 1342nm 波长的发射谱线<sup>[1,2]</sup>, 由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中宽的吸收带和在  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$  及  ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{13/2}$  大的受激发射截面两方面的原因, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体成为双波长激发的理想材料。其中 1064nm 与 1342nm 的发射截面分别是 25

$\times 10^{-19} \text{cm}^2$  和  $7.6 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ , 比值约为 3<sup>[3]</sup>。本文列举的是 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体产生双波长光束, 经内腔和频后产生连续 593.5nm 黄激光的方案。

目前, 通过和频技术得到激光输出的研究主要有内腔和频<sup>[4]</sup>与外腔和频<sup>[5]</sup>两种方式。外腔和频方法由于基频光功率密度低, 和频效率受到了限制, 如图 1 所示, 内腔和频方法主要是通过单通道复合腔结构来实现(如图 2 所示), 从而使两个基频光在两个相对独立的谐振腔中分别振荡, 把和频晶体放置于第一个谐振腔中(如图 1 所示)实现和频过程。

**作者简介:**吕彦飞(1976-), 男, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士, 研究方向为大功率高性能固体激光器及非线性频率变换技术。E-mail: lvyanfei1976@163.com

**收稿日期:**2004-05-31

这种结构由于采用两个平面输出镜,两个基频光在增益介质中的光腰半径可以通过分别调节谐振腔的长度实现,从而使两个基频光的增益相近。但该结构复杂,调节起来比较困难,不利于产业化。

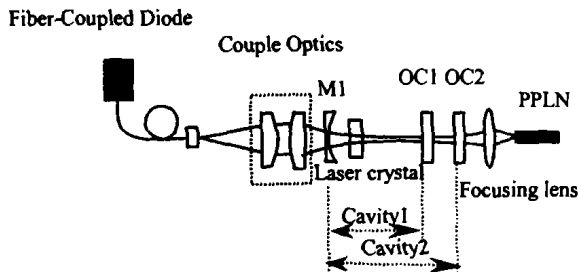


图 1 外腔和频激光器结构示意图

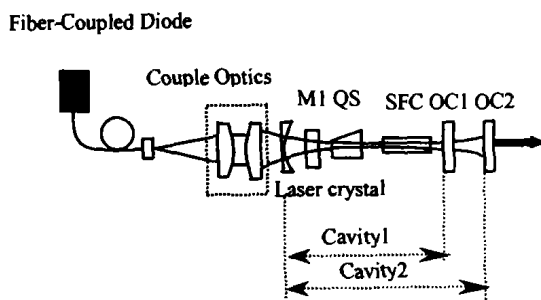


图 2 内腔和频激光器结构示意图

本文报道了利用一个线性平凹腔结构在 10W 泵浦功率时获得了 260mW 波长为 593.5nm 的连续黄光激光输出的研究结果。当采用一个平凹镜谐振腔结构时 1342nm 基频光比 1064nm 基频光在增益介质中的光腰半径要大一些,因此仅从光腰一个因素考虑,1342nm 基频光的增益要比 1064nm 基频光的增益要大。如果在设计平凹镜的双波长高反膜时,选择 1342nm 优先,1064nm 其次,控制 1342nm 的发射率高于 1064nm 的反射率,则可以增强 1342nm 基频光的增益。综合以上两个方面考虑,完全可以在采用一个平凹镜的情况下可以弥补 1342nm 基频光相对 1064nm 基频光发射截面小的缺点,从而使 1064nm 和 1342nm 的增益达到相近。这样不仅缩小了谐振腔的体积,同时增加了激光器的稳定性,也降低了激光器的调节难度,因此该和频激光器结构具有一定的实用性。

## 2 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、接受角、接受带宽等参数是我们要考虑的。它们一方面决定着对和频晶体的切割角度的选取,另一方面也作用与激光谐振腔的设计。在 LD 泵浦 593.5nm 固体激光器中对 KTP、LBO 和 BBO 的角度匹配和频参数进行了计算。表 1 列出了典型的和频参数值。

表 1 不同非线性晶体 1064nm 和 1342nm 临界相位匹配和频的典型参数

Parameters	Crytals	KTP	LBO	BBO
Critical phase-matching		Type- II	Type- I	Type- I
Convert mode (nm)		1064(o) + 1342(e) -593.5(o)	1064(o) + 1342(e) -593.5(e)	1064(o) + 1342(e) -593.5(e)
Walk-off angle/mrad ( $\rho$ )		20.8	1.58	52.6
Nonlinear-coefficient/ $\mu\text{m}/\text{V}(d_{\text{eff}})$		3.41	0.84	2.01
Maximum working length/mm ( $L_{\text{max}}$ )		11.2	146.8	4.41
Mix accept angle (mrad cm)		3.55	52.94	1.55
Mix accept bandwidth ( $\text{cm}^{-1}\text{cm}$ )		58.56	182.94	66.19

从表 1 中可以看出 KTP 的有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  最大;BBO 的最大作用长度  $L_{\text{max}}$  最短;LBO 的走离角  $\rho$  最小、接受角最大、最大作用长度  $L_{\text{max}}$  最长、接受角和接受带宽最大。从上面的参数来看,这足以说明 LBO 作为和频晶体比 KTP 和 BBO 都要优越。

公式<sup>[6]</sup>

$$I_3 = \frac{2\pi^2 L^2 \chi_{\text{eff}}^2}{n_1 n_2 n_3 \lambda_3^2 c \epsilon_0} I_1 I_2 \frac{\sin^2(\Delta k \cdot L/2)}{(\Delta k \cdot L/2)^2} \quad (1)$$

其中  $L$  为和频晶体长度; $\chi_{\text{eff}}$  为二阶有效非线性极化系数; $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$  波长分别为 1064nm, 1342nm 和 593.5nm 光束的光强; $n_1$ 、 $n_2$  和  $n_3$  分别为对应光束在晶体中的折射率; $\Delta k$  为相位匹配系数且  $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$ 。

式(1)表明激光器的和频光功率与有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  的平方和晶体长度  $L$  的平方均成正比。虽然 LBO 晶体的有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  小,但可以通过增加 LBO 的长度得以补偿,因为 LBO 晶体有较大的  $L_{\text{max}}$  值。另外,LBO 走离角很小,可以适当的减小腔内光束半径  $\omega$ ,会增加腔内经过 LBO 的基频光功率密度,从而进一步提高和频效率。所以可以选用较长的 I 类相位匹配 LBO,优化设计出相对较小的束腰尺寸来获得较高的和频效率。并且 LBO 晶体 I 类相位匹配工作时,没有 KTP II 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易保证相位匹配条件,也有利于提高和频效率。

## 3 实验装置及结果

实验装置如图 3 所示。泵浦源的最大输出功率为 10W 的光纤耦合半导体激光器阵列,通过温度调节,使泵浦光中心波长与 Nd:YVO<sub>4</sub> 中心吸收峰 808.5nm 重合,经准直聚焦系统(传输耦合效率约为 82%)会聚成半径为 200 $\mu\text{m}$  的泵浦光斑注入到 Nd:YVO<sub>4</sub> 中。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的掺杂浓度为

0.5atm%, 通光长度为 5mm。

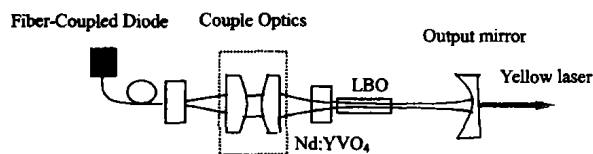


图 3 593.5nm 内腔和频激光器结构示意图

Nd:YVO<sub>4</sub> 的左端面镀 808nm 增透膜和 1064nm 及 1342nm 高反膜作为一个腔镜, 808nm 的透过率约为 90%; Nd:YVO<sub>4</sub> 的右端面镀 1064nm 及 1342nm 增透膜, 侧面裹上一层铝箔安装在无氧铜热沉上通过半导体制冷进行温控。输出平凹镜的凹面曲率半径为 200mm, 镀 1342/1064nm 高反膜和 593.5nm 增透膜(1342nm 高反膜优先考虑), 平面镀 593.5nm 增透膜。和频晶体采用 I 类临界相位匹配 LBO, 尺寸为 2 × 2 × 10mm<sup>3</sup>, 两端面均镀 1342/1064/593.5nm 增透膜。谐振腔长约 50mm, 机械结构稳定、抗震动。

图 4 是 593.5nm 黄激光输出功率随入射到 Nd:YVO<sub>4</sub> 内 808nm 泵浦功率的变化情况。从图中可以看出, 激光器的阈值功率为 600mW。当入射至 Nd:YVO<sub>4</sub> 上的泵浦功率为 10W 时, 获得的 593.5nm 黄光激光输出功率为 260mW 图 4 表明当泵浦光到 10W 时, 和频光输出功率未有任何的饱和现象发生。

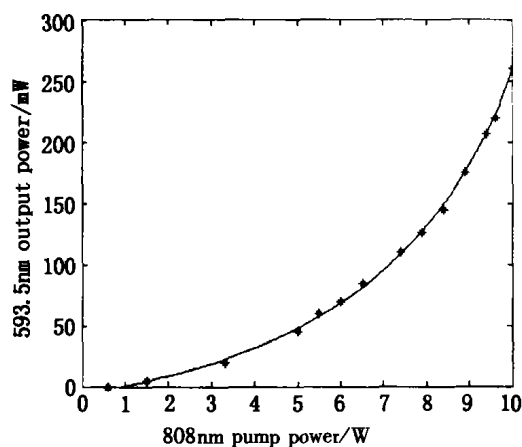


图 4 593.5nm 和频激光输出功率随入射泵浦光功率变换关系

图 5 是用示波器测得输出激光的噪声情况。从图中可以看出激光输出为低噪声输出。图 6 是用照相机拍摄激光远场光斑的照片。

#### 4 结论

本文研究了采用 10W LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>, LBO I 类临界相位匹配内腔和频激光器, 在一个线性平凹腔情况下获得了最大输出功率为 260mW 的 593.5nm TEM<sub>00</sub> 模连续波黄激光输出。激光器的稳定性好, 噪声低。本文中讨论的和频方式是获得结

构紧凑, 简单和效率的 LD 泵浦 593.5nm 全固体黄激光器的有效方法, 并具有一定的实用性和产业化前景。

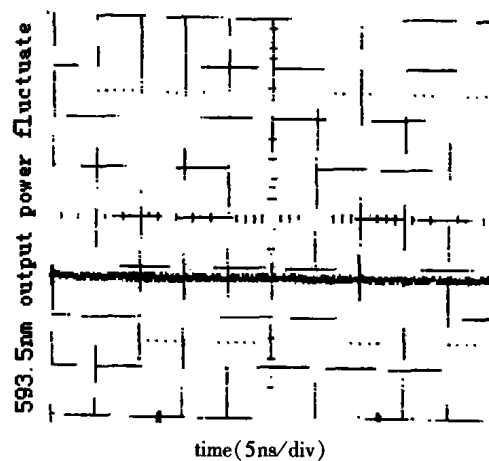


图 5 593.5nm 低噪声输出功率情况

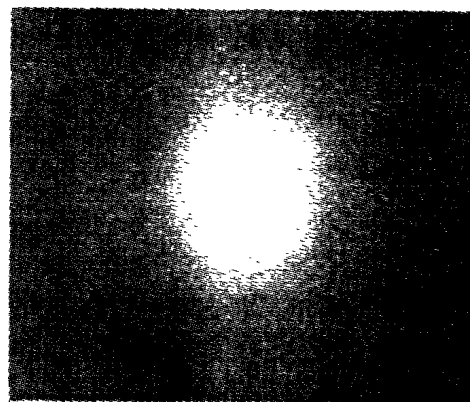


图 6 黄激光远场光斑照片

#### 参考文献:

- [1] A Agnesi, G C Reali, P G Gobbi. 430-mW Single-Transverse-mode Diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 671nm [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(7): 1297 - 1300.
- [2] A W Tucker, M Birnbaum, C L Fincher. Stimulated emission cross section at 1064 and 1342nm in Nd:YVO<sub>4</sub> [J]. J. Appl. Phys, 1997, 48(12): 4907 - 4911.
- [3] Y F Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. Appl. Phys. 2000, B70: 475 - 478.
- [4] Yung-Fu Chen, Diode-pumped Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> yellow laser with intracavity sum frequency mixing [J]. OPTICS LETTERS, 2002, 27(6): 397 - 399.
- [5] Y F Chen. 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.
- [6] 姚健铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 72.